

Підготував: доц. Ярошенко Леонід Вікторович

Лекція № 9б

Тема: «Магнітне поле машини постійного струму»

ПЛАН

- 1. Магнітне коло машини постійного струму при холостому ході і метод його розрахунку;*
- 2. Магнітне коло машини постійного струму при навантаженні;*
- 3. Комутація в машинах постійного струму;*
- 4. Причини, що викликають іскріння на колекторі;*
- 5. Основні способи поліпшення комутації.*

1. Магнітне коло машини постійного струму при холостому ході і метод його розрахунку

Якщо машина постійного струму працює в режимі холостого ходу, то струм її силового кола, тобто кола якоря $I_a = 0$ (у випадку генератора) чи $I_a \approx 0$ (у випадку двигуна).

Отже, в магнітному колі машини в цьому режимі існує магнітне поле, створене тільки обмоткою збудження.

Умовно це магнітне поле можна представити з двох потоків:

Φ_0 - основного магнітного потоку;

Φ_δ - потоку розсіювання головних полюсів.

Основний магнітний потік Φ_0 - є магнітний потік в повітряному зазорі машини між якорем і головним полюсом на довжині окружності по якорю, рівній одному полюсному поділу τ . Цей магнітний потік визначає величину ЕРС E_a , що індукується в обмотці якоря полем збудження. При проектуванні машин постійного струму з заданими номінальними даними, виникає необхідність розрахувати необхідну величину основного магнітного потоку, що забезпечує необхідну ЕРС E_a і, отже, U_n .

З цією метою виконується розрахунок магнітного кола машини. В основі такого розрахунку використовується закон повного струму:

$$\oint Hdl = \sum i, \quad (20.1)$$

де H - напруженість магнітного поля уздовж замкнутої силової лінії; dl - елемент довжини лінії; $\sum i$ - повний струм, що охоплюється замкнутою силовою лінією.

Застосувати закон повного струму в загальному вигляді для магнітного кола машини постійного струму важко, тому що ця силова лінія проходить в середовищах з різною магнітною проникністю.

Тому приймаємо такі допущення:

- 1) магнітне коло машини поділяють на ділянки, для яких вважають, що напруженість магнітного поля уздовж силової лінії постійна;
- 2) вважають, що в області повітряного зазору силові лінії йдуть через зубці якоря і не проходять через паз якоря.

Представимо магнітне коло машини постійного струму, що складається з таких ділянок (рис. 20.1):

$L_{\text{я}}$ - довжина середньої магнітної силової лінії в ярмі з розрахунку на один полюс;

h_m - довжина середньої магнітної силової лінії в головному полюсі;

δ - довжина середньої магнітної силової лінії в повітряному зазорі;

h_z - довжина середньої магнітної силової лінії в зубці якоря;

L_a - довжина середньої магнітної силової лінії в спинці якоря.

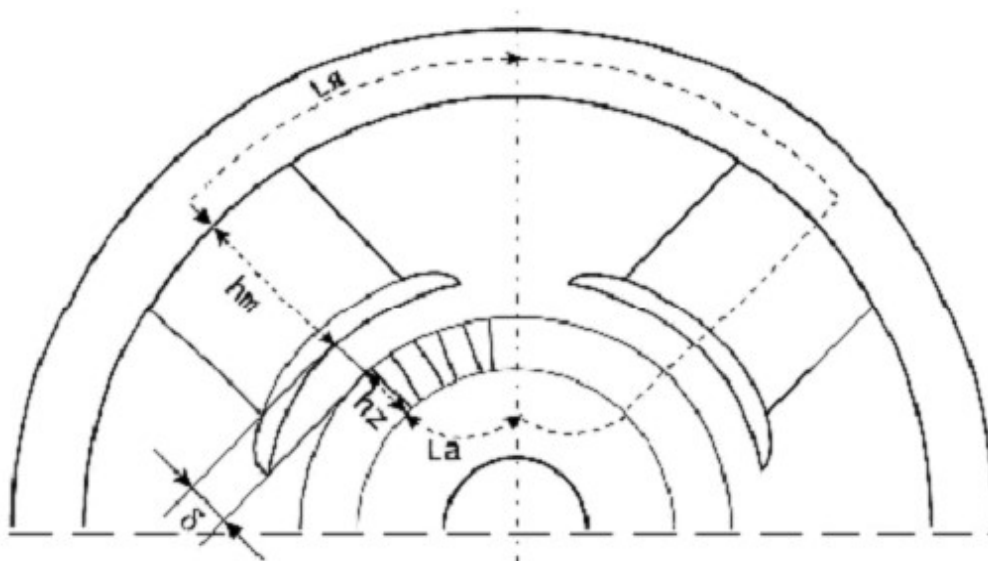


Рис 20.1. Магнітне коло машини постійного струму

З урахуванням прийнятих допущень закон повного струму для замкнутої силової лінії основного магнітного потоку записується так:

$$H_{я}2L_{я} + H_m2h_m + H_{\delta} 2\delta + H_z 2h_z + H_a 2L_a = 2I_3W_3, \quad (20.2)$$

де $H_{я}$, H_m , H_{δ} , H_z , H_a - напруженість магнітного поля уздовж силової лінії на відповідних ділянках магнітного кола; I_3W_3 - повний струм, що охоплюється силовою лінією і представляє МРС збудження, з розрахунку на один полюс.

У лівій частині приведенного рівняння представлені МРС окремих ділянок магнітного кола машини. У правій частині представлена МРС збудження.

Тому в загальному вигляді це рівняння з розрахунку на один полюс має вигляд:

$$F_{я} + F_m + F_{\delta} + F_z + F_a = F_3. \quad (20.3)$$

Використовуючи це рівняння, розрахунок магнітного кола машини постійного струму виконується у такій послідовності:

1. По заданій величині номінальної напруги визначається необхідне значення ЕРС обмотки якоря.

$$E_a = U_n \pm \Delta U, \quad (20.4)$$

де $\Delta U \approx 10 \text{ В}$ - спад напруги в колі якоря; "+" - для генератора; "-" - для двигуна.

2. За значенням ЕРС E_a обмотки якоря знаходиться необхідне значення основного магнітного потоку Φ_0 . З огляду на те, що:

$$E_a = c_e \cdot n_n \cdot \Phi_0 \quad \rightarrow \quad \Phi_0 = E_a / (c_e n_n),$$

де n_n - номінальна частота обертання машини (об/с).

3. За знайденим значенням Φ_0 розраховується значення індукції в поперечному перерізі кожної з ділянок магнітного кола.

$$B_j = \Phi / C_j,$$

де C_j - поперечний переріз відповідної ділянки.

4. За значенням індукції B_j розраховується напруженість магнітного поля уздовж силової лінії на кожній з ділянок H_j . На ділянках по сталі, напруженість розраховується з використанням кривої намагнічування сталі.

5. Використовуючи попередній ескіз магнітного кола машини, визначається середня довжина магнітної силової лінії на кожній з ділянок L_j і розраховується МРС для кожної з ділянок магнітного кола:

$$H_j = H_j L_j. \quad (20.7)$$

6. Підсумовуючи МРС ділянок магнітного кола, розраховуємо необхідне значення МРС збудження, тобто:

$$F_{\gamma} + F_m + F_{\delta} + F_z + F_a = F_3. \quad (20.8)$$

За значенням МРС збудження визначається необхідне значення струму збудження I_3 і число витків обмотки збудження W_3 , з огляду на $F_3 = I_3 W_3$.

Після цього виконується розміщення обмотки збудження на полюсі з використанням попереднього ескізу магнітного кола.

Якщо обмотка збудження не розміщається, чи навпроти, у міжполюсному просторі багато вільного місця, то ескіз коректується, і розрахунок у приведеному порядку повторюється. Таким чином, *розрахунок* магнітного кола машини виконується методом послідовного наближення.

Розглядаючи порядок розрахунку магнітного кола, було встановлено, що Φ_0 розраховується відповідно до значення U_n .

Якщо взяти частки цього потоку ($0,25\Phi_0$; $0,5\Phi_0$; $0,75\Phi_0$; $1,0\Phi_0$; $1,25\Phi_0$). і для кожної з цих часток, розглянутим вище способом, визначити F_3 , одержимо залежність $\Phi_0 = f(F_3)$, що називається *кривою намагнічування машини*.

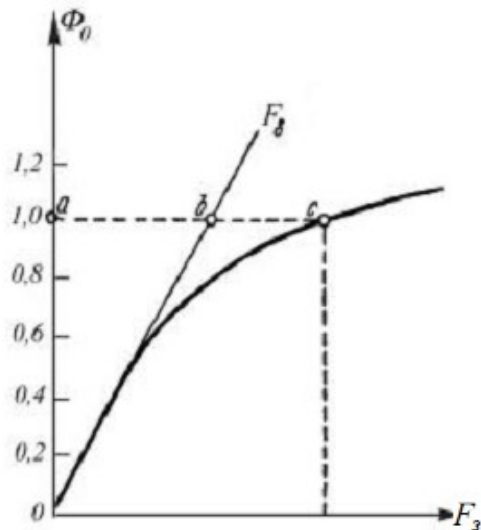
У початковій частині крива намагнічування має характер прямої лінії. Це пояснюється тим, що при малих значеннях потоку Φ_0 . сталь машини слабо насичена і МРС витрачається на проведення потоку практично тільки через зазор, тобто середовище з постійною магнітною проникністю. Продовживши прямолінійну частину кривої, ми одержимо залежність МРС зазору від потоку Φ_0 ., зображену на мал. 20.2 прямою ob .

В міру збільшення потоку Φ_0 . усе більша частина МРС витрачається на проведення потоку по сталі. Ця частина МРС визначається відрізком bc . По відношенню відрізків bc і ab можна судити про ступінь насичення сталі при заданому значенні потоку Φ_0 .

Ступінь насичення магнітного кола оцінюється коефіцієнтом насичення:

$$K_{\mu} = ac/ab, \quad \text{як правило } K_{\mu} = 1,2 - 1,35.$$

Змінюючи величину індукції в окремих ділянках кола, а отже, і ступінь їхнього насичення, можна змінити вид кривої намагнічування.



Мал. 20.2. Залежності $\Phi_0 = f(F_3)$

2. Магнітне коло машини постійного струму при навантаженні

А. Фізична картина магнітного поля в машині, що працює під навантаженням. Реакція якоря

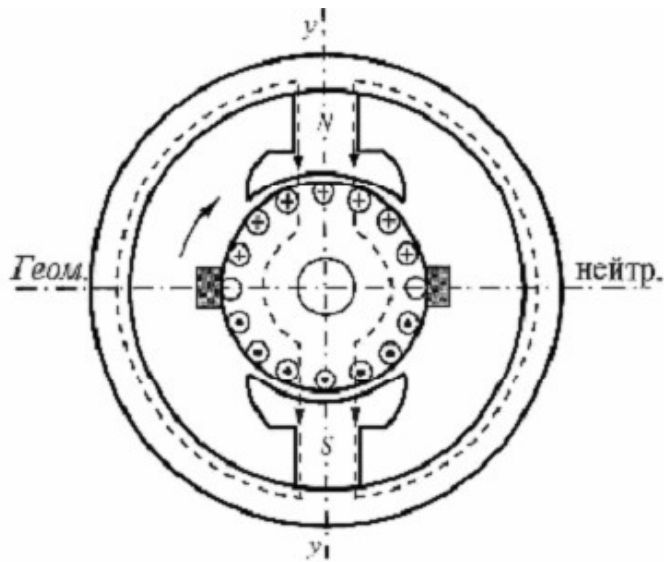
Основний магнітний потік Φ_0 . Як відзначалося, при холостому ході машини постійного струму, струм обмотки якоря $I_a = 0$ й в магнітному колі існує поле, створене тільки обмоткою збудження, якщо $I_3 > 0$.

Фізична картина магнітних силових ліній поля збудження на двополюсній моделі представлена на мал. 20.3. де поверхня якоря і поверхня колектора умовно сполучені. Вісь, що проходить в міжполюсному просторі головних полюсів, називається геометричною нейтраллю.

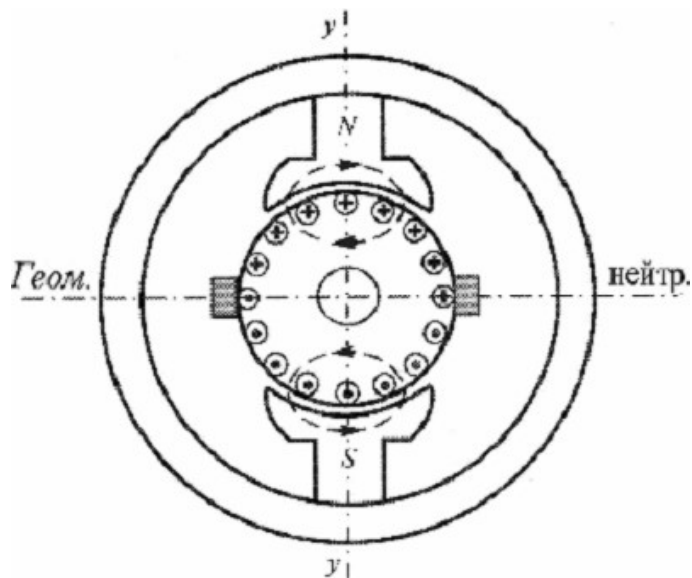
Розподіл основного магнітного потоку має симетричний характер як щодо осьової лінії $y-y$ і основних полюсів, так і щодо геометричної нейтралі, що займає незмінне положення в просторі.

При обертанні якоря за годинниковою стрілкою в обмотці якоря наводиться ЕРС у напрямках, показаних на мал. 20.3 крапками і хрестиками.

Потік якоря Φ_a . Припустимо, що машина не збуджена і якір нерухомий ($I_3 = 0$ і $n = 0$). Щітки поставимо по геометричній нейтралі і підведемо до них струм від якого-небудь стороннього джерела постійного струму, наприклад, акумуляторної батареї, у такому напрямку, щоб напрямок струмів у гілках обмотки збігся з напрямком ЕРС на мал. 20.3. Поле навколо провідників розташовується з ним концентрично, і, напрямок магнітних силових ліній визначається за правилом буравчика (мал. 20.4).



Мал. 20.3. Поле основних полюсів (знаки "+" і "•" визначають напрямок ЕРС, що наводиться в якорі).



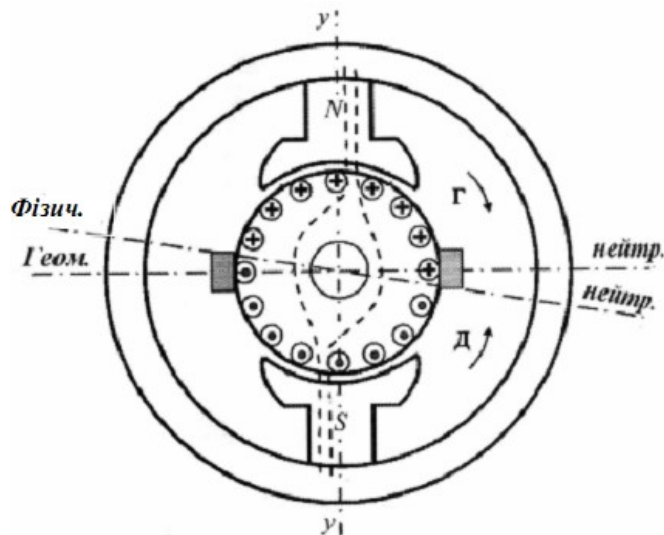
Мал. 20.4. Поле якоря (знаки "+" і "•" визначають напрямок струму в обмотці якоря).

З мал. 20.4 випливає, що при установці щіток на геометричній нейтралі, магнітні силові лінії поля якоря йдуть впоперек осі головних полюсів.

В реальній машині постійного струму, що працює під навантаженням, існує результуюче магнітне поле, утворене в результаті взаємодії поля збудження з полем обмотки якоря.

Картину магнітних силових ліній цього результуючого поля одержуємо накладенням на поле збудження поля обмотки якоря.

З картини силових ліній результуючого поля видно, що поле обмотки якоря впливає на поле збудження. Цей **вплив** називається **реакцією якоря**. Відповідно, поле обмотки якоря називається полем реакції якоря, як і в синхронних машинах.



Мал. 20.4. Результуюче поле якоря

При установці щіток на геометричній нейтралі, силові лінії поля реакції якоря йдуть впоперек осі головних полюсів. Тому реакція якоря в даному випадку називається **поперечною**.

Під дією поперечної реакції якоря нейтральна лінія поля машини зміщується з геометричної нейтралі в положення **фізичної нейтралі**.

Фізична нейтраль проходить через такі дві точки на поверхні якоря, в яких провідники обмотки якоря ковзають уздовж силових ліній, не перетинаючи їх.

У генератора **фізична нейтраль**, при роботі машини під навантаженням, зміщується з геометричної нейтралі **у напрямку обертання** якоря.

У двигуна - проти напрямку обертання.

Якщо змістити щітки з геометричної нейтралі на 90° , то силові лінії поля реакції якоря будуть розташовуватися уздовж осі головних полюсів, тобто реакція якоря буде повздовжньою.

Залежно від того, у яку сторону змістити щітки, повздовжня реакція якоря буде **розмагнічуючою** або **намагнічуючою**.

Ця реакція якоря не спотворює магнітне поле машини, тобто вона відповідно розмагнічує або підмагнічує поле збудження.

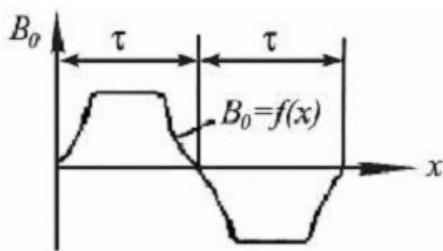
У тому випадку, коли щітки зміщені на кут менший 90° , то крім поперечної складової МРС виникає повздовжня складова МРС, що спрямована по осі полюсів. Якщо машина працює в генераторному режимі, то при зсуві щіток у напрямку обертання якоря повздовжня складова МРС діє зустрічно з МРС збудження, що послабляє основний магнітний потік машини. При зсуві щіток проти обертання

якоря генератора повздовжня складова МРС якоря діє узгоджено з МРС обмотки збудження, що викликає деяке підмагнічування машини і може з'явитися причиною іскріння на колекторі.

Б. Кількісне врахування реакції якоря машини постійного струму

При холостому ході машини постійного струму, коли в її магнітному колі існує лише поле збудження, розподіл індукції в повітряному зазорі машини на кожному полюсному поділу може бути представлений (мал. 20.5).

Крива $B_0 = f(x)$ не синусоїдальна, тому що магнітне коло машини трохи насичене.



Мал. 20.5. Крива розподілу магнітної індукції в повітряному зазорі (x - просторова координата уздовж окружності повітряного зазору.)

Коли машина постійного струму працює під навантаженням, в магнітному колі машини існує результуюче магнітне поле, утворене в результаті взаємодії поля обмотки збудження і поля реакції якоря.

Щоб одержати криву розподілу індукції результуючого магнітного поля $B_{рез} = f(x)$ необхідно знати розподіл індукції поля збудження $B_0 = f(x)$ і розподіл індукції поля реакції якоря $B_a = f(x)$.

Для того, щоб знайти криву розподілу індукції поля реакції якоря, розглянемо магнітне коло двополюсної машини постійного струму, яку представимо в розгорнутому виді (мал. 20.6).

Розглядаємо найбільш характерний випадок, коли щітки встановлені на геометричній нейтралі.

Представимо на мал. 20.6 замкнуту магнітну силову лінію поля реакції якоря, віддалену на відстань x від середини головного полюса.

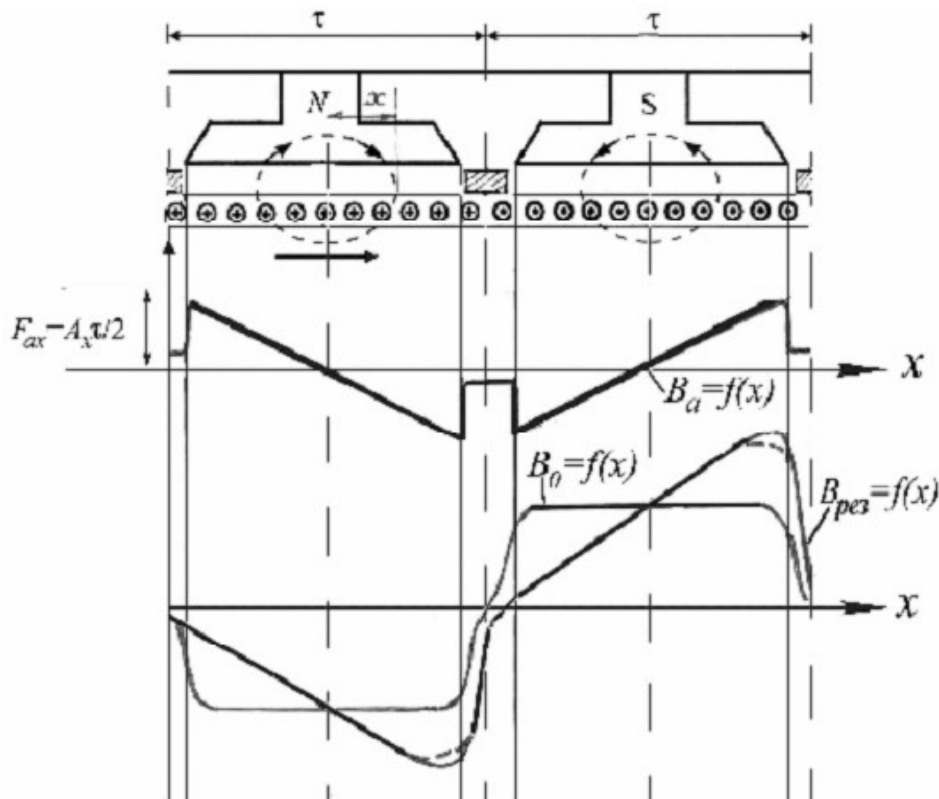
Для цієї замкнутої силової лінії:

$$\oint Hdl = \sum i \quad (20.9)$$

Розв'язати це рівняння в загальному вигляді для розглянутої силової лінії важко, тому що вона проходить в середовищах з різною магнітною проникністю. Приймаємо допущення, що магнітна проникність сталі $\mu_{cm} = \infty$, тоді напруженість магнітного поля уздовж силової лінії на ділянках по сталі $H_{cm} = 0$.

В цьому випадку, обходячи замкнуту силову лінію, враховуємо напруженість магнітного поля тільки в повітряному зазорі H_{δ} .

У межах наконечника головного полюса силові лінії в повітряному зазорі розподілені рівномірно. Тому можна прийняти, що $H_{\delta} = const$.



Мал. 20.6. Розподіл індукції результуючого поля.

При цьому закон повного струму для розглянутої силової лінії:

$$H_{\delta} 2\delta = A_a \cdot 2x, \quad (20.10)$$

тут $\delta = K_{\delta} \delta$ - розрахунковий повітряний зазор, що враховує збільшення магнітного опору полю реакції якоря, через наявність зубців і пазів на якорі ($K_{\delta} > 1$); $A_a = I_a N / (2a\pi D_a)$ - лінійне навантаження якоря, тобто величина, що характеризує скільки амперів проходить на 1 од. довжини зовнішньої окружності якоря; N - число провідників обмотки якоря; D_a - зовнішній діаметр якоря.

В правій частині приведенного виразу представлена МРС реакції якоря для ділянки довжини $2x$ по окружності якоря. Тому

$$F_{ax} = A_a \cdot 2x \text{ (ампер-провідників)}$$

$$F_{ax} = A_a x \text{ (ампер-витків)}$$

Залежність $F_{ax} = f(x)$ - лінійна:

$$\text{При } x = 0 \rightarrow F_{ax} = 0 ;$$

$$\text{При } x = z/2 \rightarrow F_{ax} = A_x \cdot \tau/2.$$

Знак F_{ax} - ординати приймаємо залежним від напрямку силової лінії поля реакції якоря.

Якби повітряний зазор між головним полюсом і якорем був рівномірним на всьому полюсному поділу τ , то індукція поля реакції якоря B_a розподілялася б по такому ж закону як МРС.

Однак, при виході в міжполюсний простір, повітряний зазор різко збільшується, тобто магнітний опір полю реакції якоря зростає.

З цієї причини B_a в області міжполюсного простору різко знижується.

Це враховуємо, розглядаючи залежність $B_a = f(x)$.

Якщо навантаження відсутнє, тобто машина працює в холосту, то в магнітному колі існує лише поле збудження, а індукція цього поля на кожному полюсному поділу розподіляється по кривій $B_0 = f(x)$.

В режимі роботи під навантаженням в магнітному колі машини постійного струму існує результуюче поле, що є результатом взаємодії полів збудження і реакції якоря.

Розподіл індукції цього поля $B_{рез} = f(x)$, знаходимо сумуванням ординат кривих $B_0 = f(x)$ і $B_a = f(x)$.

Крива $B_{рез} = f(x)$, відрізняється за формою від кривої $B_0 = f(x)$, тобто під впливом поперечної реакції, при установці щіток на геометричній нейтралі, магнітне поле в навантаженій машині спотворюється.

3. Комутація в машинах постійного струму

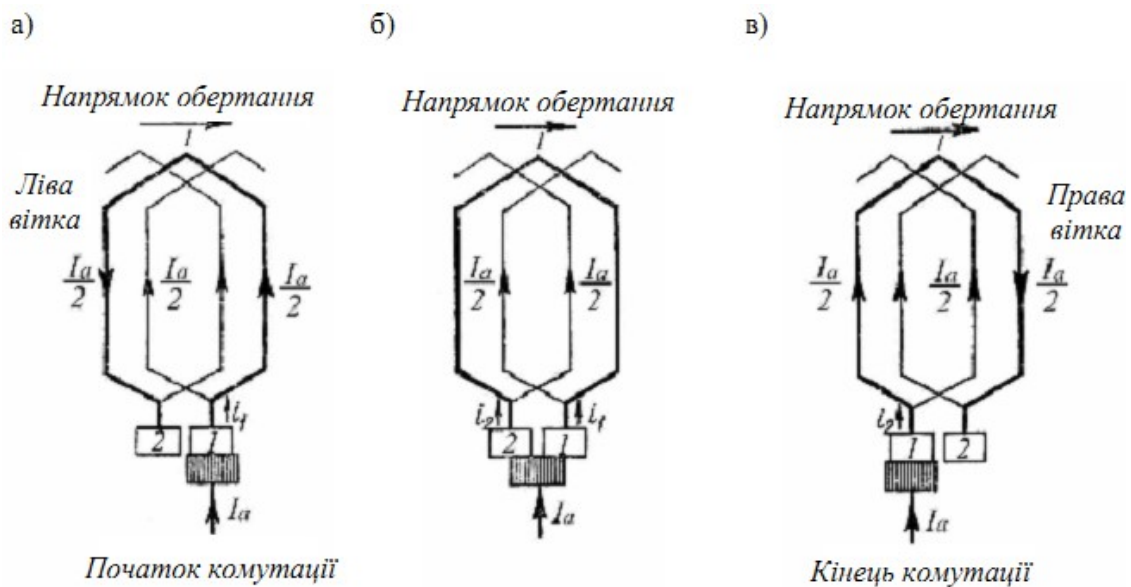
При обертанні якоря машини постійного струму колекторні пластини по черзі вступають в дотик зі щітками. При цьому перехід щітки з однієї пластини на іншу супроводжується перемиканням секції обмотки з однієї паралельної гілки в іншу і зміною струму в цій секції. *Процес зміни струму в секціях при перемиканні їх з*

однієї паралельної гілки в іншу називається **комутацією**. Секція, в якій відбувається комутація, називається **комутуючою секцією** а час, протягом якого відбувається процес комутації, називається **періодом комутації** T_k . Величина періоду комутації визначається відрізком часу, починаючи з моменту, коли колекторна пластина вступає в дотик зі щіткою, і до моменту, коли пластина цілком виходить із дотику з щіткою:

$$T_k = \frac{b_{щ}}{v_k} = \frac{60 b_{щ}}{kn b_k}$$

де k - число колекторних пластин; n - частота обертання якоря; $b_{щ}$ - ширина щітки; b_k - відстань між серединами сусідніх колекторних пластин (колекторний поділ).

Розглянемо процес комутації за умови, що щітки розташовані на геометричній нейтралі і що в комутуючій секції протягом усього періоду комутації не індукуються електрорушійні сили. Крім того, ширину щітки приймемо рівною колекторному поділу ($b_{щ} = b_k$).



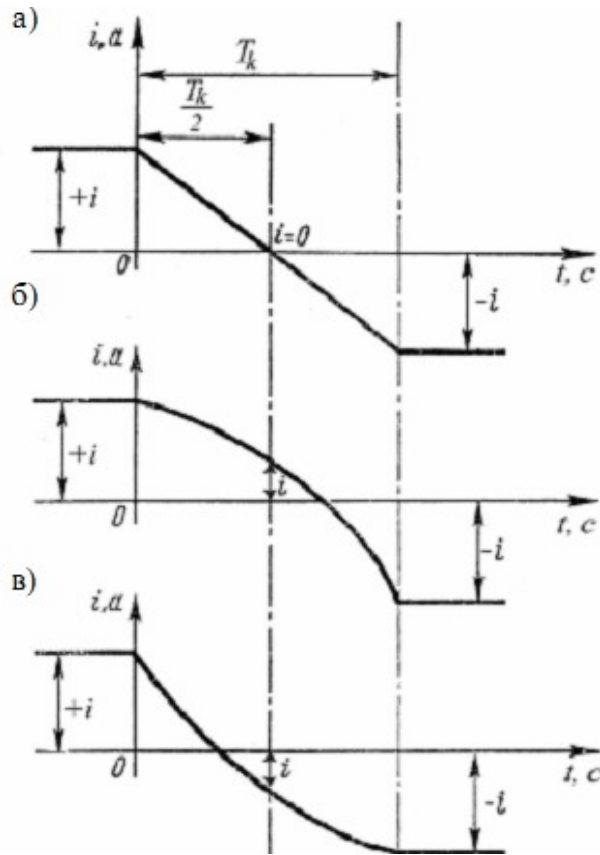
Мал. 21.1. Зміна напрямку струму в секції, що комутується

В початковий момент комутації (мал. 21.1, а) контактна поверхня щітки торкається лише пластини 1, а секція 1 (комутуюча секція) відноситься до лівої паралельної гілки обмотки і струм в ній $i = I_a/2$. Потім пластина 1 поступово збігає з щітки і на зміну їй набігає пластина 2. У результаті комутуюча секція виявляється замкнутою щіткою, і струм по ній поступово зменшується. Пояснюється це тим, що струми i_1 й i_2 в пластинах 1 і 2 зворотно пропорційні перехідним опорам $r_{щ1}$ (між

щіткою і пластиною 1, що збігає) $r_{ц2}$ і (між щіткою і пластиною 2, що набігає), що ж стосується струму i в секції, що комутує, то він дорівнює різниці струмів i_1 й i_2 .

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{r_{ц2}}{r_{ц1}},$$

В міру того як пластина 1 втрачає контакт із щіткою, зростає величина $r_{ц1}$ і тому зменшується струм i_1 .



Мал. 21.2. Графіки зміни струму в комутуючій секції

Одночасно щітка переходить на пластину 2, при цьому опір $r_{ц2}$ зменшується і струм i_2 збільшується. Коли ж контактна поверхня щітки рівномірно перекриває обидві колекторні пластини $r_{ц1} = r_{ц2}$ (рис. 21.1,б), струм в комутуючій секції стає рівним нулю, тому що $i_1 = i_2$ або $i_1 - i_2 = 0$. Наприкінці процесу комутації щітка цілком переходить на пластину 2 (мал. 21.1, в), а струм i в комутуючій секції знову досягає величини $I_a/2$. Однак по напрямку цей струм протилежний струму на початку комутації, а сама комутуюча секція тепер виявилася в правій паралельній гілці обмотки якоря.

Таким чином, за період комутації струм в комутуючій секції, змінюється від $+i$ до $-i$, а графік зміни струму являє собою пряму лінію (мал. 21.2, а). Таку комутацію називають **прямолінійною** або **ідеальною**.

Прямолінійна комутація є найбільш бажаним видом комутації, тому що вона не викликає в машині ніяких шкідливих наслідків. Густина струму під щіткою протягом усього періоду комутації залишається незмінною. Пояснюється це тим, що при прямолінійній комутації величина струму в контакті щітка - колекторна пластина змінюється пропорційно зміні площі цього контакту.

Однак в реальних умовах роботи машин постійного струму процес комутації проходить значно складніше. Справа в тому, що період комутації як правило дуже малий і приблизно складає 10^{-4} - 10^{-5} с. При такій швидкій зміні струму в комутуючій секції виникає значна ЕРС самоіндукції:

$$e_L = -L_s \frac{di}{dt},$$

де L_s - індуктивність секції; i - струм в комутуючій секції.

Як правило в кожному пазу якоря знаходяться кілька активних сторін (не менше двох), що належать різним секціям. При цьому всі ці секції знаходяться в стані комутації, будучи замкнутими різними щітками (мал. 21.3). При цьому варто врахувати, що як правило ширина щітки більша колекторного поділу ($b_{щ} > b_k$) і кожна щітка замикає одночасно кілька секцій.

Тому що сторони комутуючих секцій лежать в одних пазах, то змінний магнітний потік кожної із цих сторін наводить в других **ЕРС взаємоіндукції**:

$$e_M = -M_s \frac{di}{dt},$$

де M_s - взаємна індуктивність секцій, що одночасно комутують.

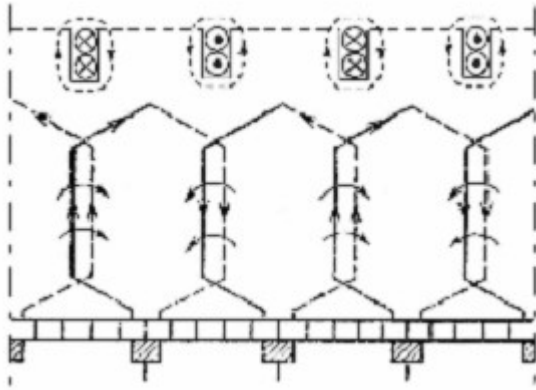
Обидві ЕРС створюють в комутуючій секції результуючу ЕРС:

$$e_p = e_L + e_M,$$

що перешкоджає зміні струму в секції, яка комутує, і тому називається *реактивною*. Крім того, під впливом реакції якоря магнітна індукція в зоні комутації (на геометричній нейтралі) здобуває деяке значення B_k (див. мал. 20.6), під дією якої в комутуючій секції наводиться ЕРС зовнішнього поля:

$$e_k = B_k 2lw_s v, \quad (21.4)$$

де l - довжина активних сторін секції; v - лінійна швидкість руху секції; w_s - число витків в секції.



Мал. 21.3. До поняття про ЕРС взаємоіндукції.

Таким чином, в комутуючій секції наводиться ЕРС зовнішнього поля

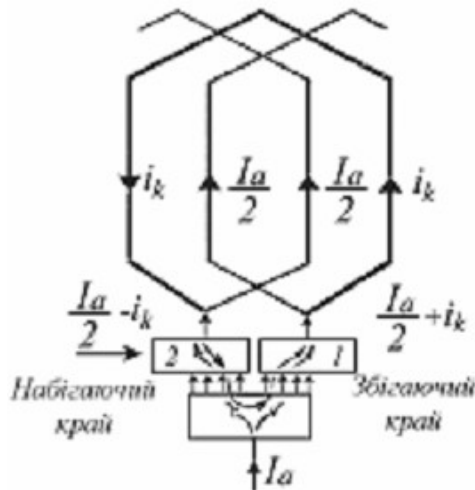
$$\Sigma e = e_p + e_k.$$

Якщо машина не має додаткових полюсів, то ЕРС e_p і e_k спрямовані в одну сторону і створюють в комутуючій секції **додатковий струм комутації** i_k такого ж напрямку, що і робочий струм цієї секції i в початковий період комутації (мал. 21.1, а). Така взаємодія струмів i_k і i призводить до того, що зміна струму в комутуючій секції затримується.

Уповільнена дія струму комутації пояснюється тим, що цей струм створюється, головним чином, реактивною ЕРС, що, як відомо, своєю дією перешкоджає зміні струму в електричному колі. Тому в момент рівномірного перекриття щіткою пластин 1 і 2 струм в комутуючій секції не досягає нульового значення, як це відбувається при ідеальній комутації. Струм у секції, що комутує, досягає нульового значення в другому напівперіоді комутації, тобто комутація стає **криволінійною сповільненою**. Графік комутації представлений на мал. 21.2,б.

Як по величині, так і по напрямку ЕРС e_k залежить від положення щіток відносно нейтралі: при положенні щіток на фізичній нейтралі $e_k = 0$, при зсуві щіток з нейтралі в одну сторону, під полюс однієї полярності - ЕРС e_k має один знак, а при зсуві в іншу, під полюс другої полярності - іншої. Отже, в одному випадку ЕРС e_k може бути спрямована узгоджено з ЕРС e_p а в іншому - зустрічно, тому що ЕРС e_p завжди сповільнює комутацію. В першому випадку дія ЕРС e_p ще підсилиться, і комутація струму буде ще більше сповільнена (мал. 21.2, б); в другому випадку ЕРС e_p і e_k будуть прагнути компенсуватися й умови комутації будуть поліпшуватися. При $e_p = e_k$ усе буде відбуватися так, ніби не було ні e_p ні e_k , тобто ми будемо мати **прямолінійну** комутацію.

Якщо ж, нарешті, e_k перевищить e_p , то комутація буде відбуватися по кривій мал. 21.2, в, тобто в цьому випадку вона буде *прискореною*. Струм i_k буде мати напрямок, зворотний тому, який він має на мал. 21.4, відповідно чому густина струму $j_{ц1}$ під збігаючим краєм щітки буде до визначеного моменту зменшуватися, а густина $j_{ц2}$ струму під набігаючим краєм щітки збільшується.



Мал. 21.4. Розподіл густини струму в контактї щітки при сповільненій комутації

При значних навантаженнях машини густина струму під збігаючим краєм щітки може досягти неприпустимо великих значень, викликати перегрівання щітки і стати причиною іскріння.

Однак досвід показує, що іскріння на колекторі виникає і при невеликих навантаженнях. Це свідчить про те, що головною причиною іскріння на колекторі є не збільшення густини струму під щіткою, а процес розмикання щіткою кола комутуючої короткозамкненої секції при виході збігаючої пластини колектора з-під щітки. В момент розмикання комутуючої секції з додатковим струмом комутації i_k накопичена в ній енергія магнітного поля

$$W_M = \frac{1}{2} L_s i_k^2$$

витрачається на створення електричної дуги між збігаючим краєм щітки і колекторною пластиною.

Зі збільшенням навантаження зростає величина струму в секціях і підсилюється реакція якоря. А це, як видно з виразів (21.2), (21.3) і (21.4), сприяє росту $\Sigma e = e_p + e_k$ збільшенню струму i_k , а, отже, веде до посилення іскріння.

4 Причини, що викликають іскріння на колекторі

Процес комутації струму якоря може супроводжуватися іскрінням щіток на колекторі. Це іскріння оцінюється по балах, тобто розрізняють іскріння в 1 бал; $1\frac{1}{4}$ - бала; $1\frac{1}{2}$ - бала; 2 бали; 3 бали. Ці бали встановлюються залежно від кількості точок іскріння на збігаючому краї щітки.

В машинах загальнопромислового призначення допускається іскріння в $1\frac{1}{2}$ бала і не більше, тому що при більшій величині іскріння знижується надійність роботи машини і різко скорочується термін її служби.

При роботі машини постійного струму щітки і колектор утворюють ковзаючий контакт. Площа контакту щіток вибирається по величині робочого струму машини, що приходиться на одну щітку, і за припустимим значенням густини струму для обраної марки щіток.

Якщо з якої-небудь причини щітка прилягає до колектора не всією поверхнею, а лише її частиною, то виникають надмірні місцеві густини струму, що приводять до появи іскріння на колекторі. Причиною виникнення надмірної густини струму може бути також збільшення струму в щітці.

Класична теорія комутації струму якоря розрізняє три причини іскріння щіток на колекторі:

- 3) Механічного характеру;
- 4) Потенційного характеру;
- 5) Електромагнітного (комутаційного) характеру.

Причини іскріння механічного характеру. До механічних причин відносяться: слабкий тиск щіток на колектор, неправильна конфігурація або негладка поверхня колектора, забруднення поверхні колектора, виступ ізоляції над колекторними пластинами, нещільне закріплення траверзи або пальців щіткотримачів, а також інші недоліки, що виникли в процесі експлуатації машини. При зазначених несправностях в окремі моменти часу порушується контакт щітки з колектором, що приводить до іскріння.

Причини іскріння потенційного характеру. Ці причини пояснюються тим, що між колекторними пластинами завжди існує різниця потенціалів. Ця різниця потенціалів визначається значенням ЕРС, що індукується в секції.

Миттєве значення цієї ЕРС визначається у такий спосіб:

$$e_c = 2B_x l v \quad (21.5)$$

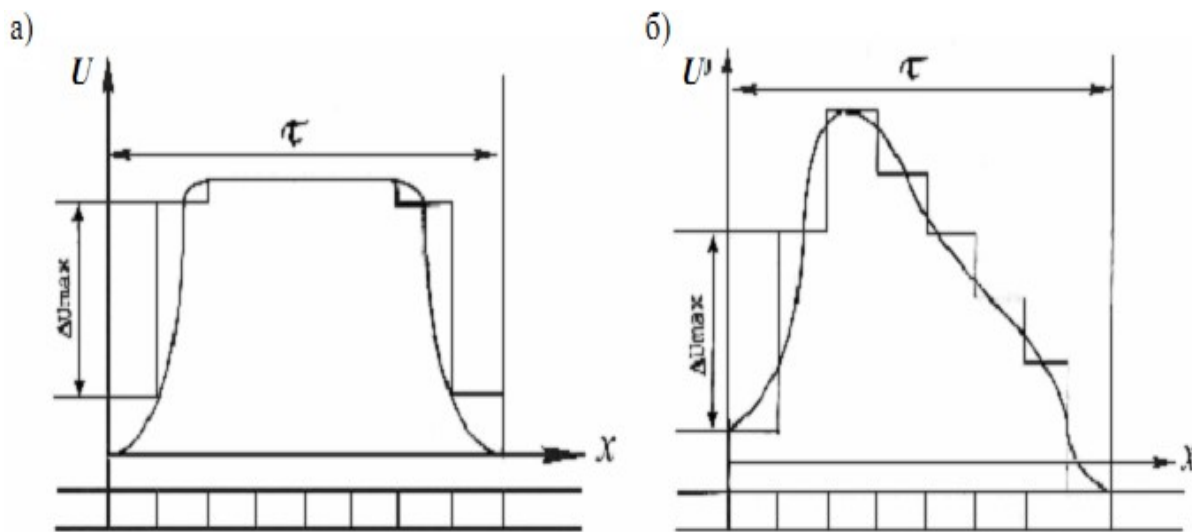
де B_x - індукція магнітного поля в місці розташування секції в даний момент часу; l - активна довжина сторони секції; v - лінійна швидкість переміщення секції відносно поля.

Якщо прийняти $l = const$, $v = const$, то $e_c \sim B_x$.

Звідси висновок, що розподіл потенціалу колекторних пластин по окружності колектора відбувається по такому ж закону, як і закон розподілу індукції в повітряному зазорі машини на кожному полюсному поділу. Але це справедливо при числі колекторних пластин рівному нескінченності.

При кінцевому числі пластин, крива розподілу індукції є середньою кривою для закону розподілу потенціалів по окружності колектора.

Раніше було встановлено, що розподіл індукції в повітряному зазорі машини на полюсному поділу залежить від режиму роботи машини.



Мал. 21.5. Криві розподілу потенціалу по колектору машини постійного струму в режимі холостого ходу (а) і під навантаженням (б)

При побудові кривої розподілу потенціалу по колектору враховуємо, що кожна колекторна пластина є провідником і тому здобуває однаковий потенціал

Як випливає з малюнка, дійсний розподіл потенціалу по окружності колектора представляє ламану лінію.

Найбільшу небезпеку представляє максимальна різниця потенціалів між якимись сусідніми колекторними пластинами - ΔU_{max} .

Досвід експлуатації машин постійного струму показав, що в машинах загальнопромислового призначення ця максимальна різниця потенціалу не повинна перевищувати: 35 - 60 В у машинах до 100 кВт;

30 - 35 В у машинах від 100 до 1000 кВт;

25 - 30 В у машинах понад 1000 кВт.

Якщо різниця потенціалів між сусідніми колекторними пластинами перевищить зазначені значення, між цими пластинами з'явиться стійко палаюча електрична дуга.

В результаті обертання колектора і через наявність вугільного пилю на його поверхні, дуга може бути розтягнута, в результаті виникає коловий вогонь по колектору. Він приводить до аварії машини постійного струму, тому що вигорає ізоляція між колекторними пластинами, відпаюються секції від колектора і т.д.

Причини іскріння щіток потенційного характеру в колекторній машині усунути не можна, тому що завжди між колекторними пластинами існує різниця потенціалів. Але поліпшити потенційні умови на колекторі можна.

Причини іскріння електромагнітного характеру. Вони викликаються фізичними процесами, що відбуваються в машині при переході секцій обмотки якоря з однієї паралельної вітки в іншу. Докладно ці процеси розглянуті в параграфі 21.1.

5. Основні способи покращення комутації

Основна причина незадовільної комутації в машинах постійного струму - додатковий струм комутації

$$i_k = \sum e / \sum r_k.$$

Тут $\sum r_k$ - сума електричних опорів додатковому струму комутації i_k : опір секції, опір місць пайки в півниках, опір перехідного контакту між колекторними пластинами і щіткою і, нарешті, опір щітки.

Однак з перерахованих опорів, що входять в $\sum r_k$ найбільше значення має опір щітки і перехідного контакту, тому, позначивши їх $r_{щ}$, з деяким наближенням можна записати

$$i_k = \sum e / r_{щ}.$$

З отриманого виразу випливає, що зменшити струм i_k , а, отже, поліпшити комутацію, можна або збільшенням опору $r_{ц}$, або зменшенням сумарної ЕРС Σe в комутуючій секції. Звідси випливає ряд способів поліпшення комутації, основні з яких розглянуті нижче.

Вибір щіток. З погляду забезпечення задовільної комутації доцільно застосовувати тверді щітки (вугільно-графітні, графітні і електрографітовані), тому що вони забезпечують найбільшу величину перехідного опору. Однак припустима густина струму в щітковому контакті цих щіток невелика, а тому їхнє застосування в машинах постійного струму веде до необхідності збільшення площі щіткового контакту, що вимагає збільшення площі колектора за рахунок його довжини. Це привело б до збільшення габаритів машини і додатковій витраті міді. Тому щітки з великим $r_{ц}$ застосовують переважно в машинах з відносно високою напругою, а отже, з невеликим робочим струмом.

Найбільше застосування в машинах постійного струму напругою 110-440 В мають електрографітовані щітки, а в машинах зниженої напруги (до 30 В) - мідно-чи бронзово-графітні.

Зменшення реактивної ЕРС. Істотний вплив на сумарну ЕРС в комутуючій секції робить реактивна ЕРС $e_p = e_L + e_M$. ЕРС взаємоіндукції e_M в значній мірі залежить від ширини щітки: чим ширше щітка, тим більше число колекторних пластин перекриває вона одночасно, а отже, тим більше секцій одночасно комутується, що викликає підвищення ЕРС взаємоіндукції e_M . Однак занадто вузькі щітки також небажані через недостатню механічну міцність, а також тому, що для створення необхідної площі контактної поверхні у вузькій щітці довелося б збільшити її довжину, а це привело б до необхідності збільшення довжини колектора. Найбільш доцільні щітки шириною в 2-3 колекторні поділи.

Помітний вплив на реактивну ЕРС робить тип обмотки якоря. Так, якщо обмотку якоря виконати з укороченими кроком ($y_1 < \tau$), то активні сторони секцій, що комутують одночасно виявляться в різних пазах, що буде сприяти зменшенню ЕРС взаємоіндукції.

Реактивна ЕРС може бути в значній мірі зменшена або навіть цілком усунута створенням в зоні комутації (по осі щіток) комутуючого поля визначеної полярності

і величини. Створюється таке поле додатковими полюсами або зсувом щіток з геометричної нейтралі.

Додаткові полюси. Призначення додаткових полюсів - створити в зоні комутації магнітне поле такої величини і напрямку, щоб ЕРС обертання e_k яка наводиться цим полем в комутуючій секції компенсувала реактивну ЕРС e_p . В машині постійного струму без додаткових полюсів ЕРС e_p і e_k спрямовані в одну сторону, тобто діють узгоджено

$$\Sigma e = e_p + e_k.$$

Сумарна ЕРС в комутуючій секції Σe буде рівною нулю, якщо за допомогою додаткових полюсів створити в зоні комутації магнітне поле e з магнітною індукцією B_k такої величини і напрямку, щоб ЕРС обертання e_k змінила свій напрямок на зворотній, а її значення було б рівним ЕРС реактивної e_p . В цьому випадку:

$$\Sigma e = e_p + e_k = 0$$

і комутація стає прямолінійною (ідеальною).

Додаткові полюси розташовують між головними. При цьому щітки встановлюють на геометричній нейтралі.

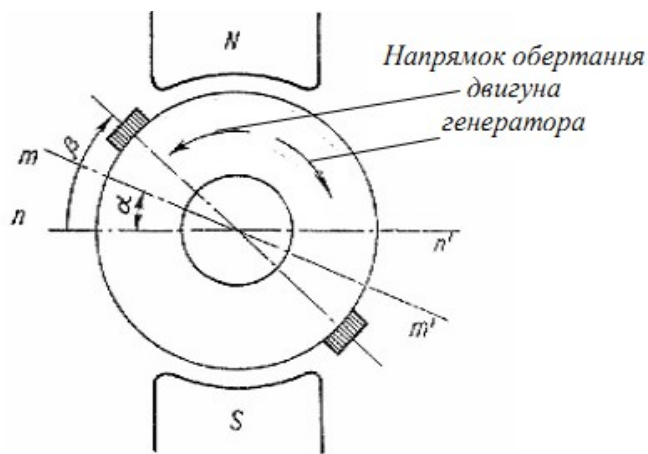
Усі машини постійного струму потужністю понад 1 кВт забезпечуються додатковими полюсами, число яких приймають рівним числу головних полюсів або удвічі меншим.

Як правило МРС додаткових полюсів $P_d = (1,15 - 1,30)P_a$, тобто на 15-30 % більше МРС якоря.

Отримання комутуючого поля зсувом щіток. В машинах постійного струму потужністю до 1 кВт, що виконуються без додаткових полюсів комутуюче поле в зоні комутації створюється зсувом щіток з геометричної нейтралі.

Якщо щітки встановлені на геометричній нейтралі, то поперечне магнітне комутуюче поле якоря з магнітною індукцією B_{aq} створює в зоні комутації індукцію B_k . В результаті в комутуючих секціях, що комутують наводиться ЕРС обертання e_k спрямована узгоджено з реактивною ЕРС e_p і сприяє уповільненій комутації. При зсуві щіток з геометричної нейтралі $n-n'$ на фізичну нейтраль $m-m'$ (мал. 21.6) комутуюче поле з індукцією B_k зникає і ЕРС обертання $e_k=0$. При цьому в

комутуючих секціях наводиться лише реактивна ЕРС e_p . Якщо ж щітки зсунути на кут β , тобто за фізичну нейтраль $m-m'$, то комутуюче поле, що комутує, з індукцією B'_k змінить свій напрямок відносно того, коли щітки знаходились на геометричній нейтралі. Це поле буде наводити в комутуючих секціях ЕРС обертання рівну реактивній ЕРС і протилежну їй по напрямку ($e_k - e_p = 0$), тобто реактивна ЕРС виявиться скомпенсованою і комутація стає прямолінійною (ідеальною). Для одержання необхідного ефекту щітки варто зміщати в напрямку обертання якоря в генераторів і проти обертання в двигунів.



Мал. 21.6. Зсув щіток з геометричної нейтралі

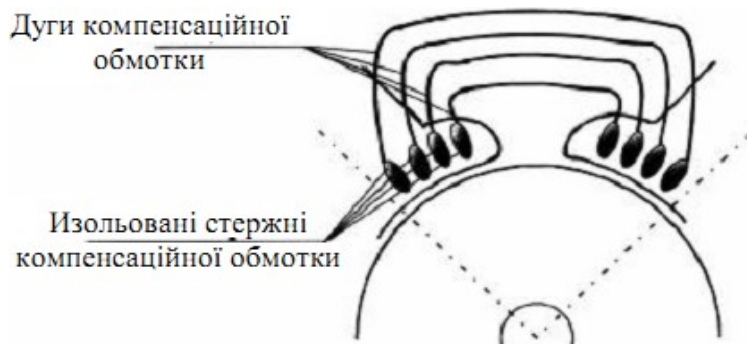
Компенсаційна обмотка. Додаткові полюси компенсують дію реакції якоря тільки в зоні комутації. Поза цією зоною реакція якоря продовжує спотворювати основне поле (мал. 21.5). Це приводить до різкої різниці між ЕРС, наведених в сусідніх секціях обмотки якоря, і відповідно до різкої різниці потенціалів між сусідніми пластинами колектора U_k . Як тільки U_k перевершить безпечну межу, між пластинами може виникнути дуга, що, розтягуючись, перекинеться на сусідню щітку іншої полярності і перекриє поверхню колектора.

Таке явище зветься *коловим вогнем*. Воно дуже небезпечне і часто тягне за собою важкі аварії машини.

Одним з ефективних засобів боротьби з коловим вогнем є компенсаційна обмотка, схематично показана на мал. 21.7.

В полюсні наконечники головних полюсів укладаються провідники (стержні), що з'єднуються за схемою, зазначеною на малюнку, і включаються послідовно з обмоткою якоря. Струм в компенсаційній обмотці повинен мати такий напрямок і таку величину, щоб МРС була спрямована назустріч МРС якоря і

дорівнювала їй по величині. В цих умовах усе відбувається так, ніби в машині зовсім не існує реакції якоря.



Мал. 21.7. Машина постійного струму з компенсаційною обмоткою.

Компенсаційна обмотка вимагає великої витрати міді, тому застосовується тільки в тих випадках, коли машина працює у важких умовах, - двигуни прокатних станів, генератори великої потужності і т.д.

Причини іскріння *механічного характеру* усуваються підвищенням культури виробництва й експлуатації машин постійного струму.

Контрольні запитання:

1. Які ділянки містить магнітне коло машини постійного струму?
2. У чому сутність явища реакції якоря машини постійного струму?
3. Чому МРС якоря, що діє по поперечній осі, викликає розмагнічування машини по подовжній осі?
4. Як враховується розмагнічуюча дія реакції якоря при розрахунку числа витків полюсної котушки обмотки збудження?
5. З якою метою компенсаційну обмотку включають послідовно з обмоткою якоря?
6. Чому зі збільшенням повітряного зазору послабляється вплив розмагнічуючої реакції якоря?
7. Які причини можуть викликати іскріння на колекторі?
8. Які ступені іскріння передбачені ДСТУ? Дайте кожній з них характеристику і вкажіть умови допустимості.
9. Чому прямолінійна комутація не супроводжується іскрінням?
10. Які причини, що викликають іскріння, виникають при уповільненій комутації?
11. Поясніть призначення і будову додаткових полюсів.
12. Які причини здатні викликати коловий вогонь по колектору?