

Семестр 6 навчальна дисципліна «Електричні машини»
галузь знань 14 – «Електрична інженерія»
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»

Підготував: доц. Ярошенко Леонід Вікторович

Лекція № 66

Тема: «Синхронні машини спеціального призначення»

ПЛАН

1. Синхронні машини з постійними магнітами;
2. Синхронні реактивні двигуни;
3. Гістерезисні двигуни;
4. Крокові двигуни;
5. Синхронний генератор з кіттеподібними полюсами і електромагнітним збудженням;
6. Індукторні синхронні машини.

1. Синхронні машини з постійними магнітами

Синхронні машини з постійними магнітами (магнітоелектричні) не мають обмотки збудження на роторі, а магнітний потік збудження них створюється постійними магнітами, розташованими на роторі. Статор цих машин звичайної конструкції з дво- або трифазною обмоткою.

Застосовують ці машини найчастіше в якості двигунів невеликої потужності. Синхронні генератори з постійними магнітами застосовують рідше, головним чином в якості автономно працюючих генераторів підвищеної частоти, малої та середньої потужності.

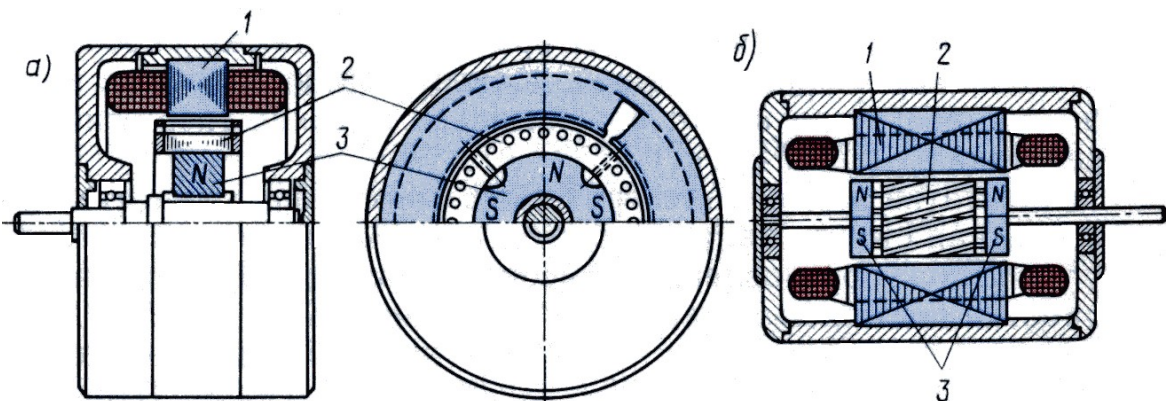
Синхронні магнітоелектричні двигуни. Ці двигуни набули поширення в двох конструктивних виконаннях: з радіальним і аксіальним розташуванням постійних магнітів.

При радіальному розташуванні постійних магнітів пакет ротора з пусковою кліткою, виконаний у вигляді порожнинного циліндра, закріплюють на зовнішній поверхні явно виражених полюсів постійного магніту 3. У циліндрі роблять міжполюсні прорізи, що запобігають замиканню потоку постійного магніту в цьому циліндрі (Мал. 23.1, а).

При аксіальному розташуванні магнітів конструкція ротора аналогічна конструкції ротора асинхронного короткозамкненого двигуна. До торців цього ротора притиснуті кільцеві постійні магніти (Мал. 23.1,б).

Конструкції з аксіальним розташуванням магніту застосовують у двигунах малого діаметра потужністю до 100 Вт; конструкції з радіальним розташуванням магнітів застосовують у двигунах більшого діаметру потужністю до 500 Вт і більше.

Фізичні процеси, що протікають при асинхронному пуску цих двигунів, мають деяку особливість, зумовлену тим, що магнітоелектричні двигуни запускають у збудженому стані. Поле постійного магніту в процесі розгону ротора наводить в обмотці статора ЕРС E_{III} , частота якої збільшується пропорційно частоті обертання ротора. Ця ЕРС наводить в обмотці статора струм, що взаємодіє з полем постійних магнітів і створює гальмівний момент M_m , спрямований зустрічно обертанню ротора.



1 - статор; 2 - короткозамкнений ротор; 3 - постійний магніт

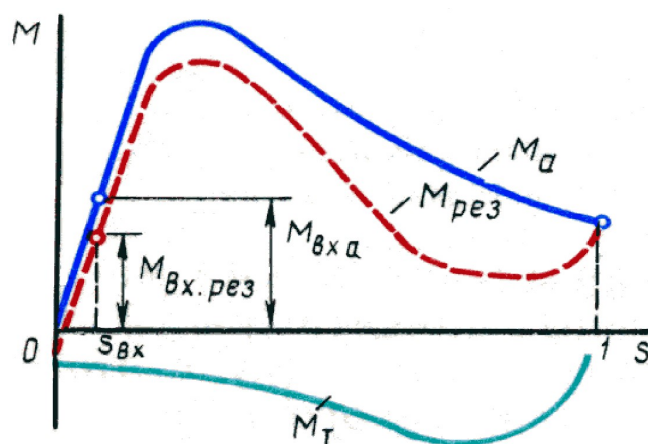
Мал. 23.1. Магнітоелектричні синхронні двигуни з радіальним (а) і аксіальним (б) розташуванням постійних магнітів:

Таким чином, при розгоні двигуна з постійними магнітами на його ротор діють два асинхронних моменти (Мал. 23.2): обертовий M_a (від струму I_I , що надходить в обмотку статора з мережі) і гальмівний M_m (від струму I_{III} , що наведений в обмотці статора полем постійного магніту).

Однак залежність цих моментів від частоти обертання ротора (ковзання) різна: максимум обертового моменту M_a відповідає значній частоті (невеликому ковзанню), а максимум гальмівного моменту M_m - малій

частоті обертання (великому ковзанню). Розгін ротора відбувається під дією результуючого моменту $M_{рез} = M_a + M_m$, який має значний «провал» в зоні малих частот обертання. З наведених на малюнку кривих видно, що вплив моменту M_m на пускові властивості двигуна, зокрема на момент входу в синхронізм $M_{вх}$, значний.

Для забезпечення надійного запуску двигуна необхідно, щоб мінімальний результуючий момент в асинхронному режимі $M_{рез}$ і момент входу в синхронізм $M_{вх}$ були більшими від моменту навантаження. Форма кривої асинхронного моменту магнітоелектричного двигуна значною мірою залежить від активного опору пускової клітини і від ступеня збудження двигуна, яка характеризується величиною $\zeta_{II} = (E_0/U_1) < 1$, де E_0 - ЕРС фази статора, що наведена в режимі холостого ходу при обертанні ротора з синхронною частотою. Зі збільшенням ζ_{II} «провал» в кривій моменту $M_{рез}$ збільшується.



Мал. 23.2. Графіки асинхронних моментів магнітоелектричного синхронного двигуна

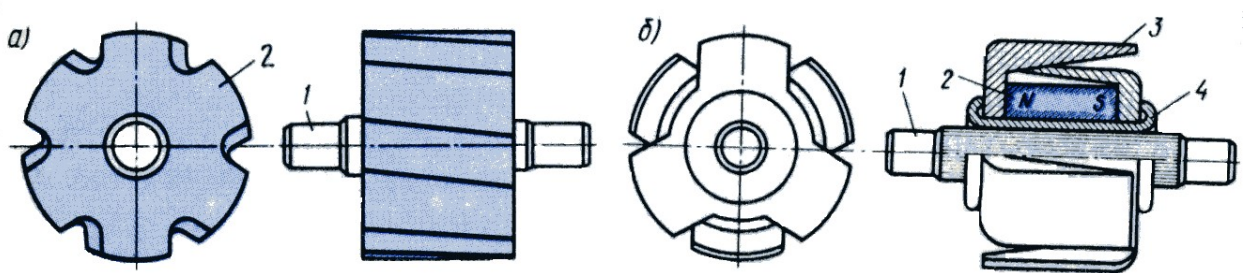
Електромагнітні процеси в магнітоелектричних синхронних двигунах в принципі аналогічні процесам в синхронних двигунах з електромагнітним збудженням. Однак необхідно мати на увазі, що постійні магніти в магнітоелектричних машинах схильні до розмагнічування дією магнітного потоку реакції якоря. Пускова обмотка дещо послаблює це розмагнічування, оскільки робить на постійні магніти екрануючу дію.

Позитивні властивості магнітоелектричних синхронних двигунів - підвищена стійкість роботи в синхронному режимі і рівномірність частоти

обертання, а також здатність синфазного обертання декількох двигунів, включених в одну мережу. Ці двигуни мають порівняно високі енергетичні показники (ККД і $\cos\varphi_1$).

Недоліки магнітоелектричних синхронних двигунів - підвищена вартість порівняно з синхронними двигунами інших типів, що зумовлена високою вартістю і складністю обробки постійних магнітів, які виготовляються зі сплавів, що мають велику коерцитивну силу (алні, алніко, магніко та ін.). Ці двигуни зазвичай виготовляють на невеликі потужності і застосовують у приладобудуванні і в пристроях автоматики для приводу механізмів, що вимагають сталості частоти обертання.

Синхронні магнітоелектричні генератори. Ротор такого генератора виконують при малій потужності у вигляді «зірочки» (Мал. 23.3, а), при середній потужності - з кігтеподібними полюсами і циліндричним постійним магнітом (Мал. 23.3,б). Ротор з кігтеподібними полюсами дає можливість отримати генератор з розсіюванням полюсів, що обмежує ударний струм при раптовому короткому замиканні генератора. Цей струм становить велику небезпеку для постійного магніту зважаючи на сильну розмагнічуючу дію.



1 - вал; 2 - постійний магніт; 3 - полюс; 4 - немагнітна втулка

Мал. 23.3. Ротори магнітоелектричних синхронних генераторів

Окрім недоліків, відзначених при розгляді магнітоелектричних синхронних двигунів, генератори з постійними магнітами мають ще один недолік, зумовлений відсутністю обмотки збудження, а тому регулювання напруги в магнітоелектричних генераторах практично неможливе. Це ускладнює стабілізацію напруги генератора при змінах навантаження.

2. Синхронні реактивні двигуни

Головна особливість синхронних реактивних двигунів (СРД) - відсутність у них збудження з боку ротора. Основний магнітний потік в цьому двигуні створюється винятково за рахунок МРС обмотки статора. У дво- і в трифазних СРД ця МРС є обертовою.

Для з'ясування принципу дії СРД звернемося до виразу електромагнітного моменту явнополюсної синхронної машини [див. (21.10)], з якого випливає, що якщо відключити обмотку збудження ($E_0 = 0$), то основна складова моменту стає рівною нулю і на ротор машини продовжує діяти лише реактивна складова моменту [див. (21.12)]

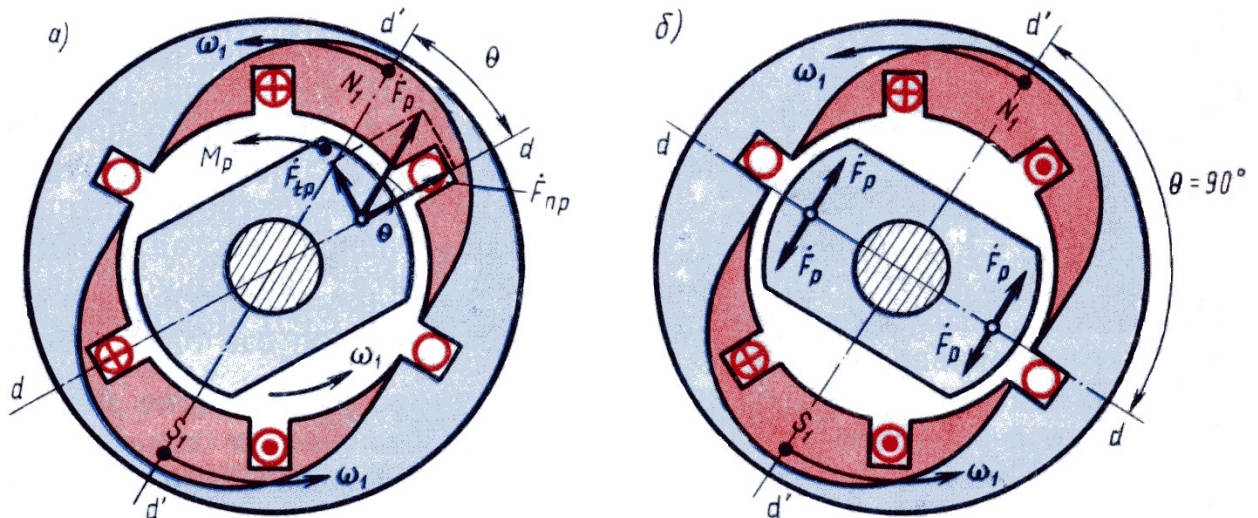
$$M_p = \frac{m_1 \cdot U_1^2}{2\omega_1} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta$$

Принцип дії СРД полягає в наступному. При включенні обмотки статора в мережу виникає обертове магнітне поле. Як тільки вісь цього поля $d' - d'$ займе положення в просторі розточки статора, при якому вона буде зміщена щодо поздовжньої осі не збуджених полюсів ротора $d - d$ на кут θ у бік обертання (Мал. 23.4, а), між полюсами цього поля і виступаючими полюсами не збудженого ротора виникне реактивна сила магнітного притягання полюса ротора до полюса обертового поля статора F_p . Вектор цієї сили F_p зміщений відносно поздовжньої осі ротора також на кут θ , тому сила F_p має дві складові: нормальну F_{np} , спрямовану по поздовжній осі ротора, і тангенціальну F_{tp} , спрямовану перпендикулярно до поздовжньої осі полюсів ротора. Сукупність тангенціальних складових реактивних сил F_{tp} на всіх полюсах не збудженого ротора утворить обертовий реактивний момент M_p , який буде обертати ротор з синхронною частотою ω_1 . З ростом механічного навантаження на вал СРД кут θ збільшується і момент M_p зростає.

Однак при значенні кута $\theta = 90^\circ$ реактивний момент $M_p = 0$. Така залежність моменту M_p від кута θ є принциповою для реактивного моменту, що відрізняє його від основної складової електромагнітного моменту $M_{осн}$ синхронного двигуна зі збудженим ротором (див. Мал. 22.2, графік 1), який

при $\theta = 90^\circ$ має максимальне значення. З Мал. 23.4,б видно, що при $\theta = 90^\circ$ реактивні сили магнітного притягання $F_{m,p}$, що діють на кожен полюс не збудженого ротора, взаємно врівноважуються і реактивний момент $M_p = 0$. Максимальне значення реактивного моменту M_{pmax} настає при значенні кута $\theta = 45^\circ$. Тому залежність реактивного моменту M_p від кута θ визначається виразом:

$$M_p = M_{pmax} \sin 2\theta. \quad (23.1)$$



Мал. 23.4. Принцип дії синхронного реактивного двигуна

Графічно ця залежність представлена кривою 2 на мал. 22.2. Неодмінна умова створення реактивного моменту M_p - явнополюсна конструкція ротора, оскільки, тільки в цьому випадку $x_q \neq x_d$.

Потужність СРД і створюваний ним момент менші, ніж у синхронного двигуна зі збудженими полюсами ротора. Пояснюється це тим, що у СРД через відсутність магнітного потоку ротора ЕРС $E_0 = 0$, тому основна складова електромагнітного моменту $M_{осн} = 0$ [див. (21.10)] і електромагнітний момент СРД визначається лише реактивною складовою ($M = M_p$). Тому при однакових габаритах синхронного двигуна зі збудженими полюсами ротора і СРД потужність на валу і створюваний момент у СРД набагато менші.

До недоліків СРД слід також віднести невисокі значення коефіцієнта потужності і ККД, через значний намагнічувальний струм статора, оскільки збудження СРД відбувається за рахунок магнітного поля статора.

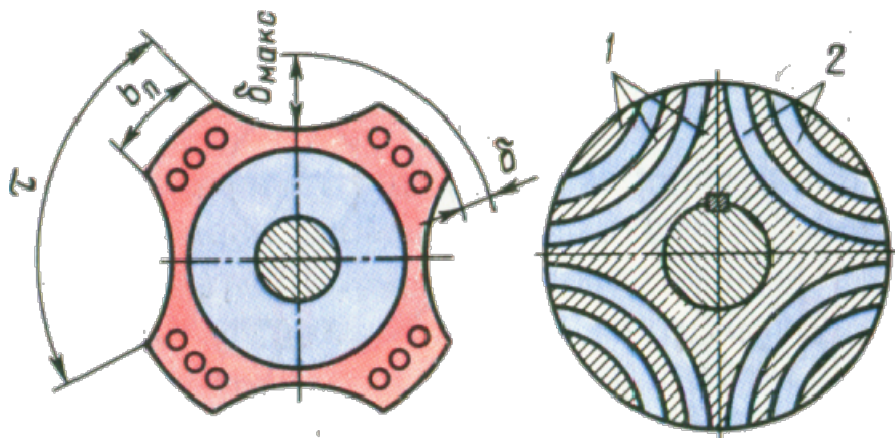
У СРД застосовують асинхронний пуск. Для цього ротор обладнують короткозамкненою пусковою кліткою. На мал. 23.5, а показана традиційна конструкція ротора СРД, що відрізняється від ротора асинхронного двигуна лише наявністю западин, що забезпечують ротору явнополюсну конструкцію. Чим більші ці западини, тим більше відношення x_d/x_q , а отже, і реактивний момент M_p . Проте зі збільшенням западин зростає середня величина повітряного зазору, що призводить до підвищення намагнічувального струму статора, а отже, до зниження енергетичних показників двигуна - коефіцієнта потужності і ККД. Окрім того, зі збільшенням западин зменшуються розміри пускової клітини, що веде до зменшення асинхронного моменту, отже до зменшення пускового моменту і моменту входу в синхронізм.

Найкращі результати дає таке співвідношення розмірів ротора:

$$b_{II}/\tau = 0,5 \div 0,6 \text{ та } \delta_{max}/\delta_{min} = 10 \div 12.$$

У цьому випадку вдається домогтися відношення $x_d/x_q \approx 2$.

Досконаліша секціонована конструкція ротора СРД, що являє собою циліндр, в якому сталеві смуги 2 залиті алюмінієм 1 (мал. 23.5,б). Така конструкція ротора дозволяє отримати відношення $x_d/x_q \approx 4 \div 5$. За рахунок цього істотно зростає момент M_{pmax} при збереженні намагнічувального струму на допустимому рівні.



Мал. 23.5. Конструкція роторів синхронного реактивного двигуна

На торцях секціонованого ротора є відлиті з алюмінію кільця, які замикають алюмінієві прошарки ротора, утворюючи короткозамкнуту пускову клітку.

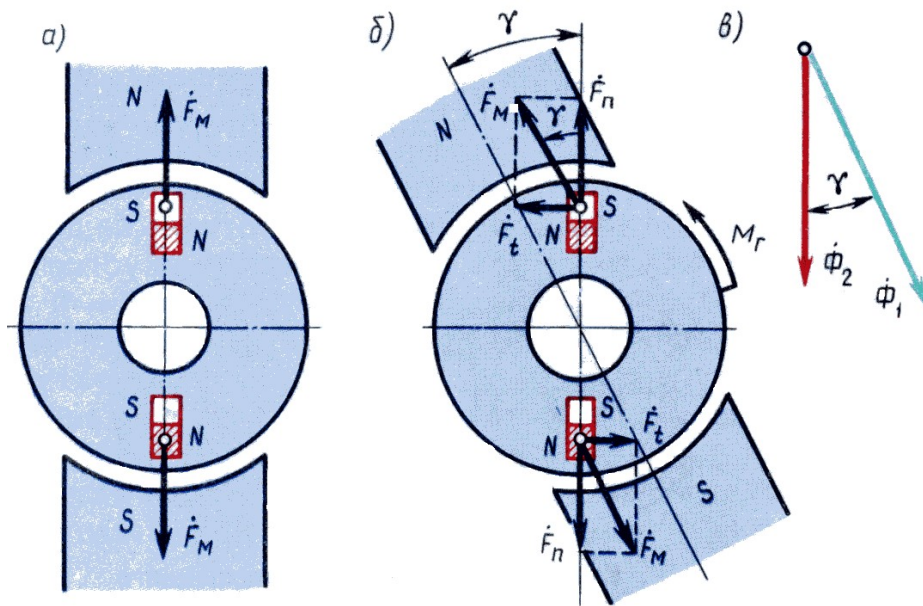
Простота конструкції і висока експлуатаційна надійність забезпечили СРД малої потужності широке застосування в пристроях автоматики для приводу самописних приладів, в пристроях звуко- та відеозапису та інших установках, що вимагають строгої сталості частоти обертання.

23.3 Гістерезисні двигуни

Робота гістерезисного двигуна заснована на дії гістерезисного моменту. На мал. 23.б, а показані два полюси постійного магніту (поле статора); між ними розташований циліндр (ротор) з магнітно-твердого матеріалу. Під дією зовнішнього магнітного поля ротор намагнічується. На стороні, зверненій до північного полюса постійного магніту, збуджується південний полюс, а на стороні ротора, зверненій до південного полюса постійного магніту, - північний полюс. На ротор починають діяти сили F_m , що спрямовані радіально до його поверхні. Якщо полюси постійного магніту обертають навколо ротора, то внаслідок явища магнітного запізнювання (гістерезису) активна частина ротора не буде перемагнічуватися одночасно зі зміною напрямку обертового магнітного поля і між віссю поля ротора і віссю зовнішнього поля з'явиться кут γ . Сили F_m , що діють на ротор, також змінять свій напрям на кут γ , а тангенціальні складові цих сил F_t , створять гістерезисний момент M_2 (Мал. 23.б, б).

Явище *магнітного запізнювання* полягає в тому, що частинки феромагнітного матеріалу (розміщеного у зовнішньому магнітному полі), що являють собою елементарні магніти, прагнуть орієнтуватися відповідно до напрямку зовнішнього поля. Якщо зовнішнє поле змінить свій напрямок, то елементарні частинки змінюють свою орієнтацію. Однак повороту елементарних частинок перешкоджають у магнітно-твердих матеріалах внутрішні сили молекулярного тертя. Для зміни напрямку цих частинок

необхідна певна МРС, внаслідок чого перемагнічування ротора дещо відстає від зміни напрямку зовнішнього поля. Це відставання (магнітне запізнювання) характеризується кутом гістерезисного зсуву γ між вектором магнітного потоку ротора Φ_2 і вектором магнітного потоку обмотки статора Φ_1 (мал. 23.6, в). Цей кут залежить винятково від магнітних властивостей матеріалу ротора.



Мал. 23.6. До поняття про гістерезисний момент

На подолання сил молекулярного тертя витрачається частина підведеної потужності, яка складає *втрати на гістерезис*. Величина цих втрат залежить від частоти перемагнічування ротора $f_2 = f_1 s$, а отже, від ковзання:

$$P_2 = s P_{2,к}, \quad (23.2)$$

де $P_{2,к}$ - втрати на гістерезис при нерухомому роторі (при $s = 1$), в режимі к. з.

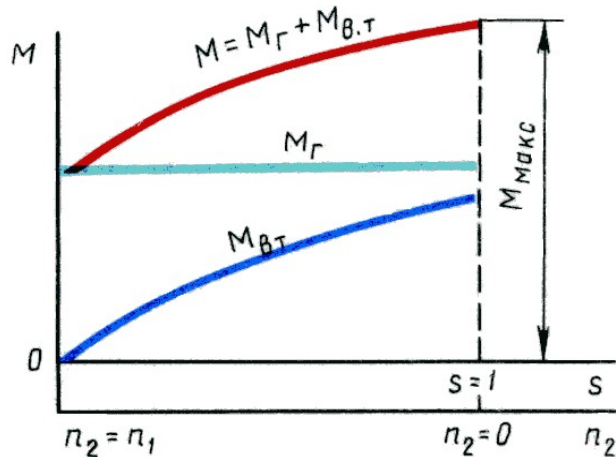
Оскільки електромагнітна потужність, що передається ротору, дорівнює відношенню втрат у роторі до ковзання [див. (13.5)]:

$$P_{ем} = P_2 / s = P_{2,к}, \quad (23.3)$$

а обертовий момент - електромагнітній потужності, поділений на синхронну кутову швидкість:

$$M_2 = P_{ем} / \omega_1 = P_{2,к} / \omega_1, \quad (23.4)$$

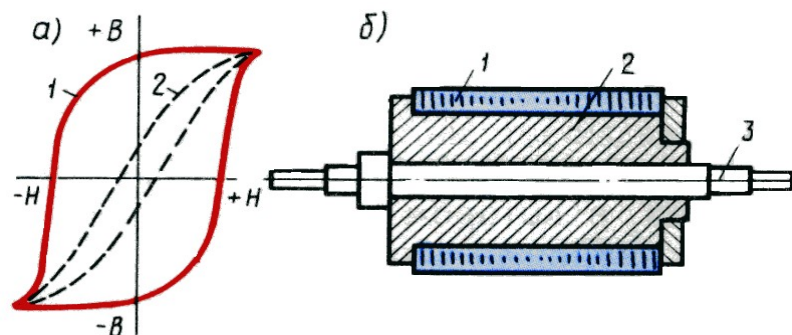
то, очевидно, величина гістерезисного моменту не залежить від частоти обертання ротора (ковзання). Графік $M_2 = f(s)$ являє собою пряму, паралельну осі абсцис (мал. 23.7).



Мал. 23.7. Механічні характеристики гістерезисного двигуна

Кут гістерезисного зсуву залежить від ширини петлі гістерезису: чим ширша петля гістерезису магнітного матеріалу, тим більший кут гістерезисного зсуву. На мал. 23.8, а представлені дві петлі гістерезису: звичайної сталі (крива 2) і сплаву вікаллою (крива 1).

Застосування звичайної сталі для виготовлення ротора не забезпечує гістерезисного моменту достатньої величини. Тільки магнітно-тверді матеріали, наприклад такі, як вікаллою, дають можливість отримати великий гістерезисний момент. Ротори гістерезисних двигунів зазвичай роблять збірними. Магнітно-тверда частина виконується у вигляді шихтованого або масивного кільця 1, розміщеного на втулці 2 (мал. 23.8,б). Остання жорстко посаджена на вал 3.



Мал. 23.8. Петлі гістерезису звичайної електротехнічної сталі і сплаву вікаллою (а) і будова збірного ротора гістерезисного двигуна (б)

У машинах з не шихтованим (масивним) ротором обертове поле статора наводить в роторі вихрові струми. У результаті взаємодії цих струмів з полем статора виникає електромагнітний момент $M_{в.м}$, значення якого пропорційне ковзанню:

$$M_{в.м} = sP_{в.м.к}/\omega_1, (23.5)$$

де $P_{в.м.к}$ - втрати на вихрові струми в роторі при $s = 1$, в режимі к. з., Вт; ω_1 - кутова синхронна швидкість, рад/с.

Найбільшого значення момент $M_{в.м}$ досягає при нерухомому роторі ($s = 1$), в момент пуску електродвигуна. Потім у міру зростання частоти обертання (зменшенні ковзання) момент $M_{в.м}$ зменшується (див. мал. 23.7), при синхронній частоті він стає рівним нулю.

Таким чином, електромагнітний момент, що обертає гістерезисного двигуна створюється спільною дією моментів від вихрових струмів $M_{в.м}$ і гістерезисного M_2 :

$$M = M_{в.м} + M_2 = sP_{в.м.к}/\omega_1 + P_{г.к}/\omega_1. (23.6)$$

На мал. 23.7 представлена залежність результуючого моменту гістерезисного двигуна від ковзання: $M = f(s)$. Характер цієї кривої залежить від співвідношення моментів $M_{в.м}$ і M_2 .

Гістерезисний двигун може працювати з синхронною і асинхронною частотами обертання. Однак робота двигуна в асинхронному режимі неекономічна, оскільки пов'язана зі значними втратами на перемагнічування ротора, величина яких зростає зі збільшенням ковзання.

Переваги гістерезисних двигунів - простота конструкції, безшумність і надійність у роботі, великий пусковий момент, плавність входу в синхронізм, порівняно високий ККД, мала зміна кратності струму від пуску до номінального навантаження ($I_{п}/I_{ном} = 1,3 \div 1,4$).

Недоліки гістерезисних двигунів - низький коефіцієнт потужності ($\cos\varphi_1 = 0,4 \div 0,5$) і порівняно висока вартість. Окрім того, при різких коливаннях навантаження гістерезисні двигуни схильні до гойдання, що створює нерівномірність ходу (обертання). Пояснюється це відсутністю у

гістерезисних двигунів пускової клітини, яка при різких змінах навантаження чинить на ротор заспокійливу (демпфуючу) дію. Найсильніші коливання спостерігаються у шихтованого ротора, в якому вихрові струми сильно обмежені. Викликана гойданнями нерівномірність обертання обмежує області застосування гістерезисних двигунів.

4. Крокові двигуни

Крокові (імпульсні) двигуни (КД) використовують зазвичай в якості виконавчих двигунів, що перетворюють електричні сигнали (імпульси напруги) в кутові або лінійні дискретні (стрибкоподібні) переміщення (кроки). Найбільшого застосування КД отримали в електроприводах з програмним управлінням.

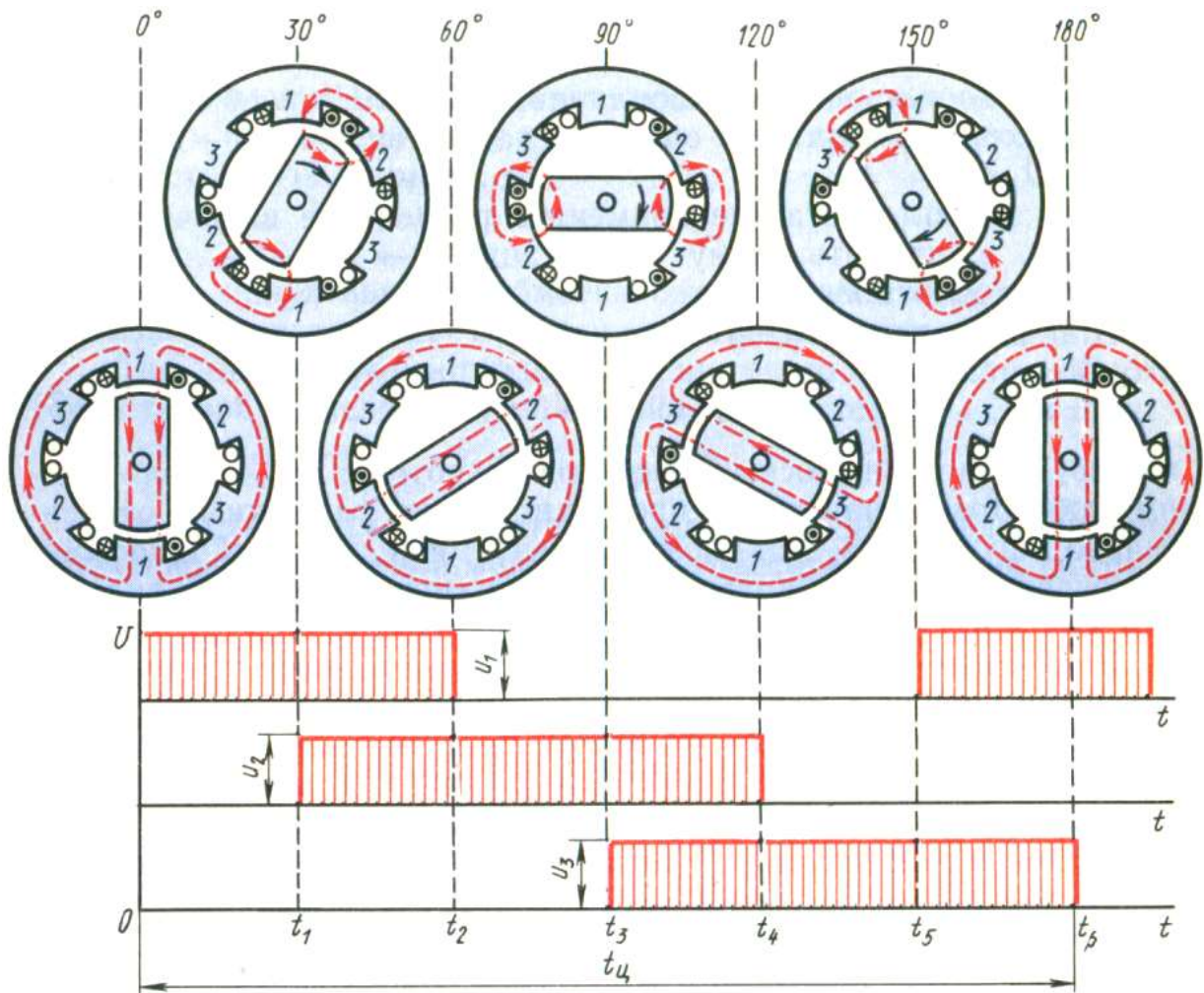
Розрізняють крокові двигуни з активним (збудженим) і реактивним ротором. Крокові двигуни з активним ротором мають обмотку збудження або виконані з постійними магнітами на роторі; крокові двигуни з реактивним ротором не мають обмотки збудження, а їх ротор виконують з магнітно-м'якого матеріалу. Обмотку управління КД зазвичай розташовують на статорі і роблять одно- або багатофазною (частіше трьох-або чотирьохфазною).

Розглянемо принцип дії крокової двигуна на прикладі реактивного трифазного КД, статор якого має шість явно виражених полюсів (по два полюси на фазу), а ротор - два полюси (мал. 23.9). При проходженні імпульсу струму у фазі 1 обмотки управління ротор займає положення, відповідне дії електромагнітних сил, отже по осі полюсів 1-1. В момент часу t_1 з'явиться імпульс струму у фазі 2. При цьому на ротор будуть діяти сили, зумовлені одночасним впливом двох МРС (полюсів 1-1 і 2-2). В результаті ротор повернеться за годинниковою стрілкою і займе положення, проміжне між полюсами 1-1 і 2-2, отже повернеться на крок $\alpha_k = 30^\circ$. У момент t_2 імпульс струму в фазі 1 припиниться і ротор, зробивши крок $\alpha_k = 30^\circ$, займе положення по осі полюсів 2-2. У момент t_3 з'явиться імпульс струму у фазі 3 і ротор, повернувшись ще на 30° , займе положення між полюсами статора 2-2 і

3-3. У моменти часу t_4 , t_5 та t_6 ротор також буде здійснювати кроки по 30° і в кінці циклу (момент t_6) займе положення по осі полюсів статора 1-1, зробивши за цей цикл поворот на 180° .

У наступні цикли, процеси в КД будуть повторюватися. Таким чином, розглянутий реактивний трифазний КД працює за шеститактною схемою комутації з роздільносумісним включенням фазних обмоток управління: $1 \rightarrow 12 \rightarrow 2 \rightarrow 23 \rightarrow 3 \rightarrow 31 \rightarrow \dots$

Працюють реактивні КД від однополярних імпульсів напруги, оскільки зміна полярності цих імпульсів не змінює напрямку реактивного моменту. Для зміни напрямку обертання ротора розглянутого КД необхідно змінити схему комутації обмоток, наприклад $1 \rightarrow 13 \rightarrow 3 \rightarrow 32 \rightarrow 2 \rightarrow 21$.



Якщо в цьому двигуні застосувати роздільне включення обмоток, отже прийняти схему комутації $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow \dots$, то крок двигуна $\alpha_k = 60^\circ$.

Крок двигуна (град)

$$\alpha_k = 360^\circ / (2p_2 m_y k). \quad (23.7)$$

де $2p_2$ - число полюсних виступів на роторі; m_y - число фазних обмоток управління, просторово зміщених одна відносно одної; k - коефіцієнт, що визначається способом включення фазних обмоток управління (при роздільному включенні $k = 1$, при роздільно-спільному - $k = 2$).

Зменшення кроку α_k сприяє підвищенню стійкості і точності роботи КД. Для зменшення кроку α_k збільшують число полюсних виступів на роторі $2p_2$. Так, якщо в розглянутому двигуні застосувати ротор хрестоподібного перетину ($2p_2 = 4$), то при шеститактній комутації крок $\alpha_k = 15^\circ$.

Крокові двигуни з активним ротором (з обмоткою збудження або постійними магнітами на роторі) дозволяють отримати великі значення обертового моменту, а також забезпечують фіксацію ротора при відсутності керуючого сигналу.

Один з важливих параметрів КД - частота прийомистості - максимальна частота проходження керуючих імпульсів, при якій ротор втягується в синхронізм з місця без втрати кроку. У крокових двигунів реактивного типу частота прийомистості при номінальному навантаженні досягає 1000-1300 Гц. Зі збільшенням кроку частота прийомистості зменшується. Кроковий двигун працює в комплекті з комутатором - пристроєм, що перетворює задану послідовність керуючих імпульсів в m -фазну систему прямокутних імпульсів напруги.

При розгляді принципу роботи крокового двигуна вплив навантажувального моменту на валу двигуна не враховувався. Якщо ж на вал крокового двигуна діє навантажувальний момент M_n , то при перемиканні керуючого імпульсу з однієї фази на іншу МРС статора повернеться на кут α_k , а ротор двигуна, повертаючись за вектором МРС, буде відставати від нього на кут $\Delta\theta_c$, що називають кутом статичної помилки крокового двигуна, ел. град:

$$\Delta\theta_c = \arcsin (M_n / M_{max}),$$

де M_{max} - максимальний статичний момент, що відповідає куту зміщення ротора щодо вектора МРС статора $\theta = 90$ ел. град.

Швидкодія крокових двигунів визначається швидкістю протікання електромагнітних процесів при перемиканні керуючих імпульсів напруги з однієї фази статора на іншу. Швидкість протікання цих процесів оцінюється електромагнітною постійною часу, с

$$T_e = L_\phi / r_\phi,$$

де L_ϕ - індуктивність обмотки однієї фази статора, Гн; r_ϕ - активний опір обмотки однієї фази статора, Ом.

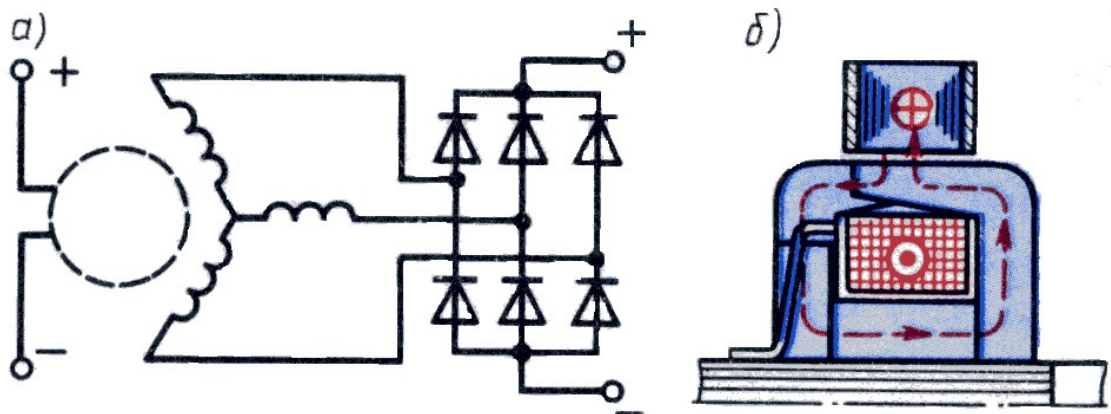
Для підвищення швидкодії крокового двигуна в обмотки фаз статора послідовно включають резистори $R_{\text{доп}}$, тоді:

$$T_e = L_\phi / (r_\phi + R_{\text{доп}}).$$

Енергетичним показником крокового двигуна є значення споживаної потужності P_l . Частота обертання крокового двигуна регулюється зміною частоти подачі керуючих імпульсів напруги на фази обмотки статора.

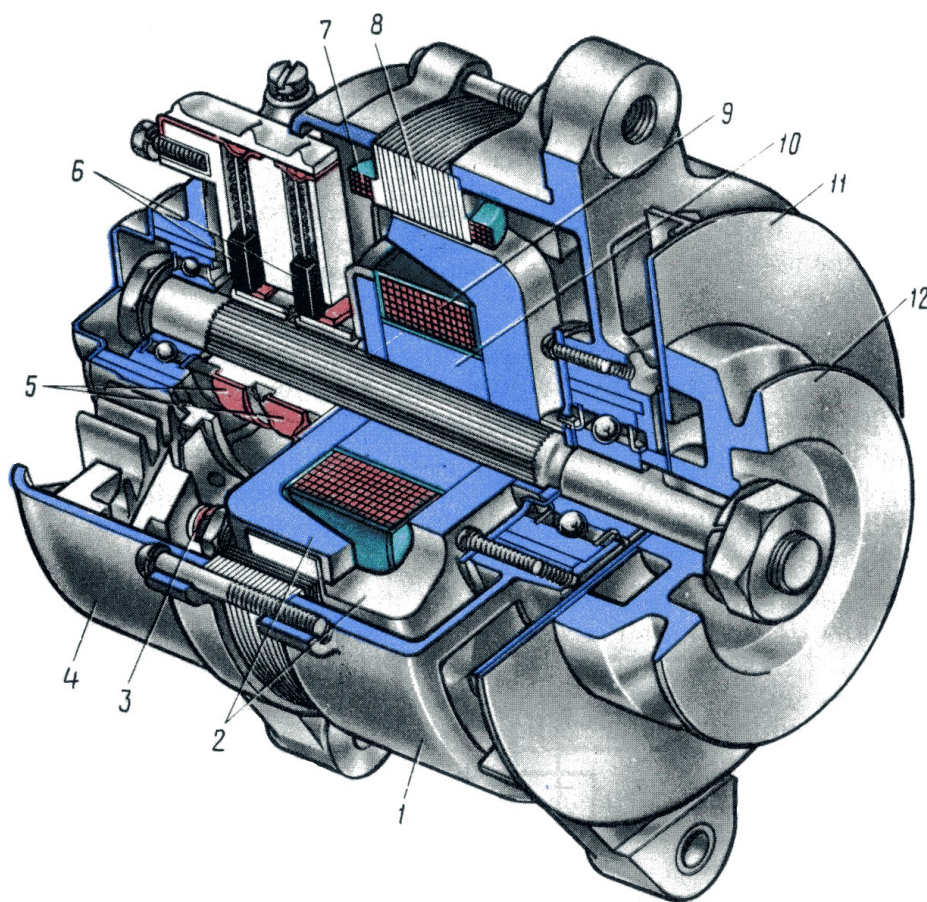
5. Синхронний генератор з кігтеподібними полюсами і електромагнітним збудженням

Такі синхронні генератори широко застосовуються в автотракторному електрообладнанні. На виході генератора включають напівпровідниковий випрямляч (мал. 23.10, а), тому генератор виконує функцію джерела постійного струму. Ротор генератора має конструкцію, аналогічну мал. 23.3, б, відрізняючись наявністю обмотки збудження замість постійного магніту.



Мал. 23.10. Принципова схема включення (а) і магнітна система синхронного генератора (б) з кігтеподібні полюсами

Кігтеподібна конструкція ротора дозволяє збудити багатополосний ротор з допомогою однієї котушки збудження, яка підключається до джерела постійного струму через контактні кільця і щітки. У такому роторі аксіально спрямований магнітний потік збудження змінює свій напрямок в повітряному зазорі і стає радіально спрямованим (мал. 23.10, б). Даний генератор відрізняється простотою конструкції, компактністю, надійністю і високою технологічністю. Остання перевага має важливе значення в умовах масового виробництва синхронних генераторів з кігтеподібними полюсами. Зазвичай ці генератори виготовляються невеликої потужності (менше 1 кВ·А). У схемі електрообладнання генератор включають паралельно з акумуляторною батареєю, і він працює з нею в буферному режимі, отже вони доповнюють один одного залежно від величини навантаження і частоти обертання приводного двигуна.



Мал. 23.11. Будова синхронного генератора з кігтеподібними полюсами

На мал. 23.11 показано будову автомобільного синхронного генератора типу Г-250. Статор 8 цього генератора являє собою шихтований пакет, на 18

зубцях якого розташовані котушки 7, що утворюють трифазну обмотку, з'єднану зіркою. Ротор складається з вала, на який напресовані дві сталеві шайби з відігнутими кігтеподібними полюсами 2 (по шість полюсів на кожній). На сталеву втулку 10 надіта циліндрична котушка збудження 9, кінці якої приєднані до контактних кілець 5. На кільця накладені мідно-графітові щітки 6. На задньому підшипниковому щиті 4 розташований випрямний блок із шести кремнієвих діодів 3, з'єднаних за мостовою схемою (див. мал. 23.10, а). Підшипникові щити 1 і 4 і осердя статора стягнуті трьома болтами. На валу генератора закріплені відцентровий вентилятор 11 і шків 12, за допомогою якого ротор генератора приводиться в обертання.

6. Індукторні синхронні машини

Деякі пристрої, наприклад установки індукційного нагрівання, гіроскопічні та радіолокаційні пристрої, вимагають для своєї роботи змінного струму підвищеної частоти у сотні і навіть тисячі герц. Отримання таких змінних струмів за допомогою синхронних генераторів звичайної конструкції пов'язане з нездоланими труднощами, оскільки пов'язане з необхідністю або збільшення частоти обертання понад 3000 об/хв, або надмірного збільшення числа полюсів, або одночасного застосування обох заходів. Однак збільшення частоти обертання призводить до зростання відцентрових зусиль у роторі до небезпечних значень, а збільшення числа полюсів призводить до такого зменшення полюсного поділу τ , при якому розміщення обмотки на статорі стає практично неможливим.

Для отримання змінного струму підвищеної частоти (до 30 кГц) застосовують індукторні генератори, особливістю яких є те, що за один період магнітний потік в них не змінює свого знака, як у звичайних синхронних генераторах, а лише змінюється від Φ_{max} до Φ_{min} значень, отже пульсує (мал. 23.12, а). Пульсуючий потік складається з двох складових: постійної Φ_{cp} і змінної Φ_{nep} , що представляє собою магнітний потік, що періодично змінюється як за значенням, так і за напрямком з амплітудою $\Phi_{nep} = 0,5 (\Phi_{max}$

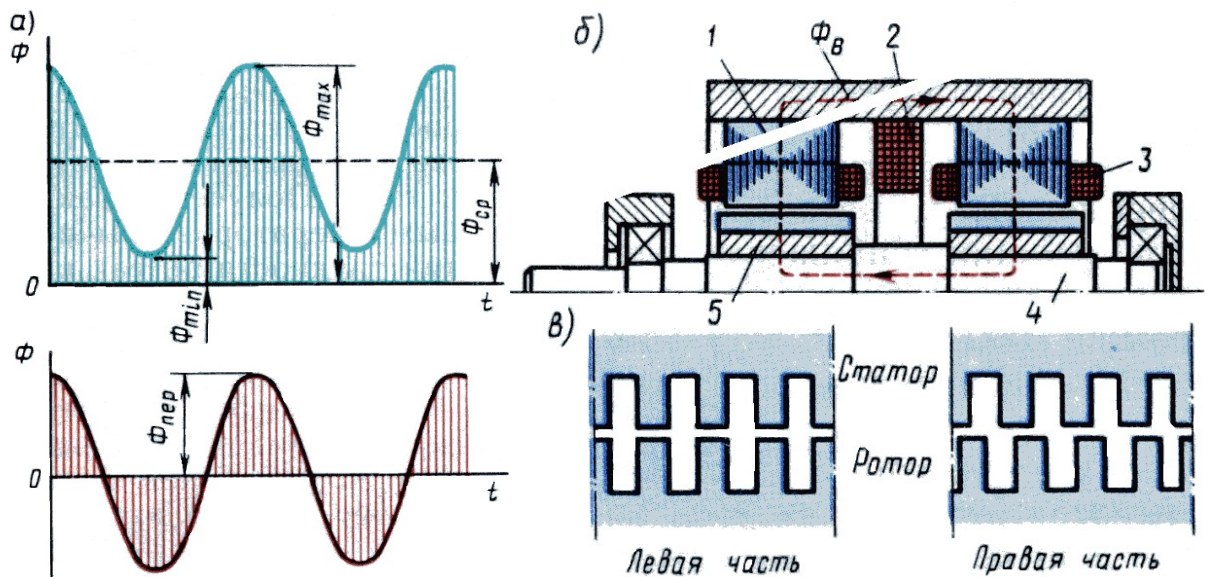
- Φ_{min}). Постійна складова потоку не наводить в обмотках ЕРС, а змінна складова, зчіплюючись з робочою обмоткою генератора, наводить у ній ЕРС.

Існує кілька конструктивних схем індукторних генераторів. Всі вони засновані на створенні пульсацій магнітного потоку за рахунок зміни провідності магнітного кола, отже за рахунок зубцевих пульсацій магнітного потоку. Для цього статору і ротору генератора надають зубчасту структуру. Коли зубець ротора знаходиться проти зубця статора, то магнітний потік в зубці статора набуває найбільшого значення, коли ж проти зубця статора розташований паз ротора, то магнітний потік в цьому зубці статора стає найменшим. При цьому частота зміни магнітного потоку, а отже, і частота ЕРС, наведеної в робочій обмотці цим потоком, пропорційні числу зубців ротора Z_2 :

$$f_1 = Z_2 n_2 / 60. \quad (23.8)$$

Розглянемо одну з конструкцій індукторного генератора, що називають здвоєною (мал. 23.12, б). Статор 1 і ротор 5 генератора виконані здвоєними. Обмотка збудження 2, що розташовується на статорі, підключена до джерела постійного струму і створює магнітний потік, що замикається вздовж вала ротора 4, при цьому на кожній частині статора (та ротора) збуджуються полюси однієї полярності. Число зубців на статорі і на роторі однакове. Пульсації магнітного потоку відбуваються за рахунок зміщення зубців обертового ротора відносно зубців статора. На кожному зубці статора розташована котушка 3, в якій змінною складовою магнітного потоку наводиться ЕРС.

Дуже важливим у індукторних генераторах є забезпечення сталості загального магнітного потоку при обертанні ротора, тому що в протилежному випадку в обмотці збудження 2 буде індукватися ЕРС високої частоти. У розглянутому індукторному генераторі сталість загального магнітного потоку обмотки збудження забезпечується тим, що один пакет ротора зміщений відносно іншого пакета на половину зубцевого поділу (мал. 23.12, в). Завдяки цьому магнітний опір сумарному потоку збудження залишається незмінним при будь-якому положенні ротора. Це дозволило ротор генератора зробити сталевим монолітним (а не шихтованим) з профрезерованими пазами.

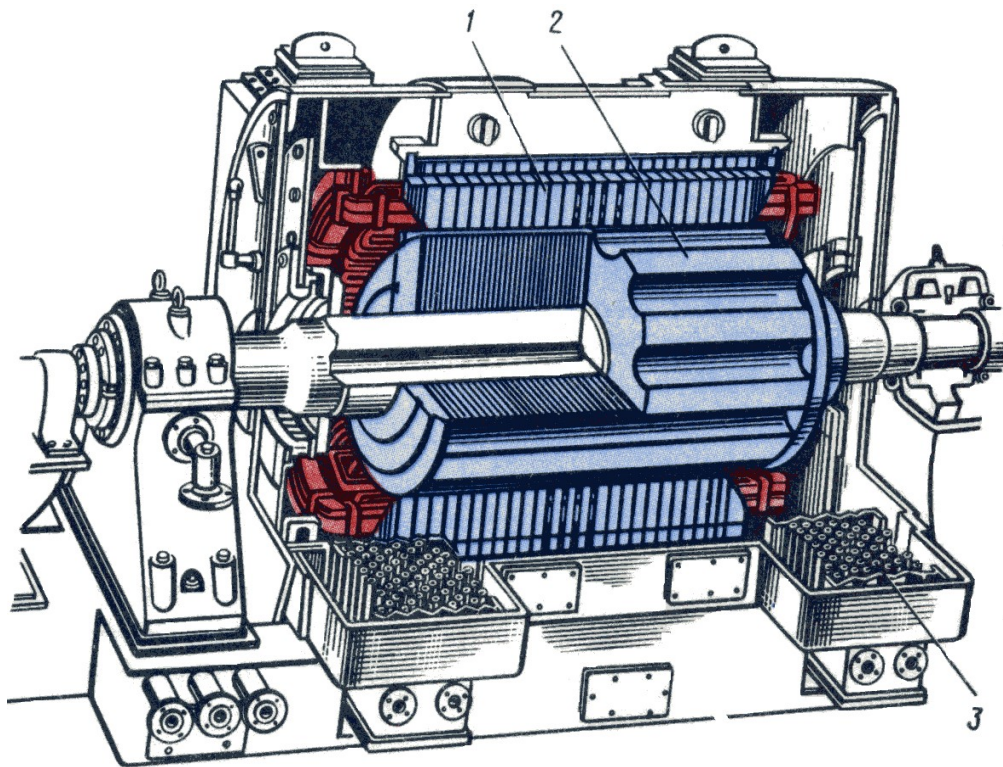


Мал. 23.12. Індукторний генератор здвоєного типу: а - графік магнітного потоку; б - будова генератора; в - взаємне розташування зубців статора і ротора

Коефіцієнт корисної дії генераторів індукторного типу трохи нижчий, ніж у генераторів промислової частоти (50 Гц), через підвищення електричних втрат в обмотці статора, зумовлених ефектом витіснення струму, що викликає збільшення активного опору обмотки. Відсутність обмоток на роторі дозволяє позбутися в індукторному генераторі контактних кілець. Це спрощує конструкцію генератора і підвищує його надійність.

Генератори індукторного типу застосовуються в якості збудників турбогенераторів серії ТВВ (див. § 19.1). На мал. 23.13 показано будову такого збудника - генератора індукторного типу потужністю 2700 кВ·А. На відміну від індукторного генератора здвоєного типу (див. мал. 23.12) ротор збудника має шихтовану конструкцію. Вентиляція генератора виконана по замкнутому циклу (див. § 31.4) із застосуванням газоохолоджувачів.

Індукторна синхронна машина оборотна, отже вона може працювати не тільки в генераторному, але і в рушійному режимі. Індукторні синхронні двигуни дозволяють отримувати дуже малі частоти обертання без застосування механічних редукторів. Синхронна частота обертання такого двигуна при частоті напруги живлення f_1 залежить від числа зубців Z_2 в осерді ротора: $n_1 = f_1 \cdot 60 / Z_2$. Наприклад, при $f_1 = 50$ Гц і $Z_2 = 100$ отримаємо $n_1 = 50 \cdot 60 / 100 = 30$ об/хв.



Мал. 23.13. Збудник індукторного типу потужністю 2700 кВ·А: 1 - статор; 2 - ротор; 3 - газоохолоджувач

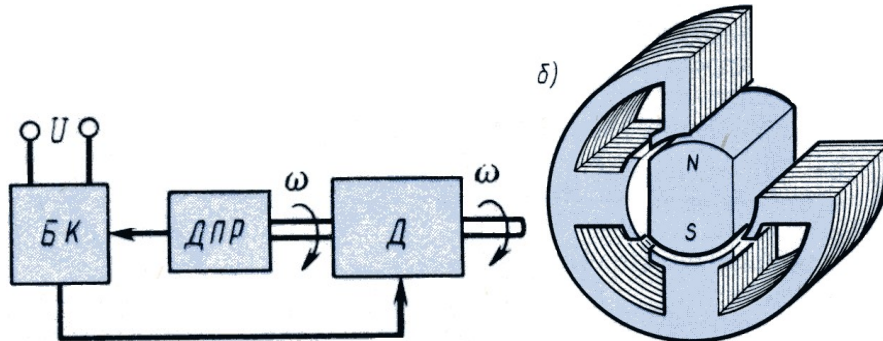
Для отримання обертового магнітного поля обмотку статора індукторного двигуна роблять або трифазною, або однофазною. В останньому випадку на статорі крім робочої розташовують ще й пускову обмотку, що включається в мережу через пусковий конденсатор.

30.3. Безконтактний двигун постійного струму

З метою поліпшення властивостей двигунів постійного струму були створені двигуни з безконтактним комутатором, що називають безконтактними двигунами постійного струму (БДПС). Відмінність БДПС від колекторних двигунів традиційної конструкції полягає в тому, що у них щітково-колекторний вузол замінений напівпровідниковим комутатором (інвертором), керованим сигналами, які надходять з безконтактного датчика положення ротора. Робоча обмотка двигуна - обмотка якоря - розташована на осерді статора, а постійний магніт - на роторі.

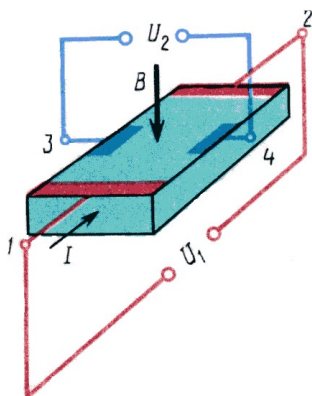
Вал двигуна Д (мал. 30.4, а) механічно з'єднаний з датчиком положення ротора (ДПР), сигнал від якого надходить в блок комутатора (БК).

Підключення секцій обмотки якоря до джерела постійного струму відбувається через елементи блоку комутатора (БК). Призначення ДПР - видавати керуючий сигнал в блок комутатора відповідно до положення полюсів постійного магніту відносно секцій обмотки якоря.



Мал. 30.4. Безконтактний двигун постійного струму: а - блок-схема; б - магнітна система

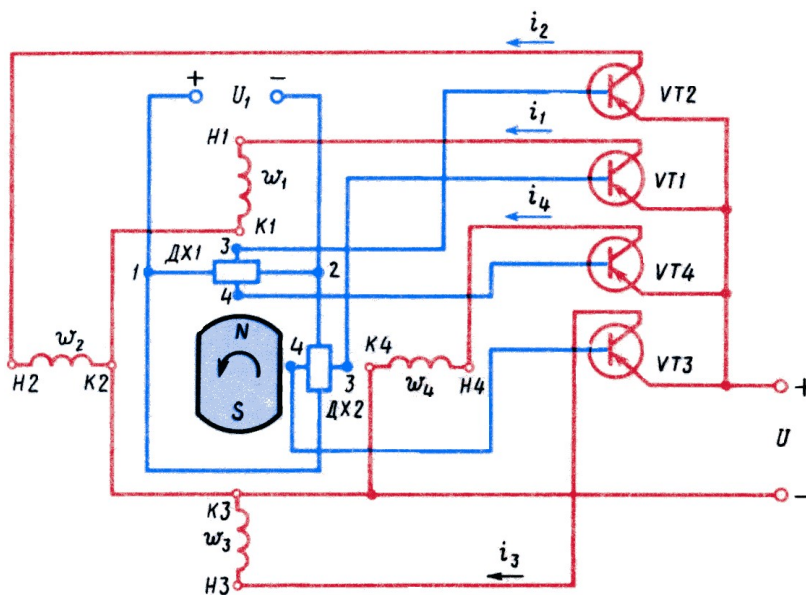
В якості датчиків положення ротора застосовують різні чутливі безконтактні елементи з мінімальними розмірами і споживаною потужністю і великою кратністю мінімального і максимального сигналів, щоб не викликати порушень в роботі блоку комутатора. Чутливі елементи ДПР повинні надійно працювати при зовнішніх впливах (температура, вологість, вібрації і т.п.), на які розрахований двигун. Такі властивості притаманні низці чутливих елементів (датчиків): індуктивних, трансформаторних, магнітодіодів і т. п. Найдоцільніше використовувати датчики ЕРС Холла (мал. 30.5), які являють собою тонку напівпровідникову пластину з нанесеними на ній контактними площинами, до яких припаяні виводи 1-2, що підключені до джерела напруги U_1 і виводи 3-4, з яких знімають вихідний сигнал U_2 .



Мал. 30.5. Датчик ЕРС Холла

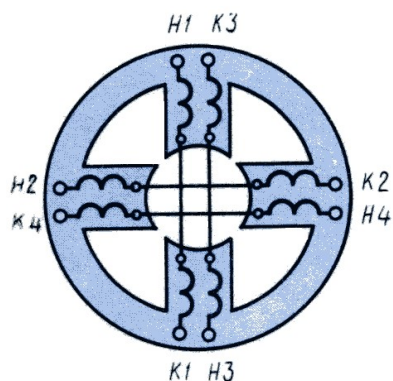
Якщо у колі 1-2 проходить струм I , а датчик знаходиться в магнітному полі, вектор індукції B якого перпендикулярний до площини пластини датчика, то в датчику наводиться ЕРС і на виводах 3-4 з'являється напруга U_2 . Значення ЕРС залежить від струму I і магнітної індукції B , а полярність - від напрямку струму I у колі 1-2 і напрямку вектора магнітної індукції B .

Розглянемо роботу безконтактного двигуна постійного струму, для управління яким застосовують датчики Холла і комутатор, виконаний на транзисторах $VT1-VT4$ (мал. 30.6). Чотири обмотки фази двигуна $\omega_1 - \omega_4$ розташовані на явно виражених полюсах шихтованого осердя якоря (див. мал. 30.4,6). Датчики Холла $ДХ1$ і $ДХ2$ встановлені в пазах полюсних наконечників двох суміжних полюсів. Силкові транзистори $VT1-VT4$ працюють в релейному (ключовому) режимі (мал. 30.6). Сигнал на відкриття транзистора надходить від відповідного датчика Холла (датчика положення ротора). Живлення датчиків Холла (виводи 1-2) здійснюється від джерела напругою U_1 .



Мал. 30.6. Принципова схема БДПС

Кожна обмотка фази виконана з двох котушок, розташованих на протилежних полюсах осердя статора і з'єднаних послідовно (мал. 30.7). Якщо з якої-небудь з обмоток фази статора проходить струм від початку $Н1-Н4$ до кінця $К1-К4$, то полюси осердя статора набувають полярність відповідно S і N .



Мал. 30.7. Розташування обмоток фаз на полюсах статора БДПС

При положенні ротора, показаному на мал. 30.6, в зоні магнітного полюса N знаходиться датчик $ДХ1$. При цьому на виході датчика з'являється сигнал, при якому транзистор $VT2$ переходить у відкритий стан. В обмотці фази статора ω_2 з'являється струм i_2 , що протікає від $H2$ до $K2$. При цьому полюси статора 2 і 4 набувають полярність S та N (мал. 30.8, а). У результаті взаємодії магнітних полів статора і ротора (постійного магніту) утворюється електромагнітний момент M , що обертає ротор. Після повороту ротора відносно осі полюсів статора 1-3 на деякий кут α проти годинникової стрілки датчик $ДХ2$ опиниться в зоні магнітного полюса ротора S , при цьому по сигналу з датчика $ДХ2$ включається транзистор $VT3$. У фазній котушці ω_3 виникає струм i_3 і полюси 3 і 1 набувають полярність S і N . При цьому магнітний потік статора Φ створюється спільною дією МРС обмоток фаз ω_2 і ω_3 . Вектор цього потоку повернутий відносно осі 2-4 на кут 45° (мал. 30.8,б). Ротор, продовжуючи обертання, займає положення по осі полюсів статора 2-4. При цьому датчик $ДХ1$ потрапляє в між полюсний простір ротора, а датчик $ДХ2$ залишиться в зоні полюса S ротора. В результаті транзистор $VT2$ закривається, транзистор $VT3$ залишиться відкритим і магнітний потік Φ , створюваний МРС обмотки фази ω_3 , повертається відносно осі полюсів 2-4 ще на 45° (мал. 30.8, в). Після того як вісь обертового ротора перетне вісь полюсів статора 2-4, датчики $ДХ1$ і $ДХ2$ опиняться в зоні полюса ротора S , що призведе до включення транзисторів $VT3$ і $VT4$. Подальшу роботу елементів схеми БДПС (мал. 30.8) до завершення вектором потоку Φ одного обороту простежимо за табл. 30.1 і мал. 30.8, а-з.

На мал. 30.9 показано будову розглянутого БДПС. Датчики Холла 3 розміщені в спеціальних пазах полюсних наконечників 1 осердя статора.

Постійний магніт 2 не має центрального отвору для посадки на вал, він закладається в тонкостінну гільзу, яка приварюється до фланців двох півосей. Така конструкція ротора дозволяє уникнути виконання центрального отвору в постійному магніті, що часто є причиною браку (тріщини, відколи й т. п.). Блок комутатора (БК) розташований на панелях 5, відділений від двигуна перегородкою 4 і закритий металевим ковпаком 6, через який виведені дроти 7 для підключення двигуна до мережі постійного струму. Подібна конструкція застосована в БДПС корисною потужністю від 1 до 120 Вт

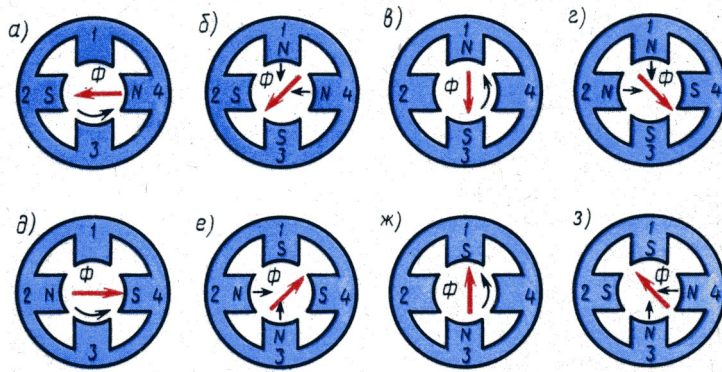
Зміна напрямку обертання (реверс) двигуна здійснюється зміною полярності напруги U_1 в струмовому колі датчиків Холла. Зміна полярності напруги U на вході двигуна неприпустима, тому що при цьому зупиняється робота блоку комутатора.

Коефіцієнт корисної дії БДПС порівняно з колекторними двигунами постійного струму вищий, що пояснюється відсутністю щітково-колекторного вузла, а значить, електричних втрат в щітковому контакті і механічних втрат в колекторі.

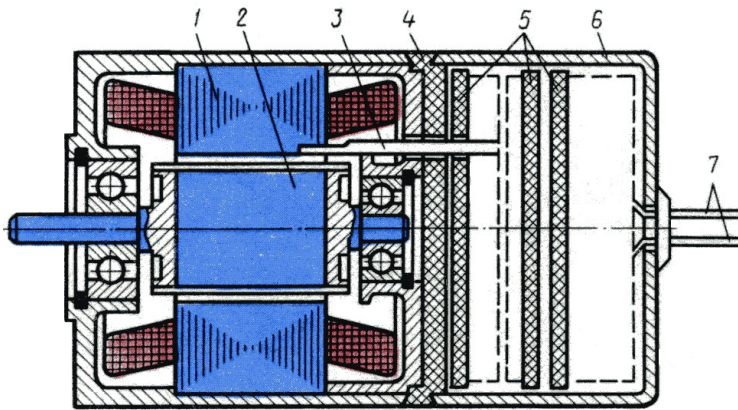
Таблиця 30.1.

Позиція на мал. 30.8	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>	<i>г</i>	<i>д</i>	<i>e</i>	<i>ж</i>	<i>з</i>	<i>a</i>
Відкриті транзистори	<i>VT2</i>	<i>VT2, VT3</i>	<i>VT3</i>	<i>VT3, VT4</i>	<i>VT4</i>	<i>VT4, VT1</i>	<i>VT1</i>	<i>VT1, VT2</i>	<i>VT2</i>
Струм <i>i</i> проходить по фазних котушках	ω_2	ω_2, ω_3	ω_3	ω_3, ω_4	ω_4	ω_4, ω_1	ω_1	ω_1, ω_2	ω_2
Кут повороту вектора потоку статора, град	0	45	90	135	180	225	270	315	360

До переваг БДПС відносяться також висока надійність і довговічність, що пояснюється відсутністю у них щітково-колекторного вузла, отже він безконтактний. Двигуни можуть працювати в умовах широкого діапазону температур навколишнього середовища, у вакуумі, в середовищах з великою вологістю і т. п., де застосування колекторних двигунів неприпустиме через непрацездатність щітково-колекторного вузла.



Мал. 30.8. Магнітне поле статора в чотириполюсному БДПС



Мал. 30.9. Будова БДПС

Недолік БДПС - підвищена вартість, зумовлена наявністю напівпровідникового блоку комутатора, чутливих елементів (датчиків ЕРС Холла) і постійного магніту.

Контрольні запитання:

1. Чому при пуску синхронного двигуна з постійними магнітами виникає гальмівний момент?
2. Поясніть фізичну сутність реактивного моменту.
3. Як впливає глибина між полюсних западин ротора на робочий і пусковий моменти реактивного двигуна?
4. Поясніть фізичну сутність гістерезисного моменту.
5. У чому відмінність крокових двигунів з активним і реактивним роторами?
6. Як зміниться крок двигуна, якщо від роздільного включення обмоток перейти до роздільно-спільного?
7. Що таке частота прийомистості крокового двигуна?
8. Чим досягається велика частота пульсацій магнітного потоку в індукторному генераторі?
9. Чому ротор індукторного генератора на мал. 23.12 має монолітну конструкцію, а на мал. 23.13 - шихтовану?

Література:

1. Грабко В.В., Розводюк М.П., Левицький С.М., Казак М.О. Г75
Експериментальні дослідження електричних машин. Частина IV. Синхронні
машини. Навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2007. – 197 с.
2. Електричні машини. Навчальний посібник / Г.Г. Півняк, Ф.П. Шкрабець,
В.П. Довгань. – Дніпропетровськ: Видавництво Національного гірничого
університету, 2003, - 328 с.