

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

Підготував: доц. Ярошенко Леонід Вікторович

Лекція № 16

Тема: «Синхронні машини»

ПЛАН

- 1. Будова і основні конструктивні елементи синхронних машин;*
- 2. Взаємодія магнітних полів статора і ротора синхронної машини;*
- 3. Явнополюсні синхронні машини;*
- 4. Неявнополюсні синхронні машини;*
- 5. Обернена синхронна машина;*
- 6. Принцип дії синхронного генератора.*

1. Будова і основні конструктивні елементи синхронних машин

Синхронні машини - це безколекторні машини змінного струму. За будовою вони відрізняються від асинхронних машин лише конструкцією ротора, що може бути явно полюсним і неявно полюсним. Що ж стосується властивостей, то синхронні машини відрізняються синхронною частотою обертання ротора при будь-якому навантаженні, а також можливістю регулювання коефіцієнта потужності, установлюючи його таким, при якому робота синхронної машини стає найбільш економічною. Синхронні машини оборотні і можуть працювати як у режимі генератора, так і в режимі двигуна. Синхронні генератори складають основу електротехнічного устаткування електростанцій, тобто практично вся електроенергія виробляється синхронними генераторами. Одинична потужність сучасних синхронних генераторів досягає мільйона кіловат і більше. Синхронні двигуни застосовуються головним чином для приводу пристроїв великої потужності. Такі двигуни за своїми техніко-економічними показниками перевершують двигуни інших типів. У великих електроенергетичних установках синхронні машини іноді використовуються як компенсатори - генератори реактивної потужності, що дозволяють підвищити коефіцієнт потужності всієї установки.

Синхронною називається безколекторна машина змінного струму, частота обертання ротора якої знаходиться в строго постійному відношенні до частоти струму мережі живлення:

$$n = n_1 = 60f/p, \text{об/хв.} \quad (14.1)$$

Конструктивно синхронна машина складається з двох частин: нерухомої - статора, та обертової - ротора.

У синхронній машині обмотку, в якій індукується ЕРС та проходить струм навантаження, називають **обмоткою якоря (статора)**, а частина машини, на якій розташована обмотка збудження - **індуктором**. Таким чином, у приведеній СМ статор є якорем, а ротор - індуктором.

Статор синхронної машини конструктивно не відрізняється від статора асинхронної машини. Обмотка статора повинна мати таке ж число полюсів, що і ротор. Якщо синхронна машина трифазна, то на статорі розташовується трифазна обмотка.

Оскільки ротор синхронної машини обертається із синхронною частотою n_1 поля в зазорі, то в обмотці ротора не індукується ЕРС. Величина постійного струму в обмотці ротора визначається тільки підведеною ззовні до обмотки напругою та її омичним опором.

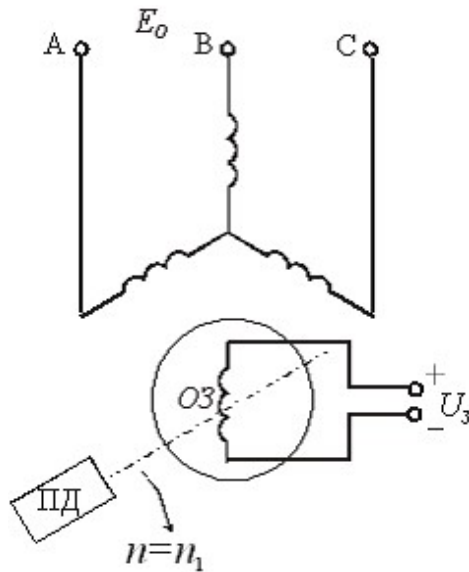
Обмотка, в якій тече постійний струм, називається обмоткою збудження (03), тому що вона збуджує в машині магнітне поле незалежно від режиму роботи.

Електричне з'єднання обмотки збудження із зовнішнім джерелом (збудником) здійснюється за допомогою пристрою, що складається з двох контактних кілець, до яких приєднується обмотка, і щіток, що ковзають по поверхні кілець та з'єднані із зовнішнім джерелом.

Обмотка збудження призначена для створення магнітного потоку Φ_0 в машині. Потужність збудника складає $(0,3 \div 3)\%$ від номінальної потужності P_n синхронної машини. Збудник, як правило розташовується на одному валу із синхронною машиною. Існують і інші способи збудження синхронних машин, наприклад - живлення обмотки збудження від мережі змінного струму через випрямляч.

На мал. 1.1, а представлена електрична схема синхронного генератора. Первинний двигун (ПД) обертає ротор з обмоткою збудження. На обмотку збудження подають напругу від джерела постійного струму. Збуджений ротор синхронної машини приводиться в обертання зі швидкістю n_1 . Обертове поле збудження наводить в обмотці статора змінну ЕРС із частотою:

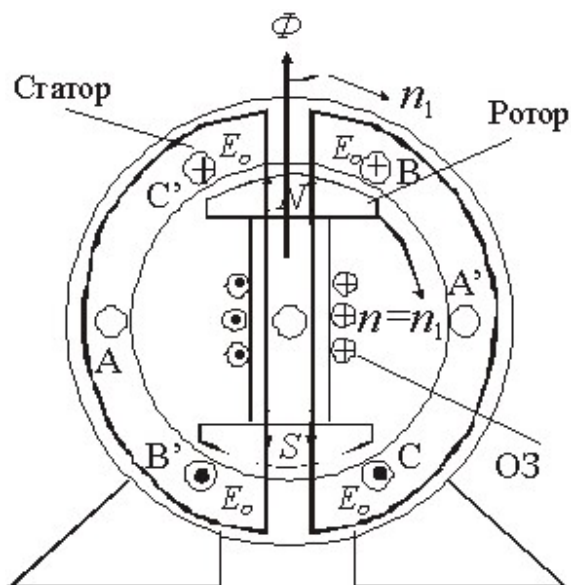
$$f_1 = p \cdot n_1 / 60.$$



Напрямок індукованої полем збудження ЕРС E_0 визначається за правилом правої руки і позначений на мал. 1.1, б знаком «+» у верхній частині провідників обмотки статора та знаком «•» у нижній частині. При цьому враховано відносне переміщення провідників обмотки статора щодо обертового двополосного поля збудження - поле рухається вправо, провідники - вліво.

Якщо обмотку статора підключити до якого-небудь навантаження, то трифазний струм, що протікає по цій обмотці, створює обертове магнітне поле, перша гармоніка якого обертається в тому ж напрямку і з тією ж частотою n_1 , що і ротор.

Результуючий магнітний потік Φ синхронної машини створюється спільною дією МРС обмотки збудження та МРС обмотки статора і **результуюче магнітне поле обертається в просторі з тією ж частотою, що і ротор.**

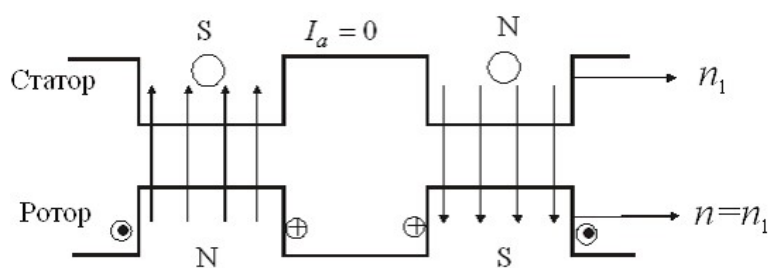


Синхронна машина може працювати автономно як генератор на автономне, підключене до неї навантаження, чи паралельно з мережею, до якої підключені інші генератори.

При роботі паралельно з мережею вона може віддавати або споживати електричну енергію, тобто працювати генератором або двигуном.

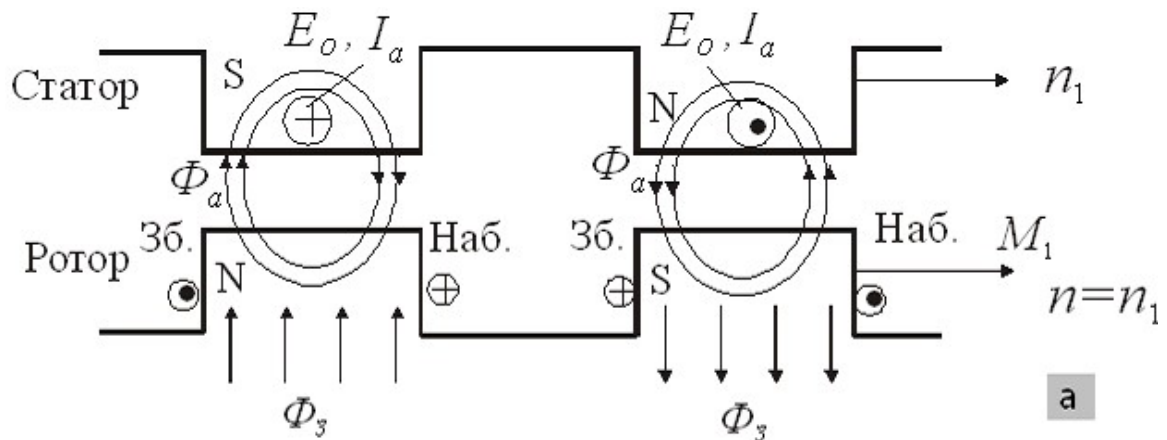
2. Взаємодія магнітних полів статора і ротора синхронної машини

Щоб з'ясувати характер взаємодії магнітних полів статора і ротора синхронної машини скористаємося моделлю цієї машини. Поля зобразимо у вигляді двох систем полюсів, що обертаються з однаковою частотою $n = n_1$. Якщо в обмотці статора немає струму ($I_a = 0$, неробочий хід), то лінії магнітного поля в полюсах статора становлять продовження ліній поля ротора і осі обох полів збігаються (мал. 1.2).



Якщо синхронна машина приводиться в обертання під дією моменту приводного двигуна та працює в режимі генератора, то в обмотці статора наводиться ЕРС E_0 і тече

струм якоря I_a . При активному навантаженні ЕРС E_0 та струм I_a збігаються по фазі (мал. 1.3, а).

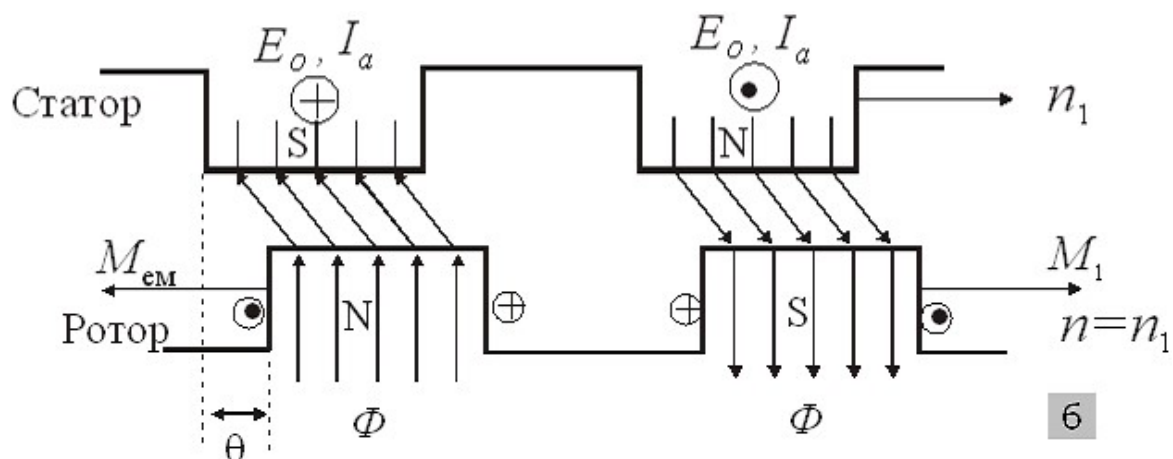


Струм I_a створює поле якоря Φ_a , яке спрямовано зустрічно полю ротора Φ_3 (мал. 1.3. а) праворуч від осі полюса (край, що набігає) і узгоджено з полем ротора ліворуч від осі полюса (край, що збігає). При накладенні полів виходить картина результуючого поля, де видно, що вісь цього поля змістилася щодо осі поля ротора на кут θ (мал. 1.3. б).

У режимі генератора вісь поля ротора випереджає вісь поля статора на кут θ , тобто поле статора є веденим.

Лінії магнітного поля в зазорі тепер похилі (мал. 1.3. б).

При цьому виникає тангенціальна складова в силі притягання полюсів магнітного поля, спрямована по дотичній до кола ротора у бік, протилежний обертанню ротора.



Тангенціальні сили, складаючись, створюють електромагнітний момент $M_{ем}$, спрямований зустрічно щодо моменту приводного двигуна M_1 . Отже, момент $M_{ем}$ є

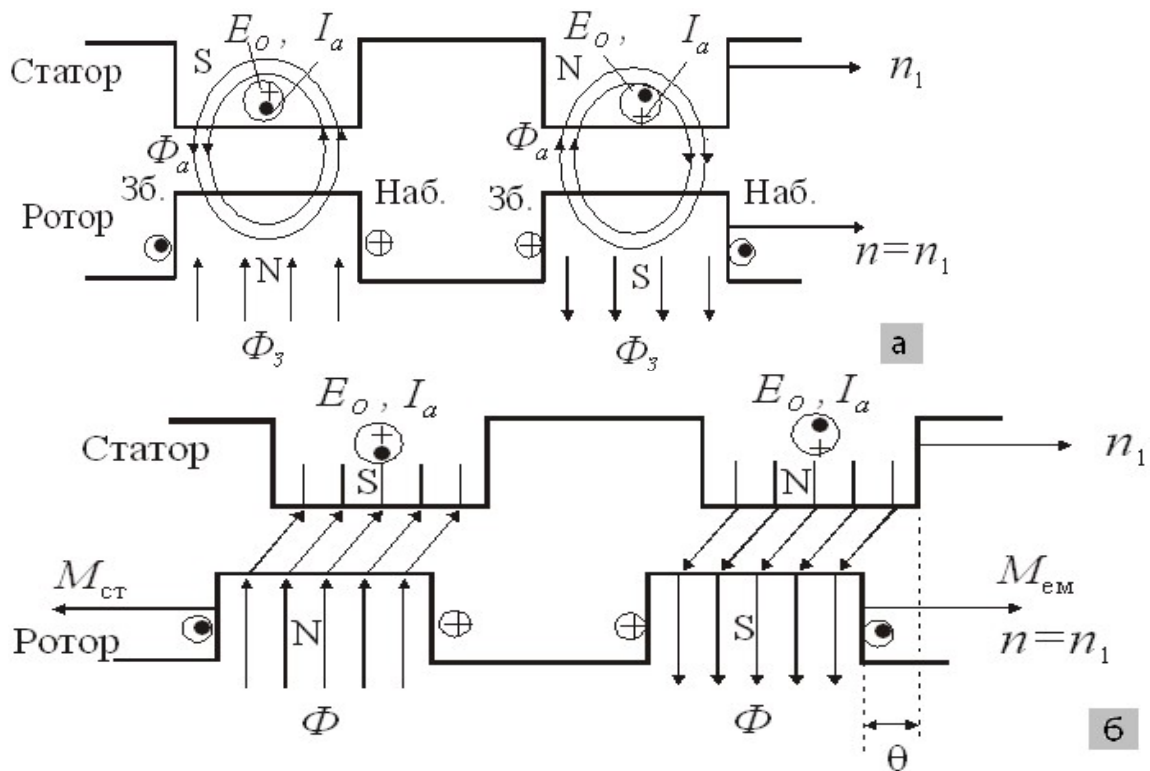
гальмівним стосовно моменту M_I . Усталений режим роботи синхронного генератора буде мати місце при рівності моментів $M_{em} = M_I$.

Якщо збільшити обертовий момент M_I на валу генератора, то під дією цього моменту ротор почне зміщатися щодо полюсів статора вперед за напрямком обертання, і кут θ буде збільшуватися.

Але при цьому силові лінії в зазорі будуть сильніше розтягуватися, надаючи усе більшу протидію моменту приводного двигуна. Таке збільшення кута θ й електромагнітного моменту M_{em} буде продовжуватися доти, поки $M_{em} = M_I$. Генератор буде працювати з колишньою синхронною частотою n_1 , та з новим більшим кутом θ .

При надмірному збільшенні моменту M_I електромагнітна взаємодія між статором і ротором може бути порушена. При цьому *генератор випадає а синхронізму*. У цьому випадку поля статора і ротора починають обертатися з різними частотами обертання і, отже, постійна взаємодія між ними стає неможливою.

Якщо СМ працює в режимі двигуна при тих же полярностях полюсів та напрямку обертання, то активна складова струму якоря змінює свій напрямок стосовно ЕРС E_0 (мал. 1.4, а).



Відповідно до цього змінюється дія поля якоря Φ_a стосовно поля ротора Φ_r . Тепер поле якоря намагнічує край полюса, що набігає, і розмагнічує, що збігає (рис. 1.4, а).

Картина результуючого поля та нахил силових ліній змінюється, унаслідок чого змінюється знак електромагнітного моменту M_{em} . Тепер електромагнітний момент є обертовим.

У режимі двигуна вісь поля ротора відстає від осі поля статора на кут θ . У режимі двигуна поле статора є ведучим.

Синхронні двигуни (СД) застосовуються головним чином для приводу пристроїв великої потужності у великих енергетичних установках.

СД використовують як компенсатори - генератори реактивної потужності, що дають можливість підвищити коефіцієнт потужності мережі. Синхронні генератори (СГ) складають основу електротехнічного устаткування електростанцій, тобто практично вся електрична енергія виробляється СГ.

За конструктивним виконанням ротора синхронні машини поділяють на два типи: явнополюсні і неявнополюсні.

3. Явнополюсні синхронні машини.

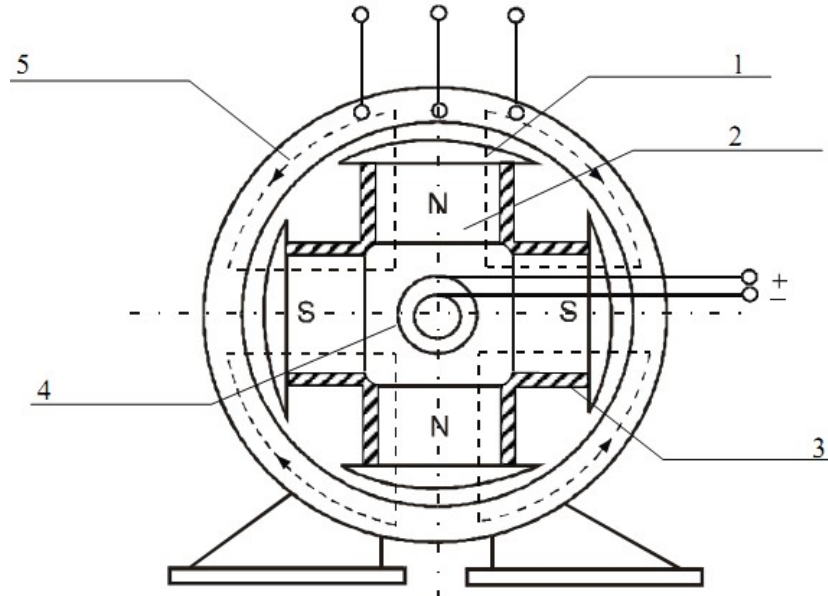
Схематично конструкція явнополюсної синхронної машини представлена на мал. 14.1.

Осердя полюса виконується шихтованим з окремих листів електротехнічної сталі товщиною 1-2 мм. Полюсний наконечник виконується суцільним і кріпиться до осердя за допомогою гвинтів. На полюсах ротора розташовуються котушки обмотки збудження. Вони підключаються до джерела постійного струму таким чином, щоб на роторі утворилися полюси полярності, що чергуються:

$$N-S; N-S; N-S; \dots$$

Відношення ширини полюсного наконечника до полюсного поділу, як правило, становить:

$$b_n/\tau = 0,45 + 0,55.$$



1 - полюсний наконечник; 2 - осердя полюса; 3 - котушка обмотки збудження; 4 - контактні кільця; 5 - статор

Мал. 14.1 Конструкція явнополюсної синхронної машини:

Тому ці синхронні машини ще називають синхронними машинами з явновираженими полюсами.

З виразу 14.1 для частоти обертання синхронної машини випливає, що залежно від числа пар полюсів, при $f_l = 50$ Гц частота обертання ротора може бути представлена рядом:

3000; 1500; 1000; 750;... [об/хв.].

Однак явнополюсні синхронні машини виконуються на частоті обертання, що не перевищують 1000 об/хв. Це пояснюється тим, що при вищих частотах обертання не забезпечується механічна міцність ротора.

Найчастіше великі явнополюсні синхронні машини - **гідрогенератори**, тобто генератори гідравлічних електростанцій, що приводяться в обертання, тихохідною гідравлічною турбіною. Як правило, гідрогенератори мають вертикальне розташування вала з опорним підшипником. При цьому діаметр ротора у великих гідрогенераторах сягає 20 м при осьовій довжині 1,7 м.

Горизонтальне розташування вала в гідрогенераторах зустрічається рідко.

4. Неявнополюсні синхронні машини

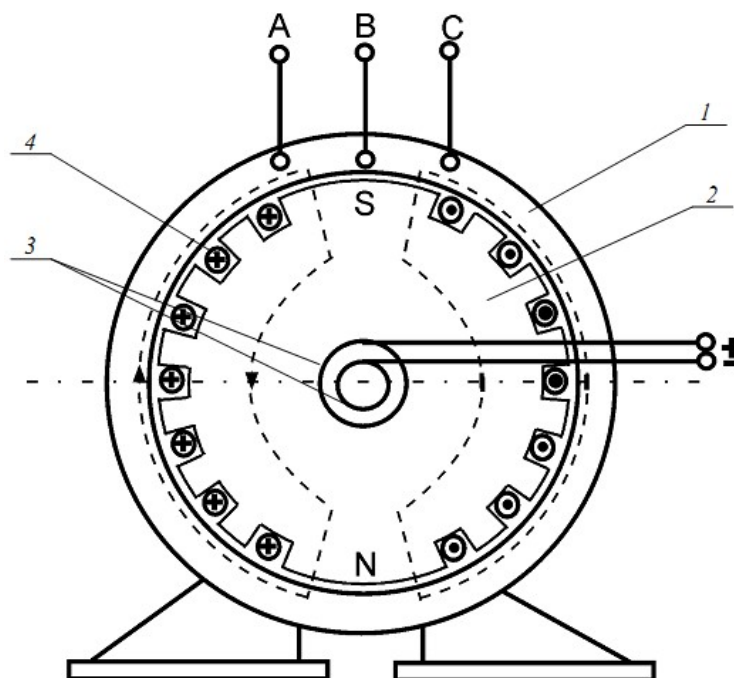
Типовою неявнополюсною синхронною машиною є генератор теплової електростанції, що приводиться в обертання швидкохідною паровою турбіною. Ці генератори називаються *турбогенераторами*. Ротор турбогенератора виконується із суцільного сталевого кування діаметром до 1,1-1,15 м і довжиною до 7,5 м. Схематично конструкція синхронної машини з неявновираженими полюсами представлена на рис. 14.2.

На зовнішній поверхні ротора 2 фрезеруються пази, в які укладається обмотка збудження 4. У пазах вона закріплюється сталевими клинами, а по торцях сталевими бандажами. Така конструкція ротора забезпечує високу механічну міцність.

Турбогенератори, як правило, виконуються двополюсними з горизонтальним розташуванням вала. Тому їхня частота обертання становить:

$$n = 60f/p = 60 \cdot 50/1 = 3000, \text{ об/хв.}$$

Живлення обмотки збудження 4 здійснюється через контактні кільця 3 від джерела постійної напруги.



1 - статор; 2 - ротор; 3 - контактні кільця; 4 - обмотка збудження

Рис. 14.2 Конструкція неявнополюсної синхронної машини:

Турбогенератори мають складну систему охолодження. У великих машинах обмотка якоря охолоджується водою, що тече по порожнистих провідниках обмотки. Обмотка збудження охолоджується воднем по замкнутому циклу.

5. Обернена синхронна машина.

Цей тип синхронної машини відрізняється від попередніх тим, що полюси та обмотка збудження розташовуються на статорі, а трифазна обмотка якоря на роторі. При цьому вона через три контактних кільця з'єднується з зовнішнім електричним колом.

У оберненому виконанні випускаються синхронні машини малої потужності. Така конструкція диктується необхідністю уніфікації синхронних машин з машинами постійного струму, тобто статор синхронної машини і машини постійного струму мають однакове конструктивне виконання.

Синхронні машини випускаються серійно: як синхронні двигуни, синхронні генератори і синхронні компенсатори. Синхронні двигуни загальнопромислового призначення випускаються на потужності до 10000 кВт і напругою до 6- 10 кВ.

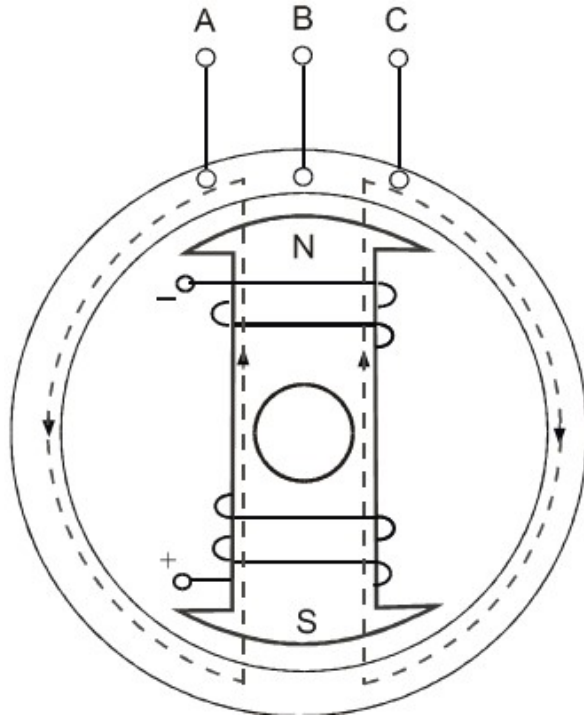
Синхронні генератори загальнопромислового призначення випускаються на потужності до 3200 кВА і напругою до 6,3 кВ.

Генератори електричних станцій випускають як гідро- і турбогенератори. Гідрогенератори випускаються на потужності понад 600000 кВА, турбогенератори 1200000 кВА.

6. Принцип дії синхронного генератора

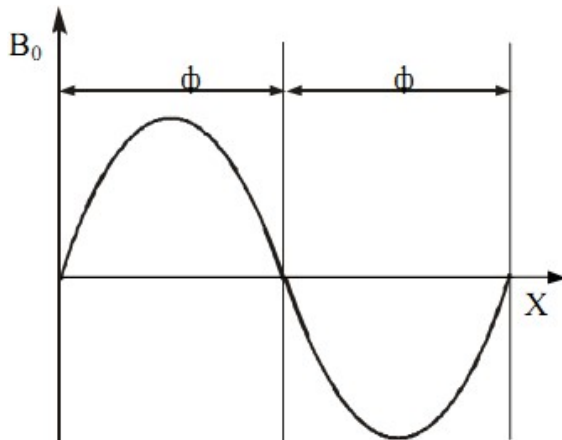
Принцип дії синхронного генератора розглянемо на двополосній моделі синхронної машини (рис. 14.3).

При вмиканні обмотки збудження на джерело постійного струму, вона створює магнітне поле. Оскільки це поле утворене постійним струмом, то воно нерухоме щодо полюсів ротора. На кожному полюсному поділі в повітряному зазорі індукція розподіляється за синусоїдальним законом (рис. 14.4).



Мал.14.3 Модель двополусної синхронної машини

Якщо ротор не приведений в обертання, в обмотці якоря ЕРС не індукється.



Мал. 14.4 Розподіл магнітної індукції в повітряному зазорі

Коли ротор приводиться в обертання приводним двигуном (турбіною), силові лінії поля збудження перетинають провідники обмотки якоря і індукують у них ЕРС.

Діюче значення ЕРС фази обмотки якоря визначається виразом:

$$E_{\phi} = 4,44w_{\phi}fK_{o\phi}\Phi_0, \quad (14.3)$$

де w_{ϕ} - число послідовно з'єднаних витків у фазі обмотки якоря; $f = pn/60$ частота ЕРС, Гц; p - число пар полюсів ротора; n - частота обертання ротора, об/хв; Φ_0 - магнітний

потік зрушення на полюсному поділу, Вб; $K_{об}$ - обмотувальний коефіцієнт обмотки якоря.

Відповідно до приведеної залежності, значення ЕРС і, відповідно, вихідна напруга генератора залежить від двох факторів:

1. Значення магнітного потоку Φ_0 на полюсному поділі, що регулюється струмом збудження.
2. Частоти обертання ротора n .

Як правило, в генераторах загальнопромислового призначення частота вихідної напруги $f = 50$ Гц, отже, залежно від числа пар полюсів машини частота обертання ротора повинна бути певною, тобто відповідати наступному ряду:

p	1	2	3	4
$n, об/хв$	3000	1500	1000	750

Таким чином, в синхронних генераторах регулювати значення ЕРС обмотки якоря і відповідно, вихідну напругу можна тільки зміною струму збудження.

Напрямок обертання ротора повинний бути таким, щоб на затискачах обмотки якоря утворився прямий порядок чергування фаз A, B, C .

Контрольні запитання:

1. Поясніть будову явнополюсного і неявнополюсного роторів.
2. Поясніть будову оберненої синхронної машини.
3. Поясніть принцип дії синхронного генератора.

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.