

Лекція №10

СИНХРОННІ МАШИНИ

План лекції:

1. Будова синхронної машини.
2. Збудження синхронних генераторів.
3. Реакція якоря синхронного генератора.
4. Характеристики синхронного генератора.
5. Синхронні двигуни і компенсатори.

Синхронні машини – це безколекторні машини змінного струму. За своєю конструкцією вони відрізняються від асинхронних машин лише конструкцією ротора, який може бути явнополюсним або неявнополюсним. Що ж до властивостей, то синхронні машини відрізняються синхронною частотою обертання ротора ($n_2 = n_1 = const$) при будь-якому навантаженні, а також можливістю регулювання коефіцієнта потужності, встановленням такого його значення, при якому робота синхронної машини стає найбільш ефективною і економічною. Синхронні машини зворотні і можуть працювати як в 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 електроприводу пристроїв великої потужності. У потужних електроенергетичних установках синхронні машини іноді використовуються як компенсатори – генератори реактивної потужності, що дозволяють підвищити коефіцієнт потужності всієї установки. У даному розділі розглянуті головним чином трифазні синхронні машини.

За основними технічними параметрами, номінальною потужністю і частотою обертання синхронні генератори для автономних

систем не мають спеціальної класифікації. В даний час верхня межа їх потужності складає 6300 кВт.

Перевагу в розвитку отримали генератори з частотою обертання 1500, 1000, 750 об/хв., проте випускаються і генератори з частотою обертання 500 і 375 об/хв. За частотою струму окрім генераторів на 50 і 60 Гц є генератори нестандартної частоти, генератори з частотою 400 Гц і високочастотні генератори до 10000 Гц.

За сферою застосування синхронні генератори підрозділяються на *стаціонарні, пересувні, транспортні і тягові*.

Пересувні генератори можуть розміщуватися в залізничному вагоні, автофургоні, причепі, контейнері і т.п. Проте на відміну від транспортних і тягових генераторів ці генератори можуть працювати тільки при нерухомому стані вказаних пристроїв.

Як правило, кожен генератор проектується під конкретний тип приводного двигуна. При цьому встановлюються вимоги до більшості параметрів і характеристик.

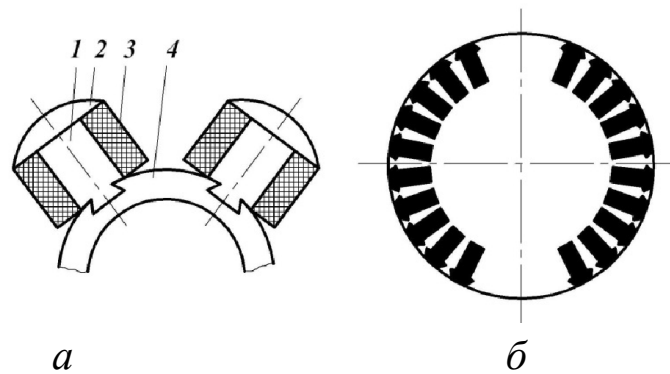
Сучасні синхронні генератори автономних енергетичних систем виконують з безщітковими системами збудження.

1 Будова синхронної машини

Синхронна машина складається з нерухомої частини – статора, і частини, що обертається – ротора. Статори синхронних машин в принципі не відрізняються від статорів асинхронних двигунів, тобто складаються з корпусу, осердя і обмотки (рисунк 10.1).

Конструктивне виконання статора синхронної машини може бути різним залежно від призначення і габаритів машини. Так, в багатополюсних машинах великої потужності при зовнішньому діаметрі осердя статора більше 900 мм пластини осердя роблять з окремих сегментів, які при збірці утворюють циліндр осердя статора. Корпуси статорів великогабаритних машин роблять роз'ємними, що необхідне для зручності транспортування і монтажу цих машин.

Ротори синхронних машин можуть мати дві конструкції, що принципово розрізняються: явнополісну і неявнополісну (рисунк 10.1 а, б).



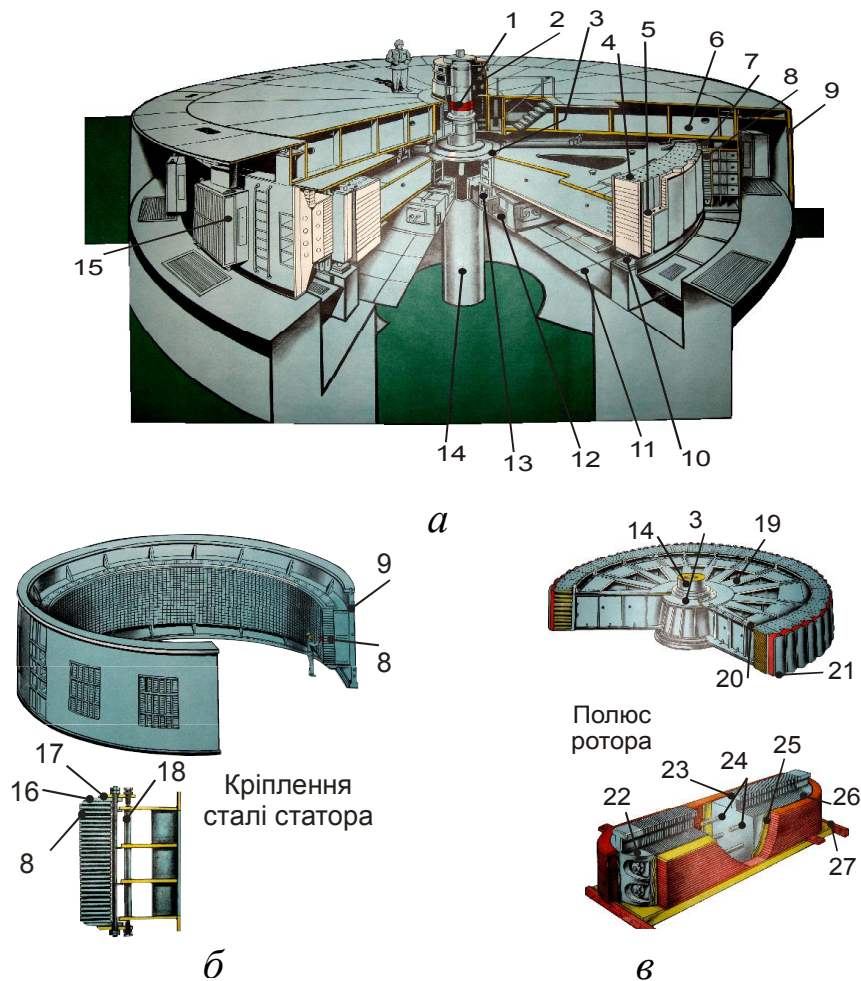
a – ротор із явновираженими полюсами; *б* – ротор із неявновираженими полюсами

Рисунок 10.1 – Конструкція роторів синхронних машин

В енергетичних установках по виробництву електроенергії змінного струму як первинні (приводні) двигуни синхронних генераторів застосовують в основному три види двигунів: парові турбіни, гідравлічні турбіни або двигуни внутрішнього згорання (дизелі). Застосування будь-якого з наведених двигунів принципово впливає на конструкцію синхронного генератора.

Якщо приводним двигуном є гідравлічна турбіна, то синхронний генератор називають гідрогенератором (рисунок 10.2). Гідравлічна турбіна зазвичай розвиває невелику частоту обертання (60-500 об/хв.), тому для отримання змінного струму промислової частоти (50 Гц) в гідрогенераторі застосовують ротор з великим числом полюсів. Ротори гідрогенераторів мають явнополюсну конструкцію, тобто з явно вираженими полюсами, при якій кожен полюс виконують у вигляді окремою вузла, що складається з осердя 1, полюсного наконечника 2 і полюсної котушки 3 (рисунок 10.1).

Всі полюси ротора закріплені на ободі 4, що є також і ярмом магнітної системи машини, в якому замикаються потоки полюсів. Гідрогенератори зазвичай виготовляються з вертикальним розташуванням валу.



1 - контактні кільця; 2 - збуджувач; 3 - втулка ротора; 4 - обід ротора; 5 - полюс; 6 - верхня хрестовина; 7 - обмотка статора; 8 - осердя статора; 9 - корпус статора; 10 - гальмівний домкрат; 11 - нижня хрестовина; 12 - ванна для масла; 13 - підп'ятник; 14 - вал; 15 - повітряохолоджувач; 16 - натискний палець; 17 - натискна плита; 18 - стяжна шпилька; 19 - спиця ротора; 20 - струмопідвод до обмотки збудження; 21 - полюс ротора; 22 - натискна щока; 23 - Т-подібний хвіст полюса; 24 - стяжні шпильки; 25 - корпусна ізоляція котушки збудження; 26 - осердя полюса; 27 - полюсний наконечник;

a - загальна конструкція гідрогенератора; *б* - конструкція статора; *в* - конструкція ротора

Рисунок 10.2 – Конструкція гідрогенератора

Парова турбіна працює при великій частоті обертання, тому генератор, що приводиться нею в обертання, званий турбогенератором, є швидкохідною синхронною машиною. Ротори цих генераторів виконують або двополюсними ($n_1 = 3000$ об/хв.), або чотириполюсними ($n_1 = 1500$ об/хв.).

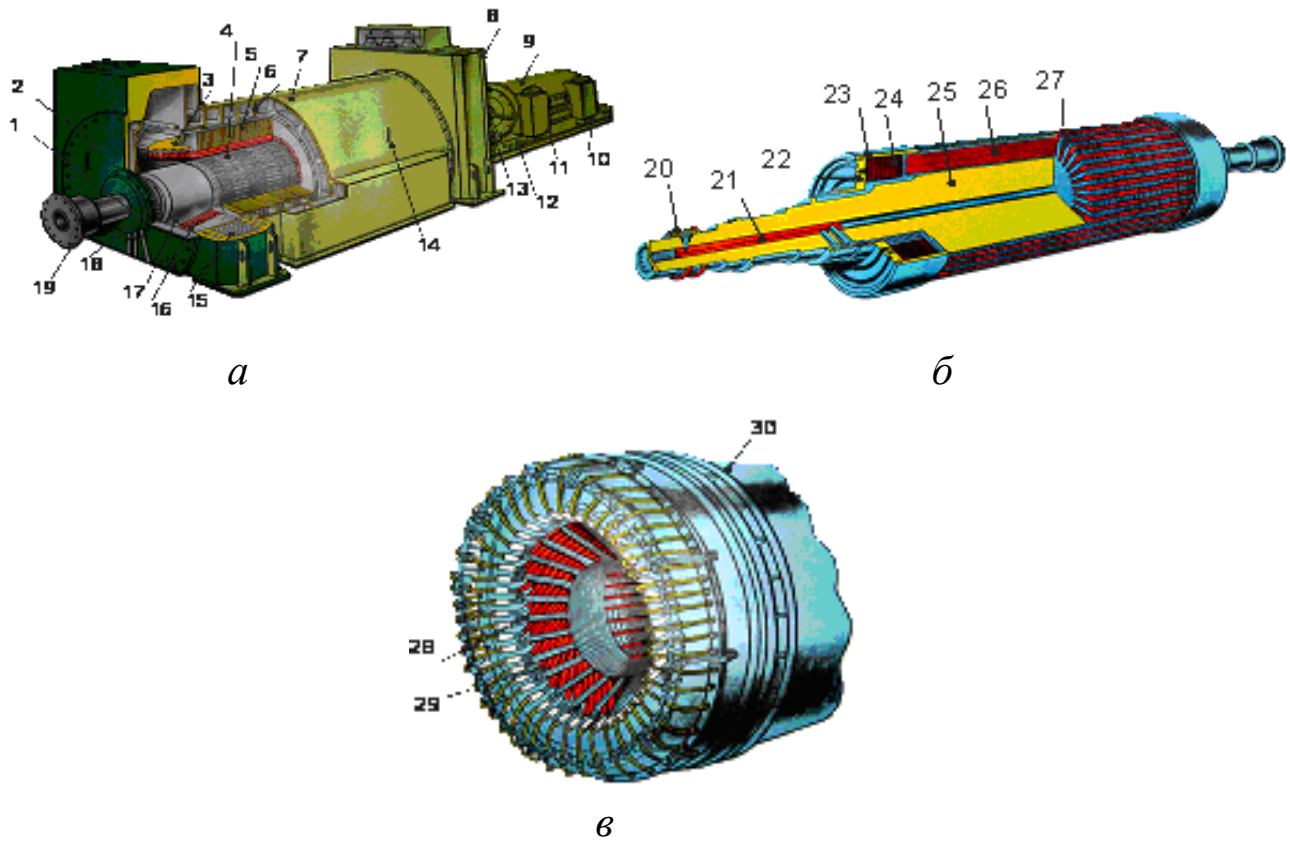
В процесі роботи турбогенератора на його ротор діють значні відцентрові сили. Тому за умовами механічної міцності в турбогенераторах застосовують неявнополіусний ротор, що має вид подовженого сталевих циліндра з подовжніми пазами, що фрезують на поверхні, для обмотки збудження (рисунок 10.1, б). Осердя неявнополіусного ротора виготовляють у вигляді цілісної сталевих поковки разом з хвостовиками, або ж роблять збірним. Обмотка збудження неявнополіусного ротора займає лише 2/3 його поверхні (по периметру). Для захисту лобових частин обмотки ротора від руйнування дією відцентрових сил, ротор з двох сторін прикривають сталевими бандажними кільцями, що виготовляються зазвичай з немагнітної сталі.

Турбогенератори (рисунок 10.3) і дизельгенератори (рисунок 10.4) виготовляють з горизонтальним розташуванням валу. Дизельгенератори розраховані на частоту обертання 600-1500 об/хв. і виконують з явнополіусним ротором (рисунок 10.1, а).

На рисунку 10.5 показана конструкція полюсу синхронного генератора – елементу, характерного для більшості конструкцій. На вал 1 посаджений шихтований обід 2, на якому за допомогою Т-подібного хвостовика кріпиться осердя полюса 3, виконаний сумісно з полюсним наконечником. Осердя полюсів виготовлені з штампованих листів конструкційної сталі завтовшки 1,0 або 1,5 мм. Хвостовик полюса закривається в подовжньому пазу обода за допомогою клинів 9. Можливо також кріплення полюсів до обода за допомогою «ластівчиного хвоста» (рисунок 10.1) або шпильок. Сталеві щоки 4, стягнуті шпильками, запобігають розпушення пакету полюса ротора. Щоки мають заплічки, що утримують полюсну котушку ротора 5.

В пазах полюсних наконечників розташовані латунні або мідні стрижні 6 пускової (заспокійливою) обмотки, замкнуті з двох сторін сегментами 7.

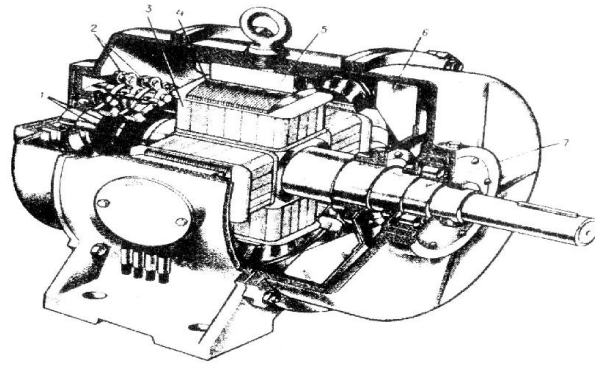
Між зовнішньою поверхнею полюсного наконечника і внутрішньою поверхнею осердя статора 8 є повітряний зазор. По осі полюса цей зазор δ мінімальний, а на краях – максимальний S_{max} . Така конфігурація полюсного наконечника необхідна для синусоїдального розподілу магнітної індукції в повітряному зазорі. Вона досягається тим, що поверхня полюсного наконечника має радіус $R < (D_1 - 2\delta)/2$, де D_1 – діаметр розточки осердя статора.



1 - ущільнення на валу ротора; 2 - торцевий щит; 3 - кронштейн кріплення обмотки статора; 4 - ротор; 5 - осердя статора; 6 - деталі кріплення осердя статора до корпусу; 7 - корпус турбогенератора; 8 - охолоджувач; 9 - збуджувач; 10 - патрубки для підведення води до охолоджувача; 11 - охолоджувач збуджувача; 12 - маслопровід до підшипника; 13 - стійки підшипника; 14 - термометр; 15 - трубки для циркуляції води в охолоджувачі; 16 - бандажні кільця обмотки статора; 17 - бандажні кільця обмотки ротора; 18 - відцентровий вентилятор; 19 - з'єднувальний фланець; 20 - контактні кільця; 22 - струмопідвод до обмотки збудження; 23 - бандажне кільце; 24 - лобова частина обмотки; 25 - бочка ротора; 26 - пазова частина обмотки ротора; 27 - пазовий клин ротора; 28 - деталі кріплення лобових частин обмотки статора; 29 - лобові частини обмотки статора; 30 - корпус статора.

a - загальна конструкція турбогенератора; *б* – конструкція статора; *в* – конструкція ротора

Рисунок 10.3 – Конструкція турбогенератора



1 – контактні кільця, 2 – щіткотримачі, 3 – полюсна котушка ротора
4 – полюсний наконечник, 5 – осердя статора, 6 – вентилятор, 7 – вал

Рисунок 10.4 – Синхронний генератор (дизель-генератор)

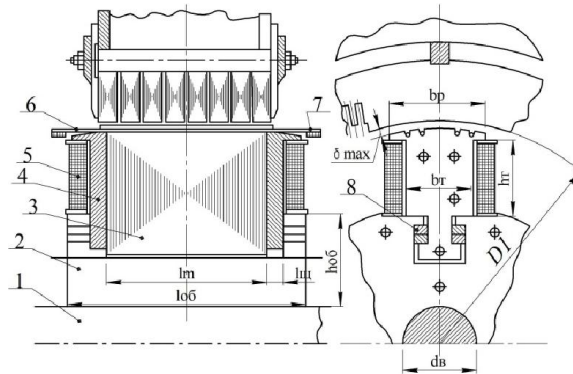
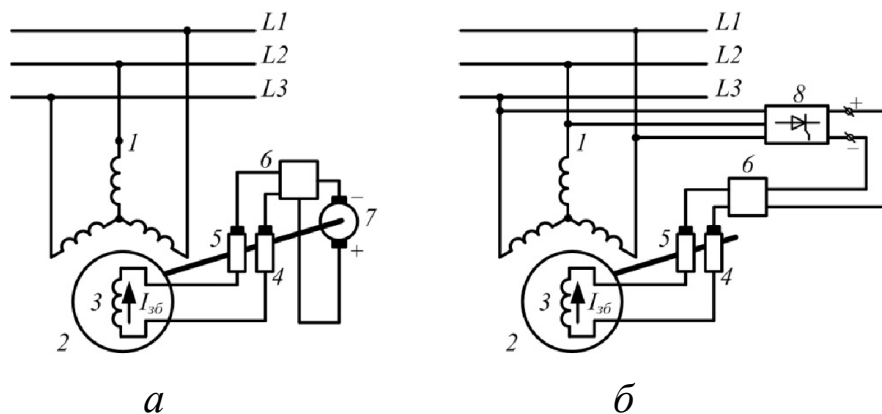


Рисунок 10.5 – Полус синхронної машини

Збудження синхронних машин здійснюють генератором постійного струму паралельного збудження – збудника, який встановлено на валу ротора (рисунок 10.6, а), або за допомогою напівпровідникового випрямлювача, що приєднаний до обмотки статора (рисунок 10.6, б)



1 – обмотка статора; 2 – ротор; 3 – обмотка збудження; 4 – кільця; 5 – щітки; 6 – регулювальний реостат; 7 – збуджувач; 8 – випрямляч.

а – живлення обмотки збудження від збуджувача; б – живлення обмотки збудження від випрямляча

Рисунок 10.6 – Схеми включення синхронних машин

У генераторах потужністю сотні тисяч кіловат і більше часто збуджувач є генератором постійного струму з незалежним збудженням, обмотку збудження якого живить підзбуджувач – невеликий генератор постійного струму паралельного збудження, що знаходиться на одному валу з СМ і збуджувачем.

Останнім часом широко застосовують живлення обмотки збудження від напівпровідникового випрямляча як у двигунах і генераторах невеликої і середньої потужності, так і в потужних турбо- і гідрогенераторах. Струм збудження регулюють вручну регулювальним реостатом, увімкненим у коло обмотки збудження, або автоматично спеціальними регуляторами.

2 Збудження синхронних генераторів

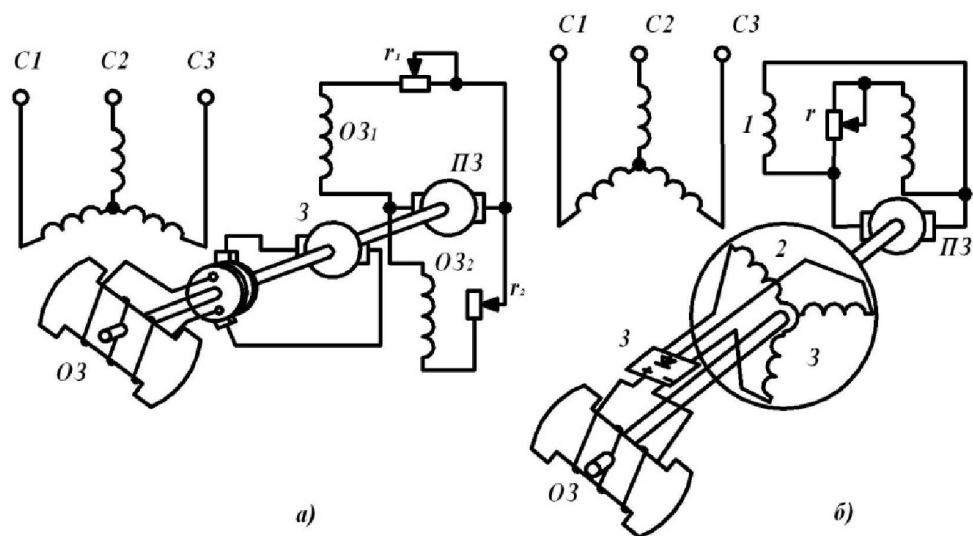
При розгляді принципу дії синхронного генератора було встановлено, що на роторі синхронного генератора розташовано джерело МРС (індуктор), що створює в генераторі магнітне поле. За допомогою приводного двигуна (ПД) ротор генератора приводиться в обертання з синхронною частотою n_1 . При цьому магнітне поле ротора також обертається і, зчіплюючись з обмоткою статора, наводить в ній ЕРС.

Синхронні двигуни конструктивно майже не відрізняються від синхронних генераторів. Вони також складаються із статора з обмоткою і ротора. Тому незалежно від режиму роботи будь-яка синхронна машина має потребу в процесі збудження – наведення в ній магнітного поля.

Основним способом збудження синхронних машин є електромагнітне збудження, суть якого полягає в тому, що на полюсах ротора розташовують обмотку збудження. При проходженні по цій обмотці постійного струму виникає МРС збудження, яка наводить в магнітній системі машини магнітне поле.

До останнього часу для живлення обмотки збудження застосовувалися спеціальні генератори постійного струму незалежного

збудження, звані збудниками (З), обмотка збудження якого (ОЗ) отримувала живлення постійного струму від іншого генератора (паралельного збудження), званого підзбудником (ПЗ). Ротор синхронної машини і якоря збудника і підзбудника розташовуються на загальному валу і обертаються одночасно. При цьому струм в обмотку збудження синхронної машини поступає через контактні кільця і щітки. Для регулювання струму збудження застосовують регульовальні реостати, що включаються в колі збудження збудника (r_1) і підзбудника (r_2) (рисунок 10.7).



а – контактна; б – безконтактна

Рисунок 10.7 – системи електромагнітного збудження синхронних генераторів

В синхронних генераторах середньої і великої потужності процес регулювання струму збудження автоматизують.

В синхронних генераторах великої потужності – турбогенераторах – іноді як збудник застосовують генератори змінного струму індукторного типу. На виході такого генератора включають напівпровідниковий випрямляч.

Регулювання струму збудження синхронного генератора в цьому випадку здійснюється зміною збудження індукторного генератора.

Отримала застосування в синхронних генераторах безконтактна система електромагнітного збудження, при якій синхронний генератор не має контактних кілець на роторі.

Як збудник і в цьому випадку застосовують генератор змінного струму (рисунок 10.7, б), у якого обмотка 2, в якій наводиться ЕРС (обмотка якоря), розташована на роторі, а обмотка збудження 1 розташована на статорі. В результаті обмотка якоря збудника і обмотка збудження синхронної машини виявляються такими, що обертаються, і їх електричне з'єднання здійснюється безпосередньо, без контактних кілець і щіток. Але оскільки збудник є генератором змінного струму, а обмотку збудження необхідно живити постійним струмом, то на виході обмотки якоря збудника включають напівпровідниковий перетворювач 3, закріплений на валу синхронної машини і такий, що обертається разом з обмоткою збудження синхронної машини і обмоткою якоря збудника. Живлення постійним струмом обмотки збудження 1 збудника здійснюється від підзбудника (ПВ) — генератора постійного струму.

Відсутність ковзаючих контактів в колі збудження синхронної машини дозволяє підвищити її експлуатаційну надійність і збільшити ККД.

У синхронних генераторах, зокрема гідрогенераторах, набув поширення принцип самозбудження (рисунок 10.7, а), коли енергія змінного струму, необхідна для збудження, відбирається від обмотки статора синхронного генератора і через знижувальний трансформатор і випрямний напівпровідниковий перетворювач (VCD) перетворюється в енергію постійного струму. Принцип самозбудження заснований на тому, що первинне збудження генератора відбувається за рахунок залишкового магнетизму магнітопроводу машини.

На рисунку 10.8, б представлена структурна схема автоматичної системи самозбудження синхронного генератора (СГ) з випрямним трансформатором (TV2) і тиристорним перетворювачем (VCS), через яких електроенергія змінного струму з ланцюга статора СГ після перетворення в постійний струм подається в обмотку збудження. Управління тиристорним перетворювачем здійснюється за допомогою автоматичного регулятора збудження АРЗ, на вхід якого поступають сигнали напруги на виході СГ (через трансформатор напруги TV1) і струму навантаження СГ (від трансформатора струму ТА). Схема містить блок захисту БЗ, що забезпечує захист

обмотки збудження і тиристорного перетворювача від перенапружень і струмового перевантаження.

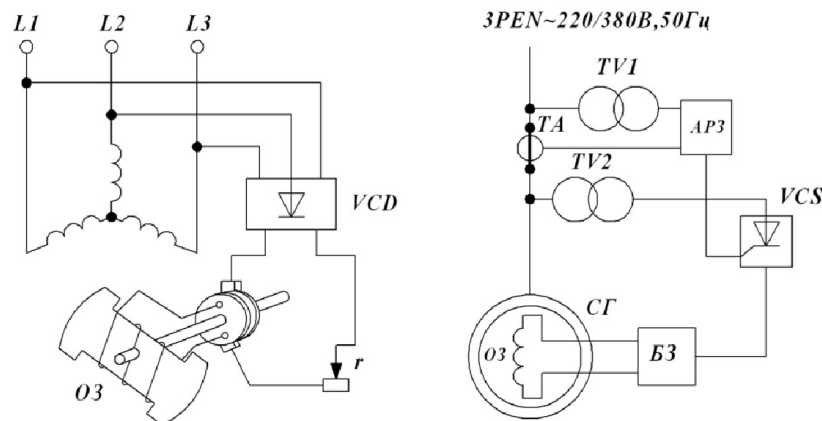


Рисунок 10.8 – Принцип самозбудження синхронних генераторів

У сучасних синхронних двигунах для збудження застосовують збудливі пристрої тиристорів, що включаються в мережу змінного струму і здійснюють автоматичне управління струмом збудження у всіляких режимах роботи двигуна, у тому числі і перехідних. Такий спосіб збудження є найбільш надійним і економічним, оскільки ККД збуджуючих пристроїв тиристорів вище, ніж у генераторів постійного струму. Промисловістю випускаються збудливі пристрої тиристорів на різну напругу збудження з допустимим значенням постійного струму 320 А.

Найбільшого поширення в сучасних серіях синхронних двигунів набули збудливі пристрої тиристорів типів ТЕ8-320/48 (напруга збудження 48 В) і ТЕ8-320/75 (напруга збудження 75 В). Потужність, що витрачається на збудження, зазвичай складає від 0,2 до 5% корисної потужності машини (менше значення відноситься до машин великої потужності).

В синхронних машинах малої потужності знаходить застосування принцип збудження постійними магнітами, коли на роторі машини розташовуються постійні магніти. Такий спосіб збудження дає можливість позбавити машину від обмотки збудження. В результаті конструкція машини спрощується, стає більш економічною і надійною. Проте із-за дефіцитності матеріалів для виготовлення постійних магнітів з великим запасом магнітної енергії і складності їх обробки застосування збудження постійними магнітами обмежується лише машинами потужністю не більше декількох кіловат

3 Реакція якоря синхронного генератора

Електромагнітні процеси в синхронних генераторах на холостому ході. У режимі холостого ходу синхронної машини, тобто за відсутності струму I_1 в обмотці статора, магнітне поле створюється лише МРС обмотки збудження $F_{з60}$. Форма графіка розподілу індукції в зазорі явнополюсної машини в цьому випадку залежить від конфігурації полюсних наконечників полюсів ротора. Для надання цієї кривої форми, близької до синусоїдальної, повітряний зазор роблять нерівномірним, збільшуючи його на краях полюсних наконечників.

Основний магнітний потік явнополюсної синхронної машини, замикаючись в магнітній системі машини, зчіплюється з обмоткою статора. Як і в асинхронних неявнополюсних машинах, магнітна система явнополюсної синхронної машини є розгалуженою симетричною магнітною системою (рисунок 10.9, а), що складається з $2p$ паралельних гілок. Кожна з таких гілок є нерозгалуженим магнітним ланцюгом, що містить одну пару полюсів (рисунок 10.9, б). Основний магнітний потік Φ , замикаючись в магнітному ланцюзі, проходить ряд ділянок (рисунок 10.10): повітряний зазор δ , зубцевий шар статора h_{z1} , зубцевий шар ротора h_{z2} , полюс ротора h_m , спинку статора L_1 і спинку ротора (обід) $L_{об}$.

Сума магнітної напруги на всіх перерахованих ділянках магнітного ланцюга визначає МРС обмотки збудження на пару полюсів в режимі х.х. (А):

$$F_{60} = \sum F = 2F_{\delta} + 2F_{z1} + 2F_{z2} + 2F_m + F_{c1} + F_{об}, \quad (10.1)$$

де F_{δ} , F_{z1} , F_{z2} , F_m , F_{c1} та $F_{об}$ – відповідно магнітна напруга зазору, зубцевих шарів статора і ротора, полюсів, спинки статора і обода, А.

Порядок розрахунку магнітної напруги на ділянках магнітного ланцюга в принципі такий же, як і при розрахунку магнітного ланцюга асинхронної машини. При розрахунку магнітної напруги полюсів і спинки ротора необхідно мати на увазі, що магнітний потік на цих ділянках дещо більше основного магнітного потоку Φ на величину потоку розсіяння ротора Φ_{σ} що є невеликою частиною за-

гального потоку полюсів Φ_m що не проходить через зазор δ , що замикається в міжполюсному просторі:

$$\Phi_m = \Phi + \Phi_\sigma = \Phi(1 + \Phi/\Phi_\sigma) = \Phi\sigma_m, \quad (10.2)$$

де σ_m – коефіцієнт магнітного розсіювання полюсів ротора.

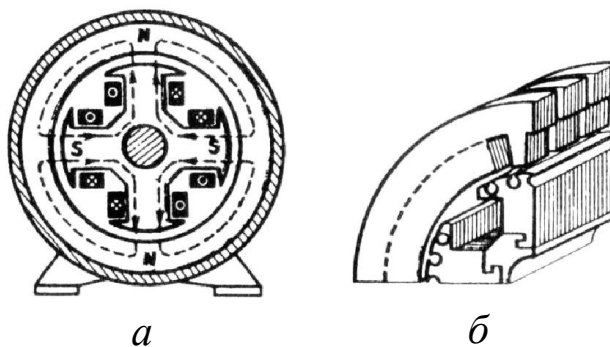


Рисунок 10.9 – Магнітна система явнополюсної синхронної машини

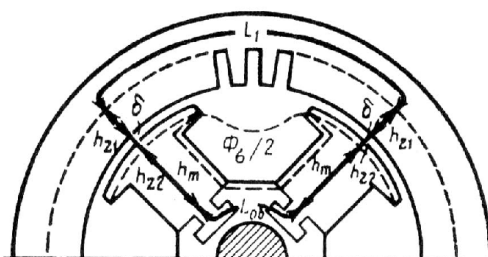


Рисунок 10.10 – Ділянки магнітного ланцюга явнополюсної синхронної машини

Для синхронних явнополюсних машин коефіцієнт

$$\sigma_m = 1 + 0,2 k_{\mu 1} \quad (10.3)$$

де

$$k_{\mu 1} = F_{10} / (2F_\delta) \quad (10.4)$$

– коефіцієнт магнітного насичення осердя статора синхронної машини;

$$F_{10} = 2 F_\delta + 2F_{z1} + F_{c1}$$

– сума магнітної напруги в сердечнику статора і повітряному зазорі, А.

Для синхронних явнополюсних машин коефіцієнт магнітного розсіювання полюсів ротора $\sigma_m = 1,1 \div 1,4$ залежно від ступеня магнітного насичення магнітопроводу машини і числа полюсів (із зростанням числа полюсів $2p$ зменшується міжполюсний простір ротора машини і магнітне розсіювання збільшується). Після розрахунку маг-

нітного ланцюга синхронної машини будують магнітну характеристику машини, аналогічну представленою на рисунку 10.10. Використовуючи МРС обмотки збудження в режимі х.х. F, шляхом додаткових розрахунків визначають МРС обмотки збудження при навантаженні $F_{зб.н}$. Зазвичай $F_{зб.н} = (2,0 \div 2,2) \sum F$.

Набуте значення МРС $F_{зб.н}$ дозволяє розрахувати число витків в полюсній котушці ротора:

$$W_{к.зб.} = F_{зб.н} / (2I_{зб.}), \quad (10.5)$$

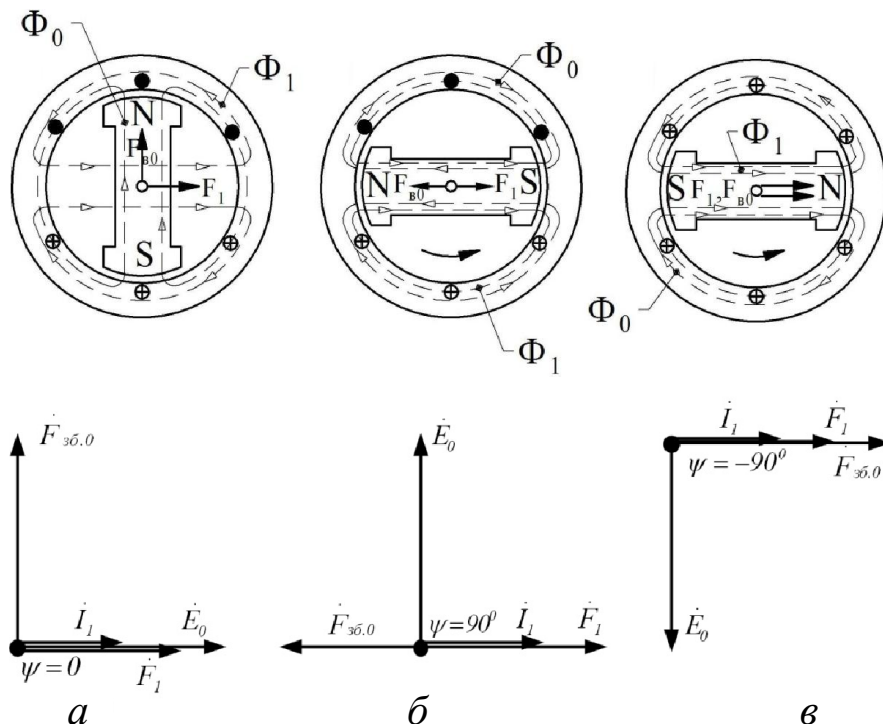
де $I_{зб.}$ – струм в обмотці збудження синхронної машини, А.

В процесі роботи навантаженого синхронного генератора в ній одночасно діють МРС збудження $F_{зб.0}$ і статора (якорі) F_1 , при цьому МРС статора (якорі) впливає на МРС збудження, підсилюючи або послаблюючи поле збудження або ж спотворюючи його форму. Дія МРС обмотки статора (якорі) на МРС обмотки збудження називається реакцією якоря. Реакція якоря робить вплив на робочі властивості синхронної машини, оскільки зміна магнітного поля в машині супроводиться зміною ЕРС, наведеною в обмотці статора, а отже, зміною і рада інших величин, пов'язаних з цією ЕРС. Вплив реакції якоря на роботу синхронної машини залежить від значення і характеру навантаження.

Синхронні генератори, як правило, працюють на змішане навантаження (активно-індуктивну або активно-ємкісну). Але для з'ясування питання про вплив реакції якоря на роботу синхронної машини доцільно розглянути випадки роботи генератора при навантаженнях граничного характеру, а саме: активною, індуктивною і ємкісною. Скористаємося для цього векторними діаграмами МРС. При побудові цих діаграм слід мати на увазі, що вектор ЕРС індукованою магнітним потоком збудження в обмотці статора, відстає по фазі від вектора цього потоку (а отже, і вектора МРС $\dot{F}_{ca.0}$) на 90° . Що ж до вектора струму в обмотці статора I_1 , то він може займати по відношенню до вектора $\dot{A}_{ca.0}$ різні положення, визначувані кутом ψ_1 залежно від виду навантаження.

Активне навантаження ($\psi_1 = 0$). На рисунку 10.11, а представлений статор і ротор двополюсного генератора. На статорі показана час-

тина фазної обмотки. Ротор явнополісний, обертається проти руху годинникової стрілки. У даний момент часу ротор займає вертикальне положення, що відповідає максимуму ЕРС \dot{E}_0 в фазній обмотці. Оскільки струм при активному навантаженні збігається по фазі з ЕРС, то вказане положення ротора відповідає також і максимуму струму. Зобразивши лінії магнітної індукції поля збудження (ротора) і лінії магнітної індукції поля обмотки статора, бачимо, що МРС статора \dot{F}_1 направлена перпендикулярно МРС збудження $\dot{F}_{\text{зд}0}$. Цей висновок також підтверджується векторною діаграмою, побудованою для цього ж випадку. Порядок побудови цієї діаграми наступний: відповідно до просторового положення ротора генератора проводимо вектор МРС збудження $\dot{F}_{\text{зд}0}$; під кутом 90° до цього вектора у бік відставання проводимо вектор ЕРС \dot{E}_0 наведеною магнітним полем збудження в обмотці статора; при підключенні чисто активного навантаження струм в обмотці статора \dot{I}_1 збігається по фазі з ЕРС \dot{E}_0 а тому вектор МРС \dot{F}_1 створений цим струмом, зрушений в просторі щодо вектора $\dot{F}_{\text{зд}0}$ на 90° .



a – активне навантаження; *б* – індуктивне навантаження;
в – ємнісне навантаження

Рисунок 10.11 – Реакція якоря синхронного генератора

Така дія МРС статора (якорі) F_1 на МРС збудження $F_{\dot{\alpha}0}$ викличе спотворення результуючого поля машини: магнітне поле машини ослабляється під набігаючим краєм полюса і посилюється під збігаючим краєм полюса (рисунок 10.11). Унаслідок насичення магнітного ланцюга результуюче магнітне поле машини декілька ослабляється. Пояснюється це тим, що розмагнічування набігаючих країв полюсних наконечників і ділянок зубцевого шару статора, що знаходяться над ними, відбувається безперешкодно, а підмагнічування збігаючих країв полюсних наконечників і ділянок зубцевого шару статора, що знаходяться над ними, обмежується магнітним насиченням цих елементів магнітного ланцюга. У результаті результуючий магнітний потік машини ослабляється, тобто магнітна система декілька розмагнічується. Це веде до зменшення ЕРС машини E_1 .

Індуктивне навантаження ($\psi_1 = 90^\circ$). При чисто індуктивному навантаженні генератора струм статора i_1 відстає по фазі від ЕРС A_0 на 90° . Тому він досягає максимального значення лише після повороту ротора вперед на 90° щодо його положення, відповідного максимуму ЕРС A_0 (рисунок 10.11). При цьому МРС F_1 діє уздовж осі полюсів ротора зустрічно МРС збудження $F_{\dot{\alpha}0}$. У цьому ми також переконуємося, побудувавши векторну діаграму.

Таку дію МРС статора F_1 послаблює поле машини. Отже, реакція якоря в синхронному генераторі при чисто індуктивному навантаженні надає подовжньо-розмагнічуючу дію.

На відміну від реакції якоря при активному навантаженні в даному випадку магнітне поле не спотворюється.

Ємнісне навантаження ($\psi = -90^\circ$). Оскільки струм i_1 при ємнісному навантаженні випереджає по фазі ЕРС A_0 на 90° , то свого більшого значення він досягає раніше, ніж ЕРС, тобто коли ротор займе положення, показане на рисунку 5.15, в, магніторушійна сила статора F_1 так само, як і у попередньому випадку, діє по осі полюсів, але тепер уже згідно з МРС збудження $F_{\dot{\alpha}0}$.

При цьому відбувається посилення магнітного поля збудження. Таким чином, при чисто ємкісному навантаженні синхронного генератора реакція якоря надає дію, що подовжньо-намагнічує. Магнітне поле при цьому не спотворюється.

Змішане навантаження. При змішаному навантаженні синхронного генератора струм статора i_1 зміщений по фазі відносно ЕРС A_0 на кут ψ_1 , значення якого знаходяться в межах $0 < \psi_1 < \pm 90^\circ$. Для з'ясування питання про вплив реакції якоря при змішаному навантаженні скористаємося діаграмами МРС, представленими на рисунку 10.12.

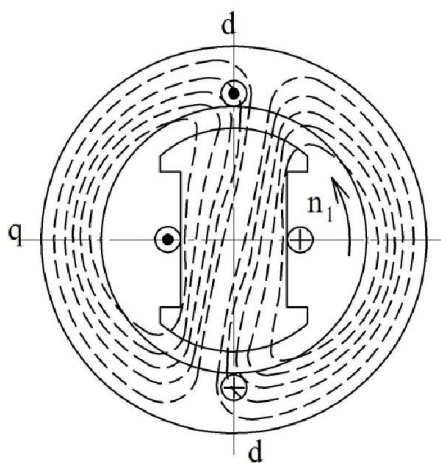


Рисунок 10.12 – Магнітне поле синхронного генератора при активному навантаженні

При активно-індуктивному навантаженні (рисунок 10.13, а) вектор F_1 відстає від вектора A_0 на кут $0 < \psi_1 < 90^\circ$. Розкладемо вектор F_1 на тих, що залишають: подовжню складову МРС статора $F_{1d} = F_1 \sin \psi_1$ і поперечну складову МРС статора $F_{1q} = F_1 \cos \psi_1$. Таке ж розкладання МРС якоря F_1 на складові можна зробити у разі активно-ємкісного навантаження (рисунок 10.13 б). Поперечна складова МРС статора F_{1q} , МРС реакції якоря, що є, по поперечній осі, пропорційна активній складовій струму навантаження $I_q = I_1 \cos \psi$, тобто

$$F_{1q} = F_1 \cos \psi_1, \quad (10.6)$$

а подовжня складова МРС статора (якоря) F_{1d} МРС, що є реакцією якоря по подовжній осі, пропорційна реактивній складовій струму навантаження $I_d = I_1 \sin \psi_1$, тобто

$$F_{1d} = F_1 \sin \psi_1 \quad (10.7)$$

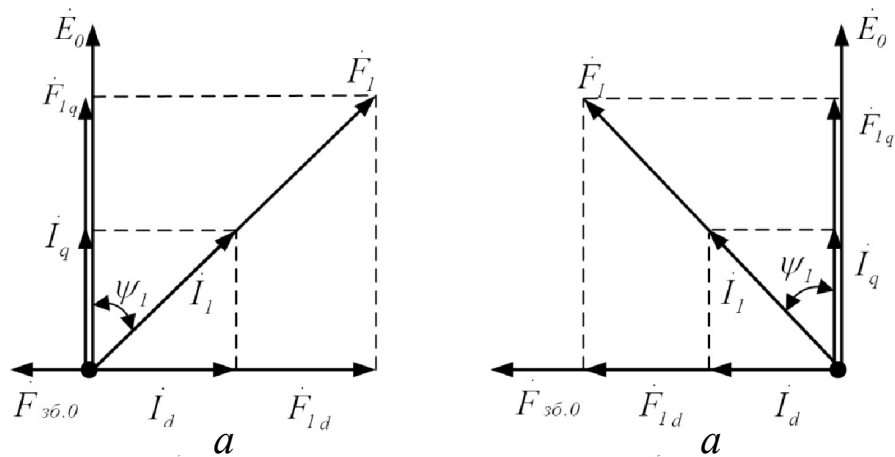


Рисунок 10.13 – Реакція якоря при змішаному навантаженні

При цьому якщо реактивна складова струму навантаження відстає по фазі від ЕРС \dot{A}_0 (навантаження активно-індуктивне), то МРС F_{1d} розмагнічує генератор, якщо ж реактивна складова струму i_d випереджає по фазі ЕРС \dot{A}_0 (навантаження активно-ємкісне), то МРС F_{1d} підмагнічує генератор.

Напрямок вектора F_{1d} щодо вектора $F_{\dot{a}0}$ визначається характером реакції якоря, який при струмі навантаження i_1 що відстає по фазі від ЕРС \dot{A}_0 є таким, що розмагнічує, а при струмі i_1 що випереджає по фазі ЕРС \dot{A}_0 – що підмагнічує.

4 Характеристики синхронного генератора

Властивості синхронного генератора визначаються характеристиками холостого ходу, короткого замикання, зовнішніми і регулювальними.

Характеристика *холостого ходу синхронного генератора* є графіком залежності напруги на виході генератора в режимі х.х. $U_1 = E_0$ від струму збудження $I_{z\delta.0}$ при $n_1 = const$. Схема включення синхронного генератора для зняття характеристики х.х. приведена на рисунку 10.14, а. Якщо характеристики х.х. різних синхронних генераторів зобразити у відносних одиницях $E^* = f(I_{z\delta}^*)$, то ці характеристики мало відрізняються одна від одної і будуть дуже схо-

жими з нормальною характеристикою х.х. (рисунок 10.14, б), яку використовують при розрахунках синхронних машин:

$$E^* \quad 0,58 \quad 1,0 \quad 1,21 \quad 1,33 \quad 1,40 \quad 1,46 \quad 1,51$$

$$I_{зб}^* \quad 0,5 \quad 1,0 \quad 1,5 \quad 2,0 \quad 2,5 \quad 3,0 \quad 3,5$$

Тут $E^* = E_0 / U_{1ном}$ – відносна ЕРС фази обмотки статора;

$I_{зб}^* = I_{зб0} / I_{зб0ном}$ – відносний струм збудження;

$I_{зб0ном}$ – струм збудження в режимі х.х., відповідний ЕРС х.х.

$$E_0 = U_{1ном}$$

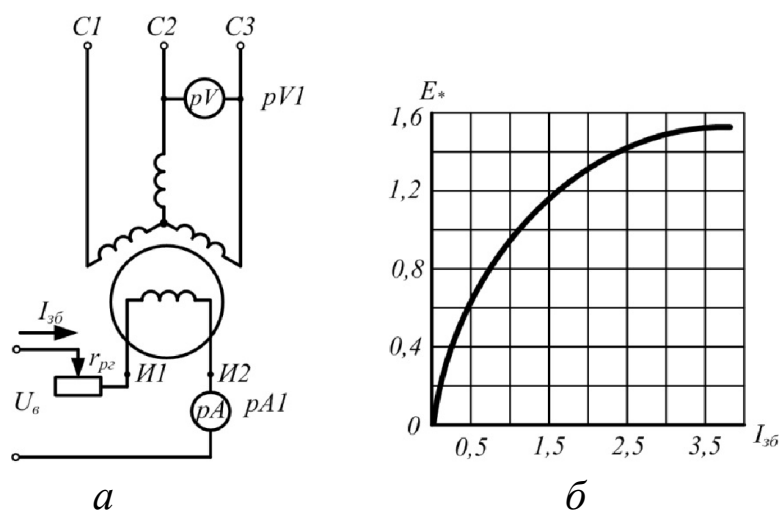


Рисунок 10.14 – Дослід холостого ходу синхронного генератора

Характеристика короткого замикання. Характеристики трифазного к.з. отримують таким чином: виводи обмотки статора замикають накоротко (рисунок 10.15, а) і при обертанні ротора з частотою обертання n_1 поступово збільшують струм збудження до значення, при якому струм к.з. перевищує номінальний робочий струм обмотки статора не більше ніж на 25% ($I_{1к} = 1,25I_{1ном}$). Оскільки в цьому випадку ЕРС обмотки статора має значення, у декілька разів менше, ніж в робочому режимі генератора, і, отже, основний магнітний потік дуже малий, то магнітний ланцюг машини виявляється ненасиченим. З цієї причини характеристика к.з. є прямою лінією (рисунок 10.15, б). Активний опір обмотки статора невеликий в порівнянні з її індуктивним опором, тому, приймаючи $r \approx 0$, можна вважати, що при досліді к.з. навантаження синхронного генератора (його власної обмотки) є чисто індуктивним. З цього виходить, що

при досліді к.з. реакція якоря синхронного генератора має поздовжньо-розмагнічуючий характер.

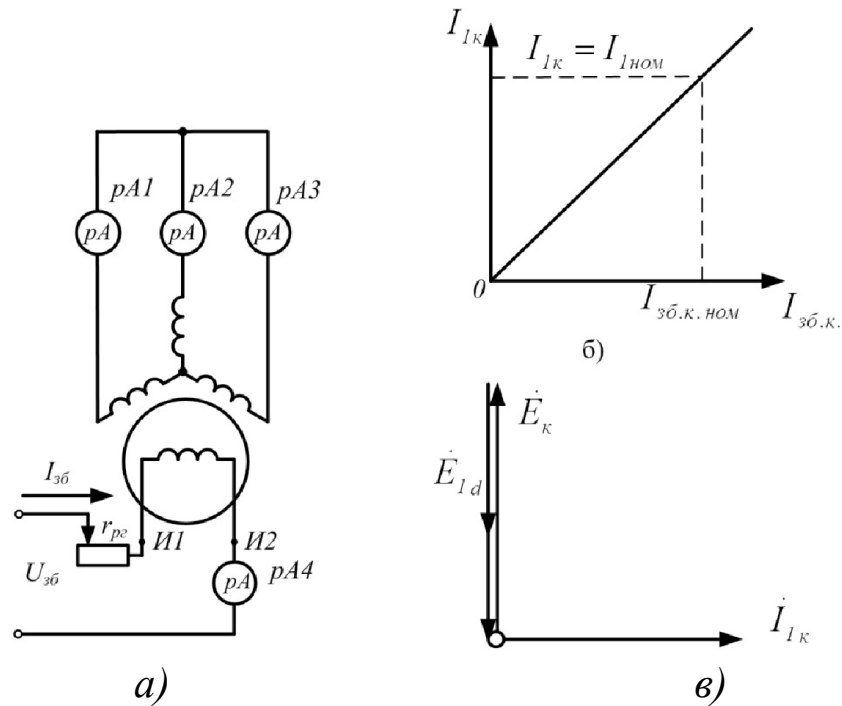


Рисунок 10.15 – Дослід короткого замикання синхронного генератора

Векторна діаграма, побудована для генератора при досліді трифазного к.з., представлена на рисунку 10.15, в. З діаграми видно, що ЕРС \dot{A}_e індукована в обмотці статора, повністю врівноважується ЕРС поздовжньої реакції якоря $\dot{A}_{ld} = -j^2_d \delta_{ad}$ і ЕРС розсіювання $\dot{A}_{\sigma 1} = -j^2_1 \delta_1$.

При цьому МРС обмотки збудження має як би дві складові: одна компенсує падіння напруги $j^2_1 \delta_1$ а інша компенсує розмагнічуючий вплив реакції якоря $j^2_d \delta_{ad}$.

Характеристики к.з. і х.х. дають можливість визначити значення струмів збудження, відповідні вказаним складовим МРС збудження. З цією метою характеристики х.х. і к.з. будують в одних осях, при цьому на вісі ординат відзначають відносні значення напруги х.х. $E^* = E_0 / U_{I_{ном}}$ і струму к.з. $I_{k*} = I_{lk} / I_{I_{ном}}$. На вісі ординат відкладають відрізок ОВ, що виражає в масштабі напруги відносне значення ЕРС розсіювання $\dot{A}_{\sigma 1}^* = -j^2_1 \delta_1 / U_{l_{ii}}$. Потім точку В

зносять на характеристику х.х. (точка В') і опускають перпендикуляр В'D на вісь абсцис. Отримана точка D розділила струм збудження $I_{зб0ном}$ на дві частини: $I_{збх}$ – струм збудження, необхідний для компенсації падіння напруги $j^2_1 \delta_1$ і $j_{сід}$ – струм збудження, що компенсує поперечно-розмагнічуючу реакцію якоря.

Один з важливих параметрів синхронної машини – відношення короткого замикання (ВКЗ), яке є відношенням струму збудження $I_{зб0ном}$, відповідного номінальній напрузі при х.х., до струму збудження $I_{зб.к.ном}$ відповідному номінальному струму статора при досліді к.з. (рисунок 10.15, б):

$$\hat{I} \hat{E}_C = \frac{2}{\cos \delta} \frac{I_{зб0ном}}{I_{зб.к.ном}} \quad (10.8)$$

Для турбогенераторів $ВКЗ = 0,4 \dots 0,7$; для гідрогенераторів $ОКЗ = 1,0 \dots 1,4$.

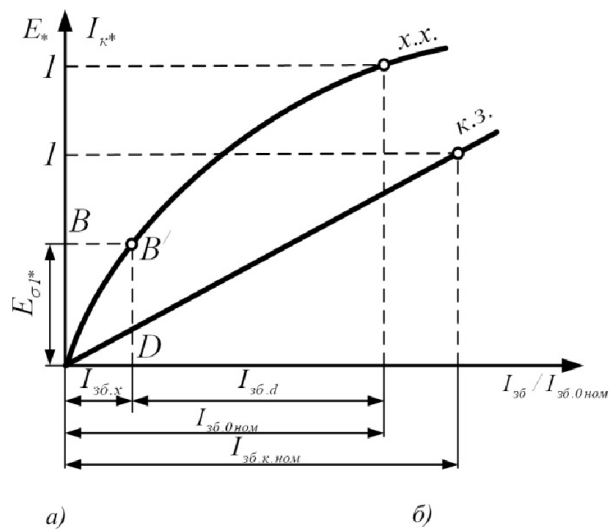


Рисунок 10.16 – Визначення складових струму к.з.

$ВКЗ$ має велике практичне значення при оцінці властивостей синхронної машини: машини з малим $ВКЗ$ менш стійкі при паралельній роботі, мають значні коливання напруги при змінах навантаження, але такі машини мають менші габарити і, отже, мають меншу вартість, ніж машини з великим $ВКЗ$.

Зовнішня характеристика - залежність напруги на виводах обмотки статора від струму навантаження: $U_1 = f(I_1)$ при $I_{зб} = const$; $\cos \varphi_1 = const$; $n_1 = n_{ном} = const$. На рисунку 10.17, а представлені

зовнішні характеристики, відповідні різним по характеру навантаженням синхронного генератора.

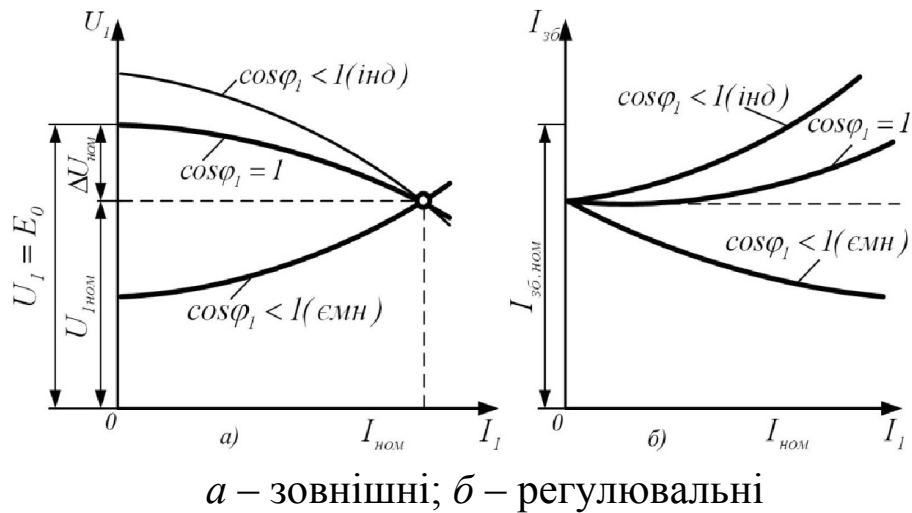


Рисунок 10.17 – Характеристики синхронного генератора

При активному навантаженні ($\cos\varphi_1=1$) зменшення струму навантаження I_1 супроводжується зростанням напруги U_1 , що пояснюється зменшенням падіння напруги в обмотці статора і ослабленням розмагнічуючої дії реакції якоря по поперечній вісі. При індуктивному навантаженні ($\cos\varphi_1 < 1$; інд.) збільшення U_1 при скиданні навантаження інтенсивніше, оскільки із зменшенням струму I_1 послаблюється розмагнічуюча дія подовжньої складової реакції якоря. Проте у разі ємкісного навантаження генератора ($\cos\varphi_1 < 1$; ємн.) зменшення I_1 супроводжується зменшенням напруги U_1 , що пояснюється ослабленням підмагнічуючої дії подовжньої складової реакції якоря.

Зміна напруги синхронного генератора, викликана скиданням номінального навантаження при $I_{зб} = const$ і $n_1 = const$, називається номінальною зміною (підвищенням) напруги (%):

$$\Delta U_{iii} = \frac{A_0 - U_{iii}}{U_{iii}} \cdot 100 \quad . \quad (10.9)$$

При ємкісному навантаженні генератора скидання навантаження викликає зменшення напруги, а тому ΔU_{iii} має знак негативний знак.

В процесі експлуатації синхронного генератора напруга U_1 при коливаннях навантаження підтримується незмінною за допомогою швидкодіючих автоматичних регуляторів. Проте щоб

уникнути пошкодження ізоляцій обмотки ΔU_{ii} не повинно перевищувати 50%.

Регулювальна характеристика показує, як слід змінювати струм збудження генератора при зміні навантаження, щоб напруга на затисках генератора залишалася незмінною: $I_{z\delta} = f(I_1)$ при $U_1 = U_{I_{ном}} = const$; $n_1 = n_{ном} = const$ та $\cos\varphi_1 = const$. На рисунку 10.16, б наведені регулювальні характеристики синхронного генератора. При активному навантаженні ($\cos\varphi_1 = 1$) збільшення струму навантаження супроводжується зниженням напруги U_1 , тому слід підвищувати струм збудження. Індуктивний характер навантаження ($\cos\varphi_1 < 1$; інд.) викликає більш різке зниження напруги U_1 (рисунки 10.16, а), тому струм збудження $I_{z\delta}$ необхідний для підтримки $U_1 = U_{I_{ном}}$ слід підвищувати в більшій ступені. При ємнісному навантаженні ($\cos\varphi_1 < 1$; ємн.) збільшення навантаження супроводжується зростанням напруги U_1 , тому для підтримки $U_1 = U_{I_{ном}}$ струм збудження $I_{z\delta}$ необхідно зменшувати.

5 Синхронні двигуни і компенсатори

Синхронні двигуни. Відповідно до принципу оборотності електричних машин синхронна машина може працювати не тільки в режимі генератора, але і в режимі двигуна, тобто споживати з мережі електричну енергію і перетворювати її в механічну.

Для пояснення принципу роботи синхронного двигуна уявимо собі синхронний генератор, включений на паралельну роботу в мережу великої потужності.

Припустимо, приводний двигун обертає ротор генератора проти годинникової стрілки з кутовою швидкістю ω_1 . При цьому навантаження генератора таке, що подовжня вісь полюсів ротора $d-d$ зміщена щодо осі поля, що обертається $d'-d'$ на кут θ' у напрямі обертання ротора (рисунки 10.18, справа). Момент приводного двигуна, що обертає M'_1 врівноважується сумою електромагнітного моменту генератора M' і моменту х.х. M_0 ($M'_1 = M' + M_0$). На кутівій характеристиці цього режиму генератора відповідає точка Р.

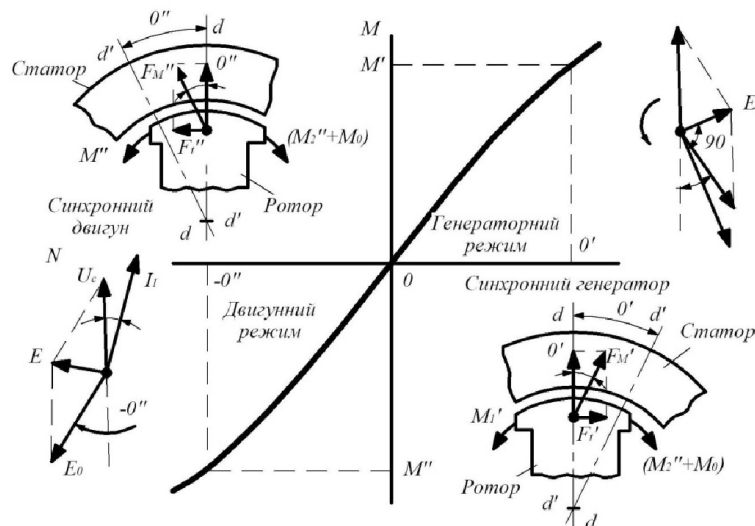


Рисунок 10.18 – Перехід синхронної машини з генераторного режиму в режим двигуна

Якщо зменшувати момент, що обертає M_1 , то навантаження генератора почне також зменшуватися, при цьому зменшуватиметься кут θ' а отже, і струм статора I_1). У результаті знизиться величина електромагнітного моменту M' і при моменті, що обертає $M_1 = M_0$ кут $\theta = 0$, тобто генератор працюватиме в режимі х. х. ($I_1 = 0$) і ЕРС генератора E_0 опиниться в протифазі з напругою мережі U_c . Цьому режиму на кутовій характеристиці відповідає точка перетину осей координат (точка О на рисунку 10.18).

Якщо ж вал синхронної машини від'єднати від приводного двигуна і створити на цьому валу гальмівний момент, тобто момент навантаження M_2 , направлений зустрічно обертанню ротора машини, то відбудеться зсув вектора ЕРС \dot{E}_0 на кут $-\theta$ щодо його положення в режимі х. х. у бік відставання (рисунку 10.18, зліва).

При цьому в колі обмотки статора з'явиться результуюча ЕРС $\Delta \dot{E} = \dot{E}_0 + \dot{U}_c$ яка створить в обмотці статора струм i_1 що відстає по фазі від ЕРС ΔE на кут 90° (передбачається $r_1 \approx 0$) і що відстає по фазі від напруги мережі \dot{U}_{ce} на кут φ_1 (у генераторному режимі струм i_1 відстає по фазі від ЕРС E_0 на кут ψ_1).

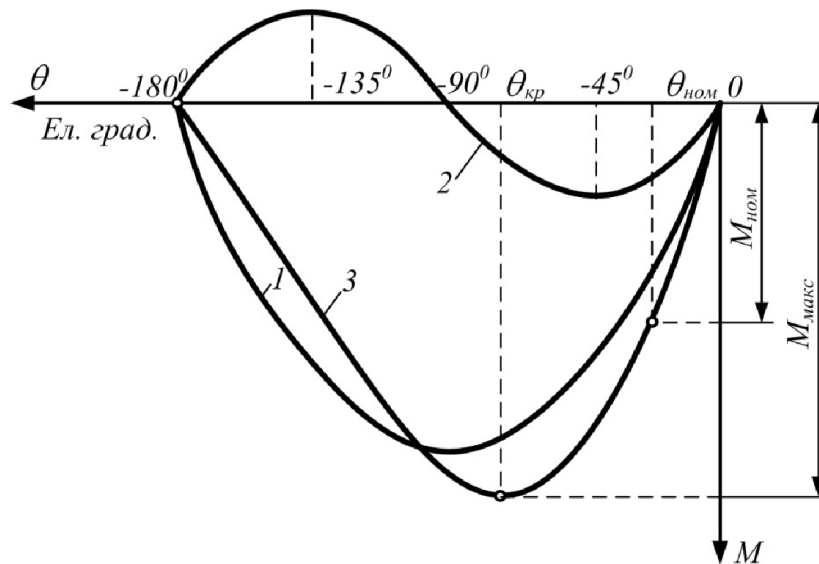


Рисунок 10.19 – Кутова характеристика синхронного двигуна

Струм I_1 створює магнітне поле, що обертається синхронно з ротором, вісь якого $d' - d'$ зміщена щодо подовжньої осі полюсів ротора $d' - d'$ на кут θ . Припустимо, робота двигуна відбувається в режимі точки Д на кутовій характеристиці (рисунок 10.19, зліва), що відповідає куту $-\theta''$. Виниклі при цьому тангенціальні складові сил магнітної взаємодії полюсів $F_t'' = F_M'' \sin \theta''$ створять на роторі двигуна електромагнітний момент M'' , направлений згідно з магнітним полем, що обертає, і ротор, що приводить, в обертання з синхронною частотою ω_1 .

При цьому синхронна машина споживатиме з мережі електричну енергію і перетворювати її в механічну енергію обертання. Електромагнітний момент M'' , що обертає, долає момент х. х. M_0 і створює на валу двигуна корисний момент M_2'' під дією якого приводиться в обертання виконавчий механізм:

$$M' = M_0 + M_2'' \quad (10.10)$$

Всі значення моменту на кутовій характеристиці синхронного двигуна відкладаються в негативному напрямі осі ординат, оскільки під час переходу синхронної машини з генераторного режиму в руховий електромагнітний момент міняє свій напрям. Також негативною стає потужність синхронного двигуна, яка поступає з мережі в машину, а не з машини в мережу, як це відбувається в генераторному режимі. Операція з негативними значеннями потужностей і моментів украй незручно, тому при розгляді синхронних двигунів умовно

приймаємо моменти і потужності позитивними, пам'ятаючи при цьому викладене раніше про напрям цих параметрів.

Кутові характеристики електромагнітного моменту $M = f(\theta)$ і його складових $M_{осн} = f(\theta)$ і $M_p = f(\theta)$ представлені на рисунку 10.19. Ці характеристики відрізняються від кутових характеристик генератора лише тим, що розташовуються в третьому квадранті осей координат, тобто визначаються негативними значеннями кутів θ і моментів M і $M_{осн}$ а також моменту M_p при $\theta = 0 \div (-90^\circ)$.

Таким чином, в загальному вигляді кутова характеристика синхронної машини є двома півхвилями результуючого моменту M : позитивну, відповідну генераторному режиму роботи, і негативну, відповідну руховому режиму роботи (рисунком 10.19). Перехід машини з одного режиму роботи в інший відбувається при $\theta = 0$.

Стійка робота синхронного двигуна відповідає ділянці кутвої характеристики при $\theta = 0 \div (\theta_{кр})$.

Відношення максимального електромагнітного моменту M_{max} до номінального $M_{ном}$ визначає перевантажувальну здатність синхронного двигуна

$$\lambda = I_{max} / M_{ii} . \quad (10.11)$$

Зазвичай перевантажувальна здатність синхронних двигунів $\lambda = 2 \div 3$ що при номінальному навантаженні двигуна відповідає $\theta_{ном} = 30 \div 20$ ел. град.

Ротор синхронного двигуна може обертатися тільки з синхронною частотою $n_1 = f_1 60 / p$. Щоб переконатися в цьому, досить припустити, що ротор двигуна почне обертатися з частотою $n_2 < n_1$. У якийсь момент часу намагнічені полюси ротора розташуються проти однойменних полюсів магнітного поля статора, що обертається, і тоді порушиться магнітний зв'язок між намагніченими полюсами ротора і полюсами поля статора, що обертається, оскільки їх однойменні полюси взаємно відштовхуватимуться і ротор, переставши випробовувати стійку дію електромагнітного моменту, що обертає, зупиниться.

Обертання ротора синхронних двигунів тільки з синхронною частотою складає характерну особливість цих двигунів і часто визначає сферу їх застосування (наприклад, для приводу пристроїв, що вимагають стабільної частоти обертання).

При змінах навантаження на валу синхронного двигуна міняється кут θ . При цьому ротор унаслідок інерції мас агрегату, що обертаються, не відразу займає положення, відповідні новому навантаженню, а якийсь час здійснює коливальні рухи. Таким чином, в синхронному двигуні, так само як і в генераторі, мають місце .

По своїй конструкції синхронні двигуни в принципі не відрізняються від синхронних генераторів, але все таки мають деякі особливості. Їх виготовляють переважно явнополюсними з $2p = 6 \div 24$ полюсів; повітряний зазор роблять меншим, ніж в генераторах такої ж потужності, що сприяє поліпшенню ряду параметрів двигуна, зокрема зменшенню пускового струму; демпферну (заспокійливу) обмотку виконують стрижнями більшого перетину, оскільки при пуску двигуна вона є пусковою обмоткою; ширина полюсного наконечника досягає $0,9\tau$ замість $0,7\tau$ у генераторах. Тому, не дивлячись на властивість оборотності, синхронні машини, що випускаються промисловістю, мають зазвичай цільове призначення — або це синхронні генератори, або синхронні двигуни.

Пуск синхронного двигуна безпосереднім включенням в мережу неможливий, оскільки ротор із-за своєї значної інерції не може бути відразу захоплений полем статора, що обертається, частота обертання якого встановлюється миттєво. В результаті стійкий магнітний зв'язок між статором і ротором не виникає. Для пуску синхронного двигуна доводиться застосовувати спеціальні способи, суть яких полягає в попередньому приведенні ротора в обертання до синхронній або близькій до неї частоті, при якій між статором і ротором встановлюється стійкий магнітний зв'язок.

В даний час практичне застосування має спосіб пуску, що отримав назву асинхронну. Цей спосіб пуску можливий за наявності в полюсних наконечниках ротора пускової обмотки (клітки), аналогічній заспокійливій обмотці синхронного генератора. Схема

включення двигуна при цьому способі пуску приведена на рисунок 10.20, *a*. Не збуджений синхронний двигун включають в мережу. Виникле при цьому магнітне поле статора, що обертається, наводить в стрижнях пускової клітки ЕРС, які створюють струми I_2 .

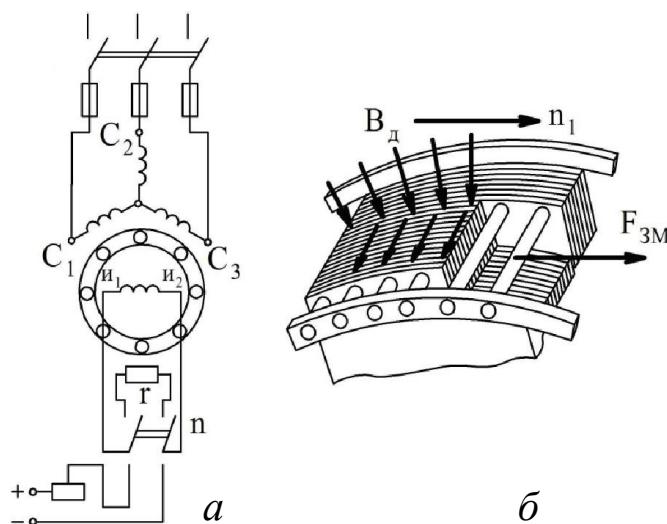


Рисунок 10.20 – Асинхронний пуск синхронного двигуна

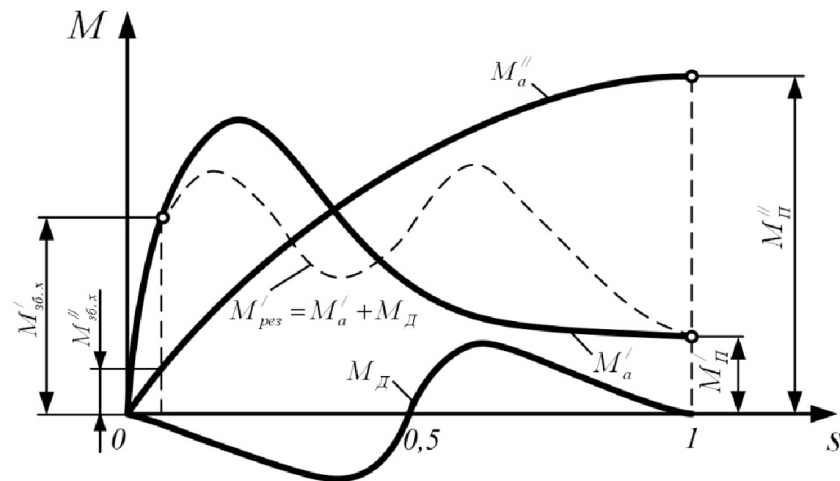
Взаємодія цих струмів з полем статора викликає появу на стрижнях пускової клітки електромагнітних сил F_{Ai} . Під дією цих сил ротор приводиться в обертання (рисунок 10.20, *б*). Після розгону ротора до частоти обертання, близької до синхронної ($n_2 \approx 0,95n_1$) обмотку збудження підключають до джерела постійного струму. Синхронний момент, що утворюється при цьому, втягує ротор двигуна в синхронізм. Після цього пускова обмотка двигуна виконує функцію заспокійливої обмотки, обмежуючи гойдання ротора.

Чим менше навантаження на валу двигуна, тим легше його входження в синхронізм. Явнополюсні двигуни малої потужності, що пускаються без навантаження на валу, іноді входять в синхронізм лише за рахунок реактивного моменту, тобто навіть без включення обмотки збудження.

Із збільшенням моменту навантаження на валу входженню двигуна в синхронізм важко. Найбільший момент навантаження, при якому ротор синхронного двигуна ще втягується і синхронізм, називають моментом входу двигуна в синхронізм M_{ex} . Величина асинхронного моменту M_a при частоті обертання $n_2 \approx 0,95n_1$ залежить

від активного опору пускової клітки, тобто від перетину стрижнів і питомого електричного опору металу, з якого вони виготовлені.

Слід звернути увагу, що вибір опору пускової клітки r_2'' відповідного значному пусковому моменту (M'') сприяє зменшенню моменту входу в синхронізм (M_{ex}'') і, навпаки, при опорі r_2' відповідному невеликому пусковому моменту (M_n'), момент входу в синхронізм збільшується ($M_{\text{ex}}' > M_{\text{ex}}''$) (рисунок 10.21).



M_a – основний момент; M_D – додатковий момент M_{ex} – момент входу в синхронізм

Рисунок 10.21 – Асинхронні моменти при пуску синхронного двигуна

В процесі асинхронного пуску обмотку збудження не можна залишати розімкненою, оскільки магнітний потік статора, що перетинає її в початковий період пуску з синхронною швидкістю, наводить в ній ЕРС. Унаслідок великого числа витків обмотки збудження ця ЕРС досягає значень, небезпечних як для цілості ізоляції самої обмотки, так і для обслуговуючого персоналу. Для запобігання цьому обмотку збудження на період розгону ротора замикають на активний опір r приблизно вдесятеро більше опору обмотки збудження. Перемикання затисків I_1 і I_2 обмотки збудження з опору r на затиски збудника здійснюють перемикачем П (рисунок 10.20, а).

Замикання накоротко обмотки збудження на час пускання двигуна небажано, оскільки при цьому обмотка ротора утворює однофазний замкнутий контур, взаємодія якого з полем статора, що обертається, також створює додатковий асинхронний момент M_D .

Проте при частоті обертання, рівній половині синхронної, цей момент стає гальмуючим (рисунок 10.21) і створює «провал» в характеристиці пускового (асинхронного) моменту (пунктирна крива). Це помітно погіршує пускові властивості синхронного двигуна.

При асинхронному пуску синхронного двигуна виникає значний пусковий струм. Тому пуск синхронних двигунів безпосереднім включенням в мережу на номінальну напругу застосовують при достатній потужності мережі, здатної витримувати без помітного падіння напруги кидки пускового струму п'яти або семикратного значення (в порівнянні з номінальним струмом). Якщо ж потужність мережі недостатня, то можна застосувати пуск двигуна при зниженій напрузі: автотрансформаторний або реакторний.

Синхронні компенсатори. Синхронний компенсатор (СК) є синхронною машиною, призначеною для генерування реактивної потужності. Синхронний компенсатор включають в електричну систему з метою підвищення її коефіцієнта потужності.

Принцип явищ, що відбуваються при цьому, полягає в тому, що необхідну для роботи деяких споживачів реактивну потужність виробляє не синхронний генератор, встановлений на електростанції, а синхронний компенсатор, встановлений в безпосередній близькості до споживача. До споживачів змінного струму, що вимагають значної реактивної потужності, насамперед відносяться асинхронні двигуни. На рисунку 10.22 показана система, що складається з синхронного генератора (СГ), ТРІ, що підвищує, і знижуючого ТРІ трансформаторів, лінії електропередачі (ЛЕП), споживача Z і синхронного компенсатора (СК), включеного безпосередньо на вході споживача. Синхронний компенсатор, включений в мережу, працює як синхронний двигун без навантаження ($P_2 = 0$) тобто в режимі х. х., і при виробляє реактивну потужність $Q_{ск}$ необхідну для роботи споживача Z , наприклад групи асинхронних двигунів. Завдяки цьому реактивна потужність в СГ і ЛЕП доведена до деякого мінімального значення Q_{min} . Це сприяє підвищенню техніко-економічних показників всієї електричної системи.

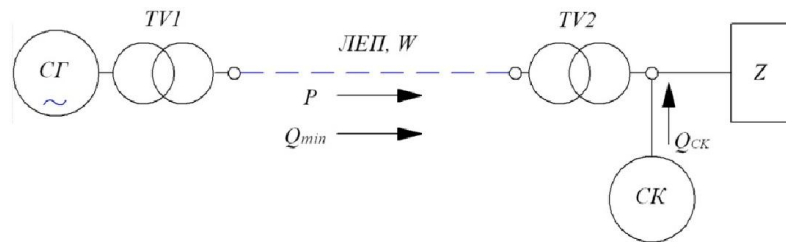


Рисунок 10.22 – Схема включення синхронного компенсатора (СК) в електричну систему

Для пояснення явищ, пов'язаних з підключенням СК до електричної системи, розглянемо рисунок 10.23. При підключенні споживача Z до мережі з напругою U_i (рисунок 10.23, а) в мережі виникає струм i_z , що відстає по фазі від \dot{U}_i на кут φ_z , обумовлений значною індуктивною складовою струму I_z . При підключенні СК паралельно споживачу Z і утворенні в СК режиму перезбудження (рисунок 10.23, б) в мережі з'явиться струм $i_{СК}$, що опереджає напругу \dot{U}_i на кут 90° . Результуючий струм в мережі

$$\dot{I}_i = \dot{I}_z + \dot{I}_{\text{СК}} \quad (10.12)$$

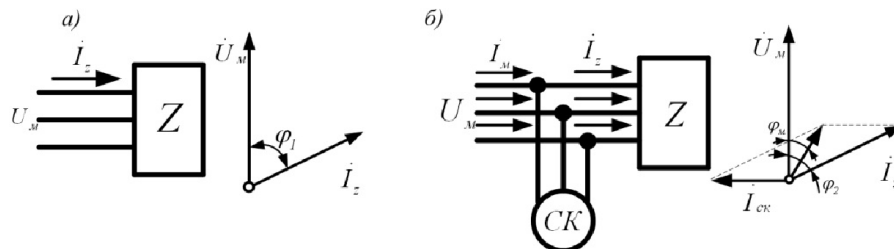


Рисунок 10.23 – Застосування синхронного компенсатора для підвищення коефіцієнта потужності мережі

Фазове зрушення цього струму щодо напруги мережі \dot{U}_i (кут φ_c) набагато менше кута фазового зрушення до включення СК (кут φ_z). Крім того, струм I_c стане менше ($I_c < I_z$). У цьому можна переконатися виходячи з таких міркувань. Оскільки СК працює без навантаження на валу, то його активна потужність не велика і визначається втратами х.х. у компенсаторі. Нехтуючи цими втратами, можна активну потужність в мережі до підключення СК

$$P_c = P_z = \sqrt{3} I_z U_c \cos \varphi_z \quad (10.13)$$

прирівняти до активної потужності мережі після підключення СК:

$$P'_c = \sqrt{3} I_c U_c \cos \varphi_c \quad (10.14)$$

Але оскільки $P_c = P'_c$, а $\cos \varphi_c > \cos \varphi_z$ то $I_c < I_z$, в результаті синхронний генератор і лінія електропередачі розвантажуються, і втрати потужності в них зменшуються.

В деяких випадках СК працюють з недозбудженням. Необхідність в цьому виникає, якщо струм в системі містить значну ємкісну складову, яка не компенсується індуктивній складовій струму споживачів. Зазвичай ступінь збудження СК регулюють за допомогою автоматичних пристроїв.

Синхронні компенсатори застосовують також для стабілізації напруги в мережі при передачі енергії по лініях великої протяжності. При великих індуктивних навантаженнях напруга в кінці лінії (у споживачів) виявляється набагато менше, ніж на початку; при малих навантаженнях, навпаки, під впливом ємкісних опорів лінії напруга в кінці лінії може навіть підвищуватися в порівнянні з напругою на початку. Якщо ж в кінці лінії (у споживачів) включити СК, що працює при великих навантаженнях з перезбудженням і при малих навантаженнях з недозбудженням, то це дозволить підтримувати напругу в кінці лінії практично незмінним.

Умови нагрівання СК при випереджаючому струмі (при перезбудженні) важчі, ніж при тому, що відстає (при недозбудженні), тому за номінальну потужність компенсатора вважають потужність при перезбудженні.

Зазвичай коефіцієнт потужності збільшують до 0,92—0,95, оскільки економія, що отримується від підвищення коефіцієнта потужності до одиниці, не виправдовує витрат, що збільшуються, обумовлених збільшеною потужністю синхронного компенсатора. Так, якщо в даному прикладі потрібно було б збільшити коефіцієнт потужності в мережі до одиниці, то довелося б застосувати синхронний компенсатор потужністю 1050 кВАр, тобто майже в два рази більше, ніж при $\cos \varphi' = 0,95$.

Синхронні компенсатори — це електричні машини великої потужності: від 10 до 160 тис. кВА. Виконують їх зазвичай з горизонтальним розташуванням валу на напругу від 6,6 до 16 кВ, частотою 50 Гц. Число полюсів в СК зазвичай складає $2p = 6$ і 8 , що відповідає частоті обертання ротора 1000 і 750 об/хв. У синхронних компенсаторах сучасних серій застосований асинхронний пуск, тому ротор СК забезпечений пусковою кліткою.

Вал компенсатора не передає моменту, що обертає, і тому при його розрахунку враховують лише силу тяжіння ротора і силу магнітного тяжіння. У результаті вал СК в порівнянні з валом синхронного двигуна має зменшений перетин. Це сприяє зменшенню габаритів і полегшенню СК. Оскільки вал СК не має виступаючого кінця, то СК порівняно легко герметизувати з метою застосування в ній водневого.

Найбільш важливими характеристиками СК є U-подібні характеристики, що визначають основні параметри компенсатора: значення струмів в обмотці статора і в обмотці збудження. В принципі ці характеристики не відрізняються від U-подібної характеристики синхронного двигуна в режимі х.х. ($P_2 = 0$). Вказані характеристики будують для різної напруги мережі.

Синхронний компенсатор не несе активного навантаження (його електромагнітна потужність $D_{Ai} \approx 0$) і працює при значенні кута $\theta = 0$, що забезпечує СК велику перевантажувальну здатність.