

**Змістовий модуль 9. Електричні машини змінного струму.  
Тема № 9.3. Синхронні машини.**

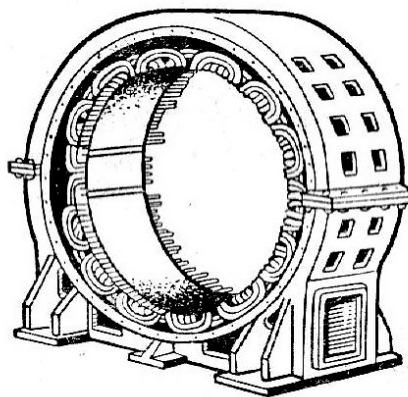
**План лекції**

1. Устрій і принцип дії синхронної машини.
2. Синхронні генератори, їх робота і характеристики.
3. Робота синхронної машини в режимі двигуна.

**1. Устрій і принцип дії синхронної машини**

**Синхронними** називаються електричні машини, частота обертання яких зв'язана постійним співвідношенням із частотою мережі змінного струму, у яку ця машина включена. Синхронні машини служать генераторами змінного струму на електричних станціях, а двигуни застосовуються в тих випадках, коли потрібний двигун, що працює з постійною частотою обертання. Синхронні машини оборотні, тобто вони можуть працювати і як генератори, і як двигуни, хоча в конструкціях сучасних синхронних генераторів і двигунів є невеликі, але досить істотні відмінності. Синхронна машина переходить від режиму генератора до режиму двигуна залежно від того, чи діє на її вал обертаюча чи гальмуюча механічна сила. У першому випадку вона одержує на валу механічну, а віддає в мережу електричну енергію, а в другому - вона споживає з мережі електричну енергію, а віддає на валу механічну.

Синхронна машина має дві основні частини - статор і ротор, причому **статор** (мал. 1) не відрізняється від статора асинхронної машини. У пази статора укладають трифазну обмотку, кінці якої виводять на клемову панель.



Мал. 1. Статор синхронної машини

**Ротор** синхронних машин (мал.2) обертається *синхронно* з обертовим магнітним полем (звідси їх назва). Оскільки частоти обертання ротора й магнітного поля однакові, в обмотці ротора не індукуються струми. Тому

обмотка ротора одержує живлення від джерела постійного струму. Ротор синхронної машини являє собою систему обертових електромагнітів, які живляться постійним струмом, що надходить у ротор через контактні кільця й щітки від зовнішнього джерела. Ротор у деяких випадках виготовляють у вигляді постійного магніту.

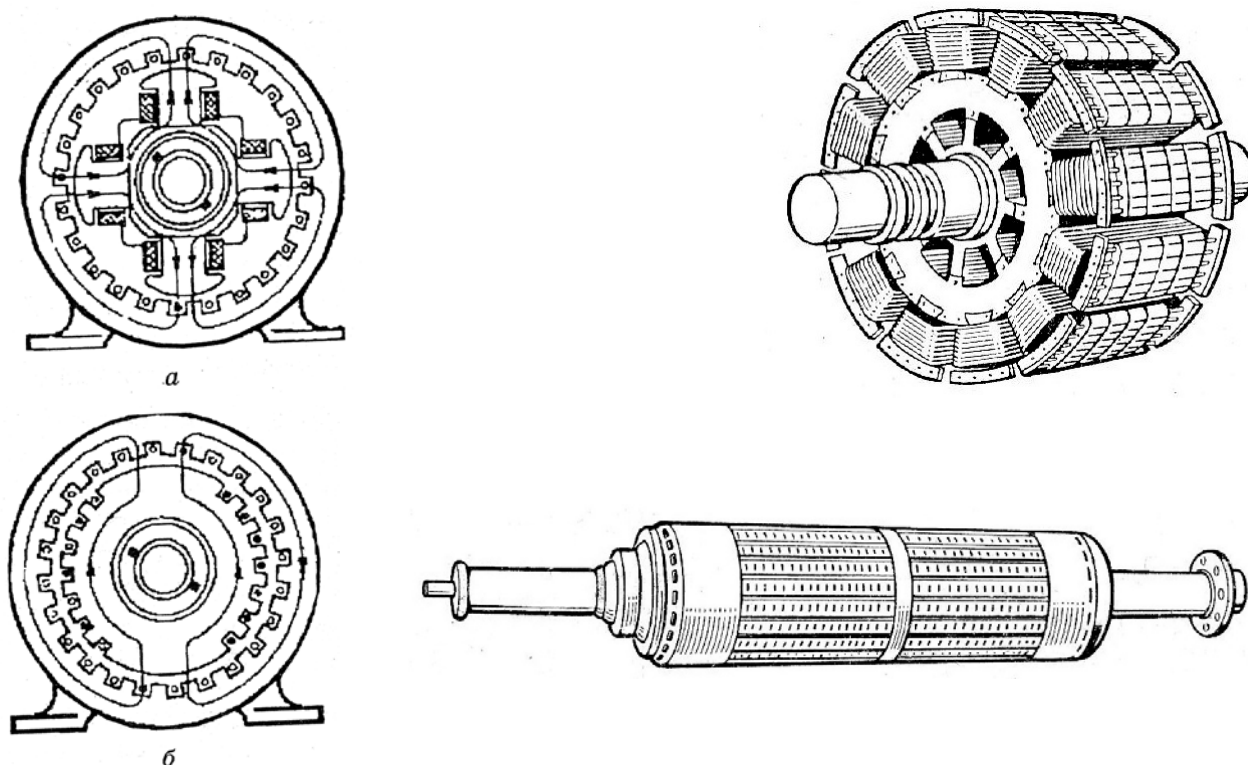


Рис. 2. Ротор синхронної машини: а – явно полюсний, б – неявно полюсний.

## 2. Синхронні генератори, їх робота і характеристики

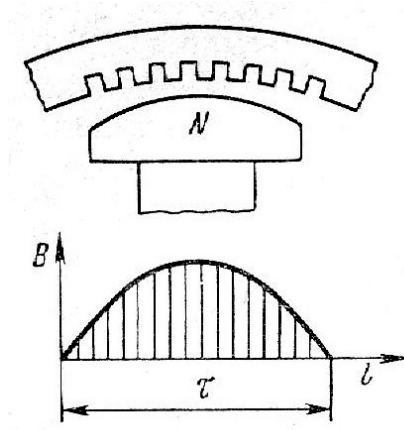
В обмотках статора синхронного генератора великої та середньої потужності під дією обертового магнітного поля ротора наводиться ЕРС, яка подається на зовнішній ланцюг генератора. Така конструкція генератора дозволяє усунути ковзні контакти в ланцюзі навантаження генератора (обмотки статора безпосередньо з'єднуються з навантаженням) і надійно ізолювати обмотки статора від корпусу машини, що суттєво для потужних генераторів, що працюють при високих напругах.

Основний магнітний потік синхронного генератора, створюваний обертовим ротором, збуджується стороннім джерелом-збудником, яким звичайно є генератор постійного струму невеликої потужності, установлений на загальному валу із синхронним генератором.

По своїй конструкції ротори бувають явнополюсними (мал. 2, а) і неявнополюсними (мал. 2, б). Число пар полюсів ротора обумовлене швидкістю його обертання. У першому випадку синхронні генератори приводяться в дію

тихохідними турбінами гідроелектростанцій, у другому - паровими або газовими турбінами теплоелектростанцій.

Живлення до обмотки ротора підводять через ковзні контакти, що полягають із мідних кілець і графітових щіток. При обертанні ротора його магнітне поле перетинає витки обмотки статора, створюючи в них ЕРС. Щоб одержати синусоїдальну форму ЕРС, зазор між поверхнею ротора й статором збільшують від середини полюсного наконечника до його країв (мал. 3).



Мал. 3. Форма повітряного зазору й розподіл магнітної індукції по поверхні ротора в синхронному генераторі

Частота індукованої ЕРС (напруги, струму) синхронного генератора

$$f = \frac{pn}{60},$$

де  $p$  - число пар полюсів ротора генератора.

Відношення  $\frac{n}{60}$  виражає число обертів ротора в секунду; при  $p = 1$  кожний оберт ротора відповідає повному циклу змін індукованого змінного струму (одному періоду); при збільшенні  $p$  відповідно збільшується й число періодів струму, індукованого за один оберт ротора.

При стандартній частоті змінного струму 50 Гц частота обертання двополюсної машини ( $p = 1$ ) 3000 об/хв. З такою частотою обертаються сучасні турбогенератори, що полягають із парової турбіни й синхронного генератора великої потужності з неявнополюсним ротором, який має одну пару полюсів.

У гідрогенераторів первинним двигуном служить гідравлічна турбіна, швидкість обертання якої невелика (від 50 до 750 об/хв) і визначається висотою напору води. У цьому випадку використовуються синхронні генератори з явнополюсним ротором, що мають від 4 до 60 пар полюсів.

Частота обертання дизель-генераторів, з'єднаних з первинним двигуном - дизелем, перебуває в межах від 500 до 1500 об/хв. Звичайно це явнополюсні машини невеликої потужності.

Як і в будь-якого генератора, що працює за законом електромагнітної індукції, індукована ЕРС пропорційна магнітному потоку машини й частоті обертання ротора. Середнє значення ЕРС, що наводиться в кожній фазі обмотки статора,

$$E = cn\Phi ,$$

де  $n$  - швидкість обертання ротора;

$\Phi$  - максимальний магнітний потік, порушуваний у синхронній машині;

$c$  - постійний коефіцієнт, що враховує конструктивні особливості даної машини.

Використовують різні способи збудження синхронних генераторів. Широке поширення одержав синхронний генератор з машинним збудником, що представляють собою генератор постійного струму, розташований на одному валу із синхронним генератором. Машинний збудник приводиться в дію від того ж первинного двигуна, що й синхронний генератор. Вихідні затискачі збудника через щітки й кільця приєднані до обмотки ротора синхронного генератора. Напругу синхронного генератора можна регулювати реостатом у ланцюзі обмотки збудження збудника, що зручно й енергетично вигідно, тому що в цій обмотці протікають порівняно невеликі струми.

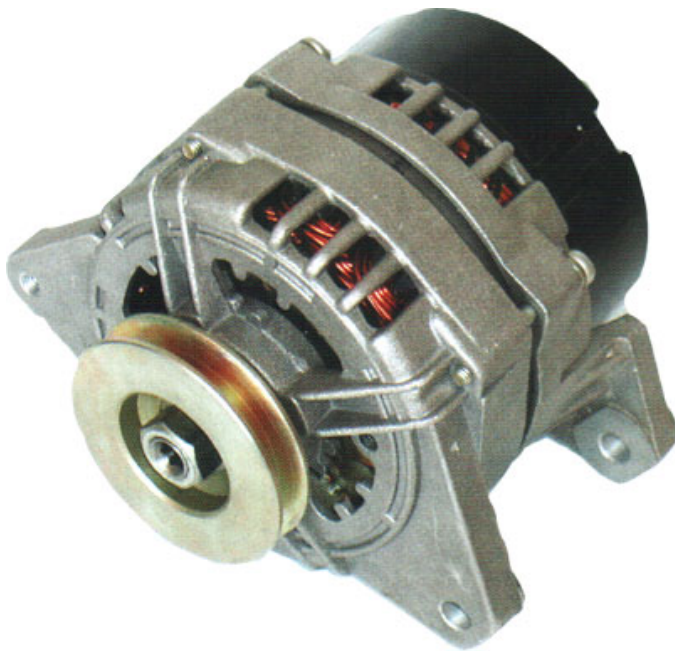
Знаходять також застосування генератори із самозбудженням через напівпровідникові або механічні випрямлячі.

Самозбудження генератора відбувається в такий спосіб. У момент пуску генератора завдяки залишковій індукції в магнітній системі з'являються слабкі ЕРС і струми в робочій обмотці генератора. Це приводить до появи ЕРС на виході й невеликого струму в ланцюзі збудження, що підсилює індукцію магнітного поля машини. ЕРС генератора зростає доти, поки магнітна система машини повністю не збудиться.

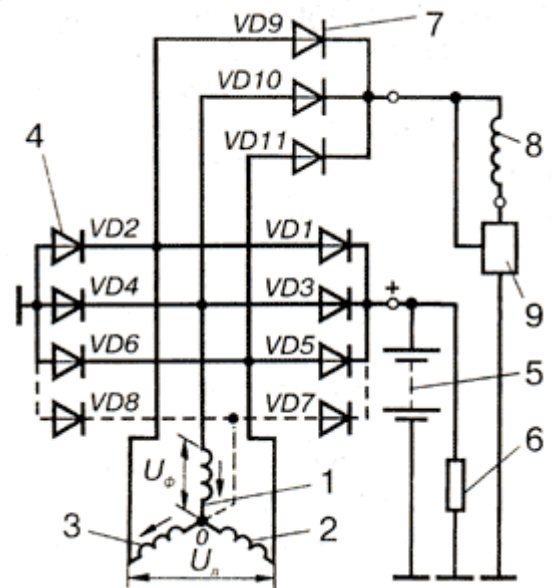
На мал. 4 наведений зовнішній вигляд автомобільного трифазного синхронного генератора, а на мал. 5 – схема його включення. Тут 1, 2, 3 – обмотки статора; 4 – випрямляч змінного струму в постійний, використовуваний для підзарядки акумуляторної батареї 5 і живлення електроустаткування 6; 7 – напівпровідниковий випрямляч, що живить обмотку збудження ротора 8 через регульовальний реостат 9.

Магнітна система синхронного генератора в режимі холостого ходу (без навантаження) складається з магнітного потоку полюсів, який індукує ЕРС в обмотці статора. Після включення навантаження в трифазній обмотці статора

виникає струм, який, як відомо, створює своє обертове магнітне поле. Швидкість обертання цього поля дорівнює швидкості обертання магнітного поля полюсів. Отже, повний магнітний потік синхронної машини при навантаженні складається з магнітних потоків ротора й статора. Магнітне поле статора, накладаючись на магнітне поле ротора, може або послабляти, або підсилювати його. Результат взаємодії цих полів визначається величиною й характером навантаження. Вплив магнітного поля статора на магнітне поле, створюване обертовими полюсами ротора, називається **реакцією якоря**.



Мал. 4. Автомобільний генератор



Мал. 5. Схема включення генератора

Явище реакції якоря належить і до синхронних двигунів, але оскільки в цих двигунах форма кривої ЕРС несуттєва, то й реакція якоря в них має другорядне значення.

### ***Характеристики синхронного генератора***

Основними характеристиками синхронного генератора є *характеристики холостого ходу*, а також *зовнішня й регульовальна*.

***Характеристика холостого ходу***  $E_0(I_0)$  представляє із собою залежність ЕРС генератора  $E_0$  на холостому ході (тобто без навантаження) від струму збудження  $I_0$ . Вона пов'язана із кривою намагнічування сталі й нагадує її за формою (мал. 6).

На холостому ході синхронного генератора його ЕРС створюється тільки головним магнітним потоком, тому ЕРС  $E_0$  пропорційна головному магнітному

поток  $\Phi_0$ , який, у свою чергу, пропорційний магнітної індукції  $B_0$  в статорі. Тому залежність  $E_0 = f(I_B)$  подібна залежності  $B_0 = f(I_B)$ , тобто первісної кривій намагнічування сталі. При досягненні області магнітного насичення магнітної системи генератора швидкість росту ЕРС зменшується.

Номінальний режим збудження генератора вибирають в області вигину кривій (точка А). Використання області магнітного насичення для збільшення ЕРС генератора приводить до невиправданого збільшення струму й розмірів обмотки збудження.

**Зовнішня характеристика** синхронного генератора  $U(I)$  характеризує його електричні властивості і являє собою залежність напруги на затискачах генератора  $U$  від його струму навантаження  $I$  при постійних значеннях коефіцієнта потужності  $\cos \varphi$ , швидкості обертання ротора  $n$  й струму збудження  $I_0$  (мал. 7)

Щоб експериментально одержати зовнішню характеристику, потрібно спочатку навантажити генератор до номінального струму  $I_H$  при номінальній напрузі  $U_H$  на затискачах генератора, яке встановлюється шляхом регулювання струму збудження. Потім, підтримуючи струм збудження й частоту обертання постійними, поступово зменшують струм навантаження до нуля. Зовнішні характеристики можуть мати спад (крива 2) або підйом (крива 3) залежно від характеру навантаження й дії реакції якоря. Номінальний режим навантаження вибирають таким, щоб при  $\cos \varphi = 0,8$  зміни напруги  $\Delta U$  не перевищували 35-45 % від номінального (крива 1).

**Регульовальна характеристика** синхронного генератора являє собою залежність струму збудження генератора  $I_B$  від струму навантаження  $I$  ( $I_B = f(I_H)$ ) при  $U = U_H = const$ ,  $n = n_H = const$  і  $\cos \varphi = const$ .

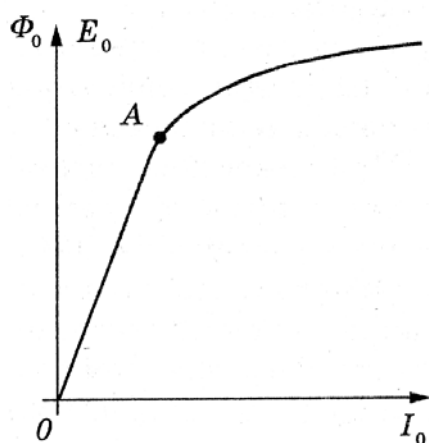
Ця характеристика показує, як вибрати струм збудження, при якому напруга на затискачах генератора залишалася б постійною при змінах навантаження.

Щоб експериментально одержати регульовальну характеристику, потрібно спочатку включити генератор і привести його ротор у обертання з номінальною швидкістю  $n_H$  при холостому ході, а потім шляхом зміни струму збудження добитися одержання номінальної напруги  $U_H$ .

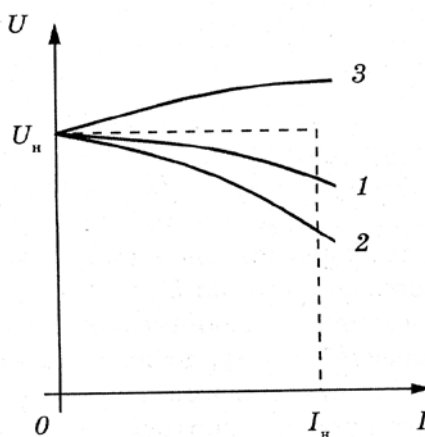
Далі поступово збільшують струм навантаження й знімають характеристику, домагаючись у кожній точці сталості напруги на затискачах машини ( $U = U_H = const$ ) шляхом регулювання струму збудження.

На мал. 8 зображені регулювальні характеристики для різних значень  $\cos \varphi$ . Ми бачимо, що при активно-індуктивнім навантаженні, коли  $\varphi \geq 0$  (крива 2), струм збудження необхідно збільшувати, а при активно-ємніснім навантаженні, коли  $\varphi \leq 0$  (крива 3) - зменшувати. Крива 1 відповідає оптимальному режиму. Усі ці явища обумовлені реакцією якоря.

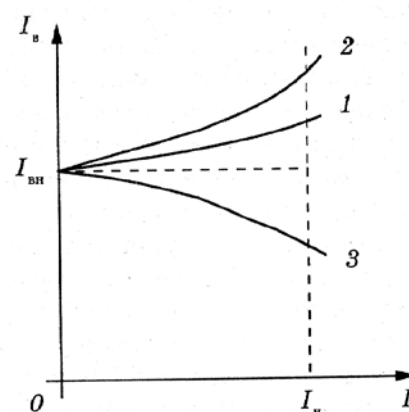
Регулювальні характеристики мають важливе практичне значення, тому що вони визначають межі зміни струму збудження для підтримки номінальної напруги при зміні навантаження.



Мал. 6. Характеристика холостого ходу синхронного генератора



Мал. 7. Зовнішня характеристика синхронного генератора



Мал. 8. Регулювальна характеристика синхронного генератора

### 3. Робота синхронної машини в режимі двигуна

Устрій статора синхронного двигуна аналогічний устрою статора асинхронного двигуна. Ротор синхронного двигуна являє собою електромагніт або постійний магніт (мал. 9).

Принцип роботи синхронного двигуна пояснюється мал. 10. У середині магніту  $N_1S_1$  поміщений магніт  $NS$ . Якщо магніт  $N_1S_1$  обертає, то він потягне за собою магніт  $NS$ . У стаціонарному режимі частоти обертання обох магнітів однакові.

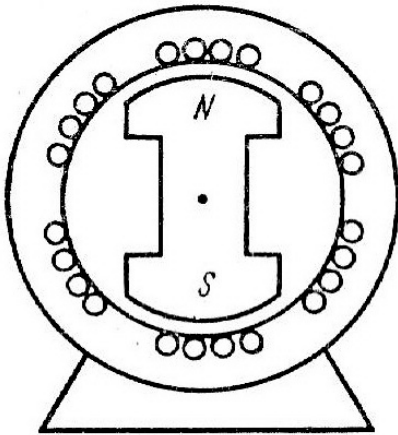
До вала магніту  $NS$  можна прикласти механічне навантаження. Чим більше це навантаження, тим більше кут відставання осі магніту  $NS$  від осі магніту  $N_1S_1$ . При деякій навантаженні сили притягання між магнітами будуть переборені й ротор зупиниться.

У реальному двигуні поле магніту  $N_1S_1$  замінене обертовим магнітним полем статора; при цьому ротор або обертається синхронно з магнітним полем статора, відстаючи на кут  $\alpha$ , або зупиняється (випадає із синхронізму) при перевантаженні. Таким чином, незалежно від навантаження ротор завжди

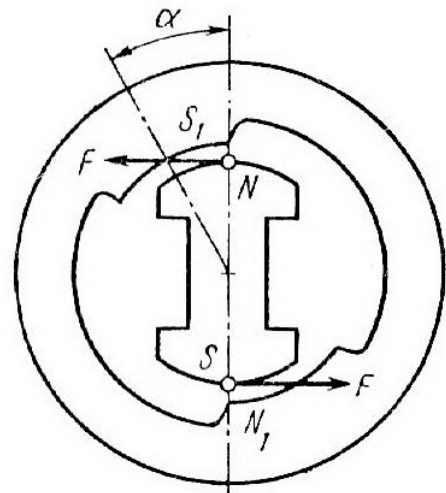
обертається з постійною частотою, рівній частоті обертання магнітного поля статора:

$$n_2 = n_1 = \frac{60f}{p}.$$

Збільшення навантаження приводить до збільшення струму в ланцюзі двигуна й, отже, до збільшення споживаної з мережі електричної потужності. На відміну від асинхронного двигуна, у якому збільшення навантаження на валу приводить до зменшення швидкості обертання ротора, у синхронному двигуні збільшення механічного навантаження приводить до збільшення кута  $\alpha$  між полюсами обертових полів статора й ротора при збереженні швидкості обертання ротора.



Мал. 9. Схематичне зображення синхронного двигуна



Мал. 10. До пояснення принципу роботи синхронного двигуна

Ротор синхронного двигуна буде продовжувати синхронне обертання доти, поки він буде за півперіоду змінного струму встигати повертатися своїми полюсами до наступних провідників обмотки статора з таким же напрямком струму, як і в тих провідниках, проти яких він перебуває в цей момент. Інакше кажучи, ротор двигуна повинен обертатися з такою ж швидкістю, що й поле статора, проходячи полюс за півперіоду змінного струму (різниця швидкостей поля й ротора може становити не більш 2-5 %), при цьому на нього буде діяти обертаючий момент того самого напрямку. При занадто великому механічному навантаженні ротор двигуна випадає із синхронізму й двигун зупиняється.

Сталість частоти обертання - важлива перевага синхронного двигуна. Суворе сталість частоти обертання потрібна в багатьох областях техніки, наприклад при записі й відтворенні звуку.



## ***Пуск і зупинка синхронного двигуна***

Недолік синхронного двигуна - труднощі пуску: для пуску потрібно розкрутити ротор убік обертання поля статора.

У минулому для розкручування ненавантаженого синхронного двигуна застосовувався спеціальний розгінний асинхронний двигун невеликої потужності. Спочатку ротор розганяв до швидкості, близької до синхронної, потім включалася обмотка збудження, а потім обмотки статора включалися в мережу.

У цей час синхронні двигуни запускають за допомогою асинхронного пуску. Для цього застосовують спеціальну короткозамкнену обмотку, вправлену в ротор. У момент пуску двигун працює як асинхронний. Коли частота обертання ротора наближається до частоти обертання поля статора, ротор входить у синхронізм і двигун працює як синхронний. Короткозамкнена обмотка при цьому виявляється знеструмленою, тому що частота обертання ротора дорівнює частоті обертання поля статора й стрижні обмотки ротора не перетинаються магнітними силовими лініями.

Для зупинки синхронного двигуна спочатку зменшують струм збудження до значення, відповідного до мінімального струму обмоток статора, потім відключають статор і лише після цього розмикають ланцюг збудження. Недотримання такого порядку (наприклад, відключення обмотки збудження раніше відключення обмоток статора) приведе до надмірного збільшення струму в обмотці статора й небезпечним для цілості ізоляції перенапругам у розімкнутій обмотці збудження.

### **Питання для самоконтролю**

1. Як улаштований трифазний синхронний генератор?
2. Який принцип роботи трифазного синхронного генератора?
3. Які конструкції роторів використовуються в трифазних синхронних генераторах?
4. Як здійснюється самозбудження трифазного синхронного генератора?
5. Яке явище називають реакцією якоря?
6. Що таке характеристика холостого ходу синхронного генератора, її вигляд.
7. Що таке зовнішня характеристика синхронного генератора, її вигляд.
8. Що таке регульовальна характеристика синхронного генератора, її вигляд.
9. Опишіть роботу синхронної машини в режимі двигуна.
10. Як здійснюються асинхронний пуск і зупинка синхронного двигуна?

## Список літератури

1. Данилов И.А., Иванов П.М. Общая электротехника с основами электроники: Учеб. пособие для неэлектротехн. спец. техникумов. – М.: Высш. шк., 2005. – §§ 8.13 – 8.14 (с. 233 – 239).
2. Синдеев Ю.Г. Электротехника с основами электроники: учеб. пособие. – 15-е изд., стереотипное – Ростов н/Д: Феникс, 2013. – §§9.1 – 9.6 (с. 222 – 239).
3. Славинский А.К., Туревский И.С. Электротехника с основами электроники: учебное пособие. – М.: ИД «ФОРУМ»: ИНФРА-М, 2009. – глава 8, §§ 8.13 – 8.14 (с. 225 – 231).