



Національний університет
водного господарства та
природокористування

Міністерство освіти та науки України
Національний університет водного господарства та
природокористування
Кафедра автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-
інтегрованих технологій

04-03-133

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторної роботи №3 на тему

**"Дослідження характеристик
трифазного синхронного генератора"**

з навчальної дисципліни

"Електротехніка та електромеханіка".

Ч.2. "Електромеханіка"

студентами спеціальності

151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Рекомендовано науково-методичною
комісією зі спеціальності

151 «Автоматизація та комп'ютерно-
інтегровані технології»

Протокол № 4 від 12. 10. 2016 р.

Рівне – 2016



Національний університет

Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи №3 на тему "Дослідження характеристик трифазного синхронного генератора" з навчальної дисципліни "Електротехніка та електромеханіка". Ч.2. "Електромеханіка" студентами спеціальності 151 "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології" / Маланчук Є.З., Христюк А.О. – Рівне : НУВГП, 2016. – 13 с.

Упорядники: Є.З. Маланчук, д.т.н., професор кафедри АЕКІТ;
А.О. Христюк, ст. викладач кафедри АЕКІТ.

Відповідальний за випуск: В.В. Древецький, д.т.н., професор,
завідувач кафедри АЕКІТ.



Національний університет
водного господарства
та природокористування

© Маланчук Є.З.,
Христюк А.О., 2016
© НУВГП, 2016



Робота 3. Дослідження характеристик трифазного синхронного генератора

3.1. Мета роботи

Вивчити будову і принцип дії трифазного синхронного генератора та дослідити основні його характеристики.

3.2. Короткі теоретичні відомості

Трифазні синхронні генератори призначені для перетворення механічної енергії в електричну. За їх допомогою виробляється електрична енергія на електричних станціях. На теплових і атомних електростанціях генератори приводяться в рух паровими турбінами, а на гідроелектростанціях – гідравлічними турбінами. Синхронні генератори також використовують на пересувних дизельних електростанціях. Отже, основним джерелом електричної енергії є синхронні трифазні генератори. Їх виготовляють на одиничні потужності від десятків ват до мільйона кіловат.

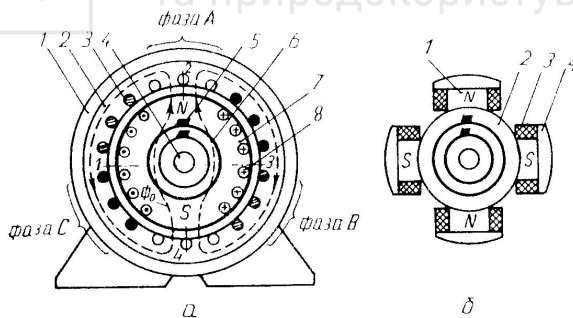


Рис. 3.1

Синхронний генератор складається з двох основних частин: нерухомого статора і ротора, який обертається первинним двигуном (рис. 3.1). Статор представляє собою сталевий корпус 1, в якому закріплене циліндричне осердя 2, виготовлене з листів електротехнічної сталі. В пазах осердя розташовані три однофазні обмотки, які зміщені по колу одна від однієї на 120 електричних градусів. Обмотки 3, як правило, з'єднують зіркою з метою створення трифазної системи струмів. Фазні обмотки називають фазами і

позначають латинськими літерами A, B і C .

Ротори синхронних генераторів бувають з неявно вираженими і явно вираженими полюсами. Ротор з неявно вираженими полюсами 7 представляє собою суцільний сталений циліндр, в пазах якого розміщена обмотка збудження 8. На валу 4 закріплені два кільця 6, на які через щітки 5 подається напруга постійного струму. Такі ротори виготовляють на швидкість обертання 3000 об/хв.

Явно полюсний ротор (рис 3.1,б) складається із сталюго обвода 2, на якому закріплені виготовлені із листової електротехнічної сталі полюси 1, обмоток збудження 3, полюсних наконечників 4, вала з двома кільцями і щіток. Кількість пар полюсів p при частоті змінного струму $f = 50 \text{ Гц}$ зв'язана з швидкістю обертання ротора залежністю

$$p = \frac{60f}{n_p} = \frac{3000}{n_p}, \quad /3.1/$$

де n_p - швидкість обертання ротора в обертах за хвилину.

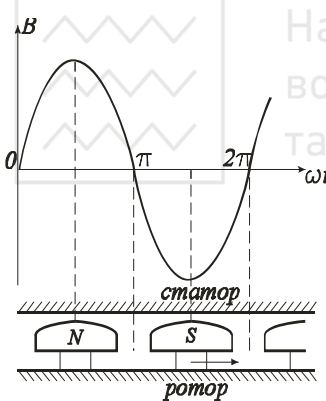
Принцип роботи синхронного генератора полягає в наступному. Якщо в обмотці збудження буде протікати постійний струм I_z , то він спричинить появу магнітного потоку Φ_0 . Цей магнітний потік, як зображено на рис. 3.1,а пунктирними лініями, буде проходити по осердям ротора і статора, а також через повітряні проміжки між ротором і статором. При обертанні ротора первинним двигуном разом з ним буде обертатись і магнітний потік, який, перетинаючи провідники в обмотках статора, буде індукувати в них е.р.с. однієї амплітуди і частоти, але зсунуті в часі на 120° . Щоб при постійній швидкості обертання ротора в обмотках статора індукувались синусоїдні е.р.с., магнітна індукція вздовж повітряного проміжку між ротором і статором повинна змінюватись також за синусоїдним законом. В генераторах з явно вираженими полюсами це досягається відповідною зміною величини повітряного проміжку між наконечниками полюсів і статором (рис. 3.2), а в роторах з неявно вираженими полюсами – відповідним розміщенням обмотки в пазах ротора. За цих умов у фазних обмотках статора будуть індукуватись е.р.с., миттєві значення яких визначатимуться такими співвідношеннями:



$$\begin{aligned}e_A &= E_m \sin \omega t; \\e_B &= E_m \sin(\omega t - 2\pi/3); \\e_C &= E_m \sin(\omega t + 2\pi/3),\end{aligned} \quad /3.2/$$

де $E_m = 4,44kwf\Phi_0$ - амплітуда е.р.с.; w - кількість витків однієї фази обмотки статора; k - обмоточний коефіцієнт; $f = \frac{pn_p}{60}$ - частота е.р.с. в обмотках статора.

Щоб частота бала 50 Гц при різних швидкостях обертання ротора, синхронні генератори виготовляють з різною кількістю пар полюсів. Так, турбогенератори виготовляють на швидкість обертання 3000 об/хв і мають одну пару полюсів ($p = 1$). Гідрогенератори в залежності від напору води виготовляють на швидкості від 50 до 750 об/хв і вони мають відповідно від 60 до 4 пар полюсів.



При роботі синхронної машини під навантаженням трифазна система е.р.с. зумовлює трифазну систему струмів, яка створює магнітне поле, швидкість обертання якого

$$n_0 = \frac{60f}{p} = n_p. \quad /3.3/$$

Рівність /3.3 /показує, що магнітні поля статора і ротора обертаються синхронно. Від цього і походить назва синхронних машин.

Рис.3.2.

Основними характеристиками

генера-

тора є характеристика холостого ходу, зовнішня та регульовальна характеристики.

Характеристика холостого ходу представляє собою залежність е.р.с. генератора від струму збудження $E = f(I_z)$ при струмі статора $I = 0$ і $n_p = const$. Оскільки е.р.с. пропорційна основному магнітному потоку Φ_0 , який залежить від струму збудження, то $E = f(I_z)$ буде повторювати залежність $\Phi_0 = f(I_z)$ тільки в іншому

масштабі. Отже, характеристика холостого ходу буде подібна до характеристики намагнічування сталі, із якої виготовлені ротор і статор машини. Якщо знехтувати залишковим магнетизмом, то характеристика холостого ходу генератора буде мати вигляд, наведений на рис. 3.3. При збільшенні I_3 е.р.с. майже лінійно зростає, а потім із-за насичення швидкість зростання знижується. Точка А відповідає номінальному режиму роботи генератора і знаходиться на перегині кривої.

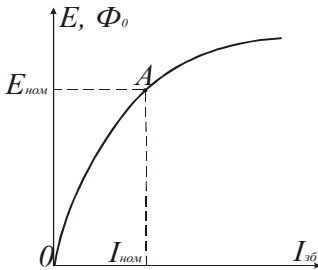


Рис.3.3.

Зовнішня характеристика – це залежність напруги на клеммах генератора від струму навантаження $U = f(I)$ при постійних значеннях коефіцієнта потужності $\cos \varphi$, струму збудження і швидкості обертання ротора. Залежність фазної напруги синхронного генератора від струму описується векторним рівнянням

$$\bar{U} = \bar{E} - Z\bar{I}, \quad /3.4/$$

де $Z = \sqrt{r^2 + x_L^2}$ - повний опір фазної обмотки; r і x_L - відповідно її активний і індуктивний опори. Зміщення у часі струму відносно е.р.с., залежить не тільки від Z , але і від зміщення в часі струму відносно напруги, тобто коефіцієнта навантаження $\cos \varphi$. Щоб виключити вплив $\cos \varphi$ на вид залежності $U = f(I)$, її аналізують при $\cos \varphi = const$, який може бути як від'ємним (активно-емісне навантаження), так і додатним (активно-індуктивне навантаження).

При симетричному навантаженні генератора (при рівних модулях фазних струмів) кожний фазний струм супроводжується магнітним потоком Φ_ϕ . Частина цього потоку замикається навколо провідників обмотки, не виходячи за межі статора (потік розсіювання). Потік розсіювання визначає індуктивний опір $x_L = \omega L$. Основна частина магнітного потоку кожної фази Φ_a замикається через полюси ротора, утворюючи обертове магнітне поле, яке обертається з частотою ротора. Отже, магнітні поля ротора і статора взаємно нерухомі, вони взаємодіють, утворюючи результуючий магнітний потік



$$\bar{\Phi} = \bar{\Phi}_p + \bar{\Phi}_a. \quad /3.5/$$

Взаємодію магнітних потоків статора і ротора за аналогією з машинами постійного струму називають реакцією якоря. Отже, в результаті реакції якоря е.р.с. статора буде залежати і від струму статора, бо вона створюється результуючим магнітним потоком.

Зазвичай, аналіз рівнянь у векторній формі проводять на підставі векторних діаграм при різних навантаженнях. Розглянемо спочатку векторну діаграму при активно-індуктивному навантаженні.

При побудові векторних діаграм в якості основного вектора вибирають вектор е.р.с. \bar{E} (рис. 3.4), від якого під кутом ψ проводимо вектор струму \bar{I} . У відповідності з рівнянням /3.4/ напруга на клеммах генератора \bar{U} менша е.р.с. \bar{E} на величину падіння напруги на

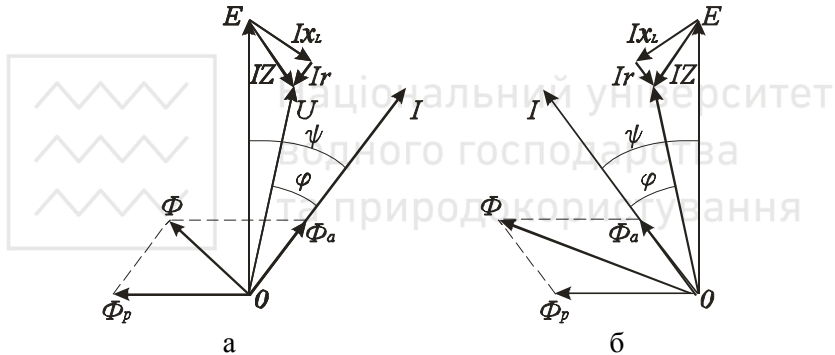


Рис. 3.4.

повному опорі, рівному $Z\bar{I}$. Для побудови цього вектора відкладають з кінця вектора \bar{E} перпендикулярно до вектора \bar{I} вектор падіння напруги на індуктивному опорі $x_L I$, і паралельно вектору \bar{I} - вектор падіння напруги на активному опорі $r\bar{I}$. З'єднавши точку 0 з кінцем вектора $r\bar{I}$ (кінцем вектора $Z\bar{I}$), одержимо вектор напруги \bar{U} . Кут φ між вектором \bar{I} і \bar{U} визначає характер навантаження.

Магнітні потоки ротора і статора, які стали за величиною і які обертаються з постійною швидкістю, можна замінити потоками, які змінюються за синусоїдним законом як і е.р.с. і струм. Тому на векторах е.р.с. напруг і струму (рис. 3.4,а) можна побудувати вектори



магнітних потоків ротора і статора згідно рівняння /3.5/ і визначити результуючий магнітний потік генератора.

Е.р.с., яка створена магнітним потоком полюсів $\overline{\Phi}_p$, відстає від нього на кут $\pi/2$. Потік статора Φ_a співпадає за напрямком зі струмом, який його створив. Сума векторів $\overline{\Phi}_p$ і $\overline{\Phi}_a$ дає результуючий потік генератор, що і зображено на рис. 3.4,а.

Із побудованої векторної діаграми видно, що при $\cos \varphi = const$ зі збільшенням струму буде збільшуватись падіння напруги на повному опорі фазної обмотки статора і напруга буде зменшуватись. Одночасно буде зменшуватись результуючий магнітний потік із-за збільшення магнітного потоку статора $\overline{\Phi}_a$, що призведе до зменшення е.р.с. і ще більшого зменшення напруги генератора. Тому залежність $U = f(I)$ є нелінійною, як показано на рис. 3.5 (крива 1).

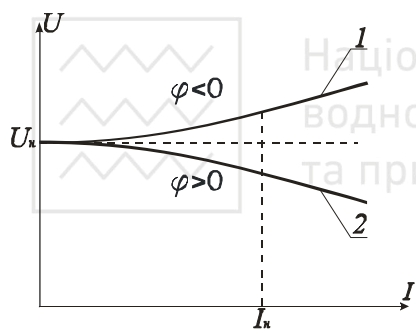


Рис. 3.5.

збільшується падіння напруг на опорах обмотки статора (крива 1 на рис. 3.5).

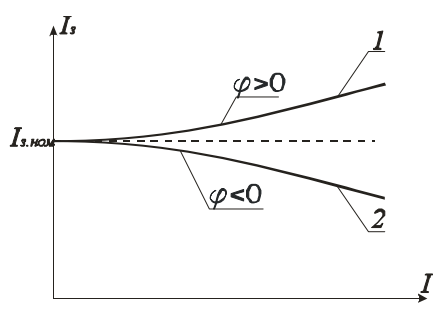


Рис. 3.6.

На рис. 3.4,б наведена векторна діаграма при активно-емнісному навантаженні. Вона відрізняється від діаграми при активно-індуктивному навантаженні тим, що струм випереджає е.р.с. В результаті цього результуючий магнітний потік генератора збільшується зі збільшенням струму. Це призводить до збільшення е.р.с., хоча одночасно

Зазвичай, синхронні генератори електричних станцій працюють на загальну мережу, в якій напруга $U = const$. Тому сталою повинна бути напруга на клеммах кожного генератора незалежно від величини і характеру навантаження. Цього добиваються тим, що при збільшенні струму відповідним



чином змінюють струм збудження.

Як залежить струм збудження при $\cos \varphi = \text{const}$ і $n_p = \text{const}$ від струму статора, за умови $U = \text{const}$, показує регульовальна характеристика $I_z = f(I)$.

На рис. 3.6 наведені регульовальні характеристики для різних значень $\cos \varphi$. Із них видно, що при активно-індуктивному навантаженні, коли $\varphi \geq 0$ (крива 1), необхідно збільшувати струм збудження при збільшенні струму статора, а при активно-ємнісному, коли $\varphi < 0$ (крива 2), - зменшувати. Такі залежності $I_z = f(I)$ зумовлені дією реакції якоря і узгоджуються як з векторними діаграмами, так і з зовнішніми характеристиками.

3.3 Програма роботи

1. Вивчити будову і принцип дії трифазного синхронного генератора.
2. Ознайомитись з лабораторним стендом для дослідження характеристик синхронного генератора.
3. Зняти характеристики холостого ходу, зовнішню і регульовальну.
4. Побудувати векторну діаграму при активно-індуктивному навантаженні.

3.4. Опис лабораторної установки

Лабораторна установка для дослідження характеристик трифазного синхронного генератора з явно вираженими полюсами (рис. 3.7) складається з синхронного генератора CG , автотрансформатора TV з випрямлячем B для живлення обмотки збудження генератора, трифазного рідинного реостата R_n , двигуна постійного струму з паралельним збудженням D і вимірювальних приладів.

Пуск двигуна постійного струму здійснюють за допомогою пускового реостата R_n , швидкість обертання регулюють зміною струму збудження реостатом R_z .

Ротор синхронного генератора має дві пари полюсів, його синхронна швидкість $n_0 = 1500$ об/хв., що відповідає частоті напруги $f = 50$ гц, яка контролюється частотоміром PF . Прилад для вимірю-

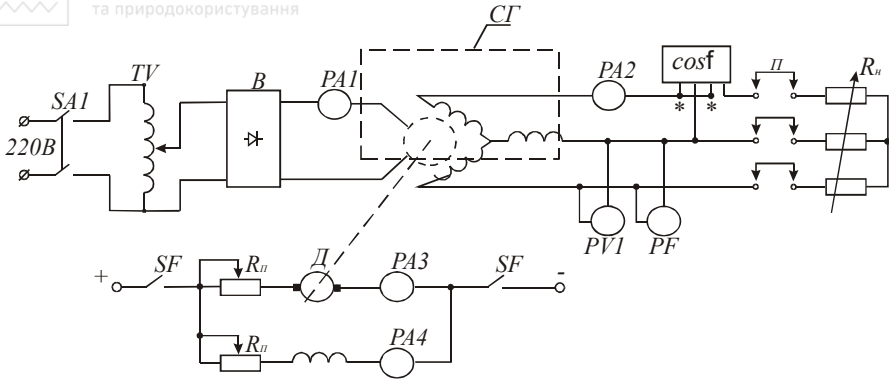


Рис. 3.7.

вання $\cos \varphi$ дозволяє визначити характер навантаження, що необхідно знати для побудови векторної діаграми машини. Щоби не перевантажити двигун постійного струму, передбачено контроль струму якоря амперметром $PA3$. Навантаження генератора створює водяний реостат R_n , який під'єднують до обмотки статора за допомогою перемичок. Електрична схема установки зібрана.

3.5. Порядок виконання роботи

1. Щоб детально вивчити будову синхронного генератора, його розібрано і всі частини розташовано окремо. Це дозволяє побачити розміщення магнітних полюсів ротора, обмотки збудження і контактних кілець, а також форму наконечників магнітних полюсів, яка забезпечує синусоїдний закон розподілу магнітної індукції у повітряному проміжку. Вивчаючи статор, слід звернути увагу на будову магнітопровода, на форму пазів і розташування обмоток.

2. Для успішного виконання роботи потрібно вивчити розташування на лабораторному стенді вимикачів, реостата для пуску двигуна постійного струму, засобів керування струмом збудження синхронного генератора і струмом збудження двигуна, пам'ятаючи, що зі зменшенням струму швидкість двигуна збільшується, а потужність не змінюється.

3. Для дослідження характеристики холостого ходу необхідно провести таку підготовчу роботу: зняти перемички II , увімкнути

вимикач SAI , автотрансформатором TV встановити номінальний струм збудження, який вказаний на стенді. Після цього приступають до пуску двигуна: ручку пускового реостата R_n переводять у крайнє ліве положення, а повзунок реостата R_s – в крайнє праве; вимикачем SF подають постійну напругу на двигун, який почне розганятись. Поступово переводять ручку реостата R_n в крайнє праве положення, що призведе до збільшення швидкості обертання двигуна генератора. Якщо після пуску двигуна частота напруги генератора не буде рівною 50 Гц, то, регулюючи струм збудження двигуна реостатом R_s , змінюють швидкість обертання доти, доки частотомір PF не покаже номінальну частоту $f_n = 50 \text{ Гц}$, що відповідатиме номінальній швидкості генератора $n_0 = 1500 \text{ об/хв}$. Покази вольметра PVI і амперметра PAI заносять в табл. 1 і це буде одна із точок характеристики $E = f(I_s)$.

Далі автотрансформатором TV збільшують струм збудження на 25-30% і фіксують ще дві точки характеристики. Після цього зменшують струм збудження від номінального до нуля і знімають ще 5-6 точок. При цьому контролюють частоту, яка не повинна змінюватись. За даними експерименту будують характеристику холостого ходу синхронного генератора $E = f(I_s)$

Таблиця 1

$I_s, \text{ A}$	$I_{s,n}, \text{ A}$								
E, В	220								

Зовнішня характеристика генератора представляє собою залежність напруги від струму навантаження $U = f(I)$ при сталих значеннях коефіцієнта потужності $\cos \varphi$, швидкості обертання ротора n_0 і струму збудження I_s . Щоби експериментально одержати зовнішню характеристику, необхідно навантажити генератор номінальним струмом I_n при номінальному стумі збудження $I_s = I_{s,n}$. Для виконання цього експерименту треба зупинити генератор, відключивши двигун від мережі живлення вимикачем SF , поставити перемички Π і встановити максимальний опір реостата навантаження R_n шляхом підйому пластин поворотом ручки привода. Після цього провести вищеописаним методом пуск двигуна. Зміною швидкості двигуна

встановлюють частоту $f = 50 \text{ Гц}$ при номінальному значенні струму збудження. Потім поступово зменшують опір реостата R_n доти, поки струм не досягне номінального значення I_n . Оскільки джерела живлення двигуна і обмотки збудження генератора невеликої потужності, то швидкість і струм збудження можуть зменшитися. Тому їх необхідно підрегулювати, щоби забезпечити $f = 50 \text{ Гц}$ і $I_3 = I_{3,n}$. Покази амперметрів $PA1$ і $PA2$, вольтметра PVI , частотоміра PF і значення $\cos\varphi$ занести в табл. 2. Після зміною опору R_n зменшують струм навантаження до мінімально можливого значення і фіксують 5-6 точок зовнішньої характеристики. На протязі експерименту потрібно забезпечити $f = 50 \text{ Гц}$ і $I_3 = I_{3,n} = \text{const}$. Дані експерименту занести в табл. 2.

Таблиця 2

U, B								U_n
I, A	I_n							0
I_3, A	$I_{3,n}$							
$f, \text{Гц}$	50							
$\cos\varphi$								

За експериментальними даними будують залежність $U = f(I)$. Значення напруги при $I=0$ взяти з табл. 1.

Оскільки при знятті зовнішньої характеристики не витримувалась умова $\cos\varphi = \text{const}$, то отримані експериментальні дані є наближеними, бо струм змінювали шляхом зміни активного, а не повного опору навантаження.

Регульовальна характеристика представляє собою залежність струму збудження від струму статора $I_3 = f(I)$ при $U = U_n = \text{const}$, $\cos\varphi = \text{const}$ і $f = 50 \text{ Гц}$ і її змінюють так: при мінімальному струмі навантаження і $f = 50 \text{ Гц}$ збільшують струм доти, доки напруга не стане номінальною. Покази приладів заносять в табл. 3. Далі за допомогою реостата R_n збільшують струм до номінального і знімають іще 5-6 точок характеристики, регулюючи струм збудження, щоби в кожній точці характеристики були $U = U_n$ і $f = 50 \text{ Гц}$. За експериментальними даними будують характеристику. При $I=0$ приймають $I_3 = I_{3,n}$. Ця характеристика також буде наближеною, бо не



Таблиця 3

I, A	0						
I_3, A	$I_{3,n}$						
U, B	U_n						
$f, \text{Гц}$	50						
$\cos \varphi$							

4. Векторну діаграму синхронного генератора будують для навантаження $I=0,5I_n$, $E=E_n$ і кута зсуву фаз між е.р.с. і струмом, який відповідає експериментальному значенню $\cos \varphi$ згідно табл. 2. Методика побудови викладена в розділі 3.2. Опори фазної обмотки вказані на лабораторному стенді.

3.6. Контрольні запитання

1. Чому трифазний генератор змінного струму назвали синхронним генератором?
2. Які за конструкцією бувають ротори синхронних генераторів?
3. Яке існує співвідношення між швидкістю обертання ротора, числом його полюсів і частотою змінного струму?
4. За рахунок чого фазні е.р.с. двополюсного генератора зсунуті в часі на кут $2\pi/3$?
5. Як добиваються розподілу магнітної індукції у повітряному проміжку між полюсами і статором за синусоїдним законом?
6. Чому магнітні потоки ротора і статора рухаються у просторі з однаковою швидкістю?
7. Які характеристики синхронного генератора відносять до основних?
8. Чому при активно-емнісному навантаженні зі збільшенням струму статора напруга також збільшується?
9. Що показує регульовальна характеристика генератора?
10. Для чого будують векторну діаграму синхронного генератора?