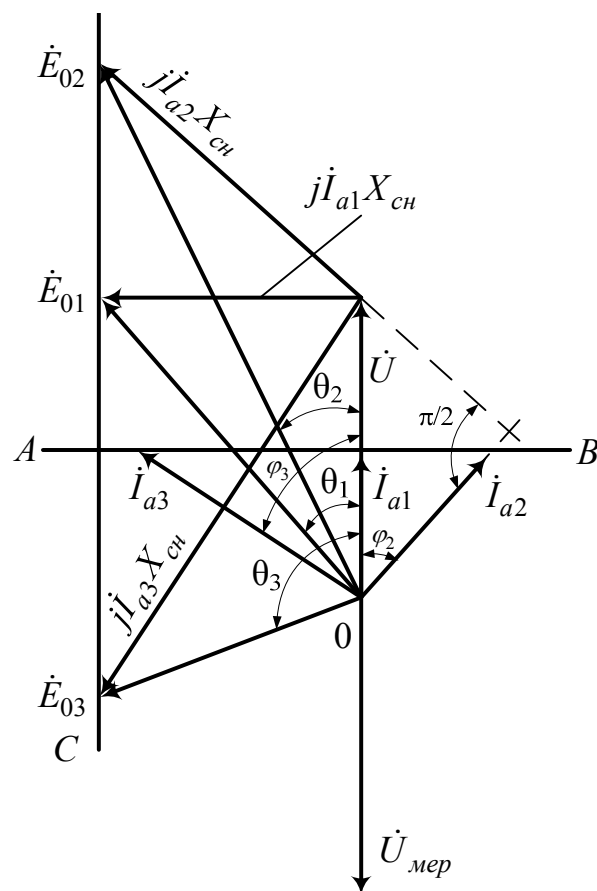
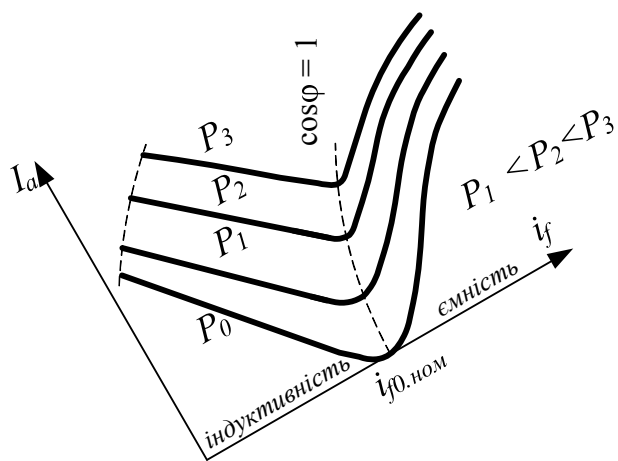


ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

Частина V. Синхронні машини



Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ
ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН**

Частина V. Синхронні машини
Навчальний посібник

Вінниця
ВНТУ
2014

УДК 621.313

ББК 31.261я73

E45

Автори:

Грабко В. В., Розводюк М. П., Левицький С. М.,

Грабенко І. В.

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 4 від 29.11.2012р.).

Рецензенти:

В. В. Кухарчук, доктор технічних наук, професор

В. М. Кутін, доктор технічних наук, професор

О. П. Чорний, доктор технічних наук, професор

E45 Експериментальні дослідження електричних машин. Частина V. Синхронні машини: навчальний посібник / В. В. Грабко, М. П. Розводюк, С. М. Левицький, І. В. Грабенко. – Вінниця: ВНТУ, 2014. – 137 с.

В навчальному посібнику викладено підходи до експериментальних досліджень синхронних машин. Для кожного виду дослідження відведено відповідне лабораторне заняття, наведено основні теоретичні відомості, задачі для самостійного розв'язування, програмі лабораторних робіт і методичним вказівкам для їх виконання. Запропоновані способи досліджень дозволяють охопити основні питання для закріплення теоретичних знань з відповідного розділу дисципліни «Електричні машини». Навчальний посібник рекомендовано для студентів, що навчаються за напрямками 6.050702 «Електромеханіка», 6.050701 – «Електротехніка та електротехнології».

УДК 621.313

ББК 31.261я73

Зміст

Перелік позначень	5
Вступ	9
1 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ПРО СИХРОННІ МАШИНИ	10
1.1 Будова та принцип дії синхронних машин	10
1.2 Реакція якоря в синхронних машинах.....	14
1.3 Основні рівняння синхронних машин.....	18
1.4 Характеристики синхронних генераторів.....	21
1.4.1 Характеристика холостого ходу	22
1.4.2 Характеристика короткого замикання	22
1.4.3 Навантажувальна характеристика	25
1.4.4 Зовнішні характеристики	27
1.4.5 Регульовальні характеристики	28
1.5 Практична діаграма електрорушійних сил генератора	29
1.6 Робота синхронних генераторів з несиметричним навантаженням	32
1.7 Несиметричні короткі замикання синхронних генераторів.....	36
1.8 Раптове коротке замикання в синхронних генераторах	39
2 ПАРАЛЕЛЬНА РОБОТА СИХРОННИХ МАШИН З МЕРЕЖЕЮ	44
2.1 Умови вмикання синхронних машин на паралельну роботу.....	44
2.2 Регулювання активної потужності синхронних машин. Кутові характеристики	47
2.3 Регулювання реактивної потужності синхронних машин. U-подібні характеристики	54
2.4 Режими роботи синхронного генератора при паралельній роботі з мережею.....	59
2.4.1 Способи регулювання.....	59
2.4.2 Робота генератора при незмінному струмі збудження	59
2.4.3 Робота генератора при незмінному зовнішньому моменті....	61

3 СИНХРОННІ ДВИГУНИ	63
3.1 Енергетична діаграма синхронного двигуна	63
3.2 Кутові характеристики	65
3.3 Робочі характеристики	67
3.4 Способи пуску	69
3.5 Регулювання частоти обертання	72
3.6 Переваги і недоліки синхронного двигуна порівняно з асинхронним	73
Лабораторна робота № 1С ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА	75
1С.1 Програма виконання лабораторної роботи	75
1С.2 Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи	76
1С.3 Запитання до захисту	81
1С.4 Задачі для самостійного розв'язання	81
Лабораторна робота № 2С ПАРАЛЕЛЬНА РОБОТА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА З МЕРЕЖЕЮ	83
2С.1 Програма виконання лабораторної роботи	83
2С.2 Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи	83
2С.3 Запитання до захисту	87
2С.4 Задачі для самостійного розв'язання	87
Лабораторна робота № 3С ВИПРОБУВАННЯ ТРИФАЗНОГО СИНХРОННОГО ДВИГУНА	89
3С.1 Програма виконання лабораторної роботи	89
3С.2 Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи	89
3С.3 Запитання до захисту	94
3С.4 Задачі для самостійного розв'язання	94
ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ ПІДГОТОВКИ	96
Варіант № 1	96
Варіант № 2	116
Література	135

Перелік позначень

- $\dot{\Phi}_{ad}$ – магнітний потік якоря по повздовжній осі
 $\dot{\Phi}_{aq}$ – магнітний потік якоря по поперечній осі
 $\Delta p_{доод}$ – додаткові втрати
 E_{ad} – ЕРС реакції якоря, обумовлена магнітним потоком Φ_{ad}
 E_{aq} – ЕРС реакції якоря, обумовлена магнітним потоком Φ_{aq}
 \dot{E}_d – повздовжня ЕРС
 \dot{E}_q – поперечна ЕРС
 E_δ – ЕРС в обмотці статора
 \dot{E}_σ – ЕРС, обумовлена потоком розсіювання
 \dot{E}_σ – ЕРС розсіювання по поперечній осі
 $\dot{E}_{\sigma d}$ – ЕРС розсіювання по повздовжній осі
 F_a – магніторушійна сила якоря
 $f_{ген}$ – частота ЕРС генератора
 $f_{мер}$ – частота напруги мережі
 f_n – номінальна частота струму
 I_a – струм якоря
 I_d – повздовжня складова струму якоря
 i_f – струм збудження
 $i_{f0.ном}$ – струм збудження в режимі х.х. при номінальній напрузі
 $i_{fk.ном}$ – струм збудження, що відповідає номінальному струму якоря $I_{аном}$ при к.з.
 I_q – поперечна складова струму якоря
 $\dot{I}_{к.з.}$ – струм к.з.
 k_a – коефіцієнт приведення струму якоря до струму збудження
 $k_{об.f}$ – обмотувальний коефіцієнт обмотки збудження
 $k_{об.a}$ – обмотувальний коефіцієнт обмотки якоря
 $k_{об1}$ – обмотувальний коефіцієнт обмотки статора
 k_n – статичне перевантаження
 L_f – індуктивність обмотки збудження
 L_δ – індуктивність демпферної обмотки
 m – кількість фаз

- m – кількість фаз обмотки якоря
- n – частота обертання ротора
- n_1 – частота обертання магнітного поля, утвореного струмом обмотки статора
- P_2 – корисна потужність
- R_0 – активний опір нульової послідовності
- R_2 – активний опір зворотної послідовності
- R_a – активний опір обмотки якоря
- R_f – активний опір обмотки збудження
- R_δ – активний опір демпферної обмотки
- s – ковзання
- S_3 – зарядна потужність
- $S_{3.2}$ – зарядна потужність генератора
- $S_{3.1}$ – зарядна потужність лінії
- T_f – стала часу обмотки збудження
- U – напруга на навантаженні
- U_0 – напруга нульової послідовності
- U_1 – напруга прямої послідовності
- U_2 – напруга зворотної послідовності
- $U_{мер}$ – напруга мережі
- $U_{ном}$ – номінальна напруга
- w_1 – кількість витків обмотки статора
- w_a – кількість витків обмотки якоря
- w_f – кількість витків обмотки збудження
- X_2 – реактивний опір зворотної послідовності
- X_{ad} – індуктивний опір реакції якоря по поздовжній осі
- X_{aq} – індуктивний опір реакції якоря по поперечній осі
- X_d – синхронний індуктивний опір по повздовжній осі
- X_d'' – надперехідний опір
- X_q – синхронний індуктивний опір по поперечній осі
- X_σ – опір розсіювання обмотки якоря
- \dot{Z}_0 – опір нульової послідовності
- \dot{Z}_0 – повний опір нульової послідовності

- \dot{Z}_1 – опір прямої послідовності
 \dot{Z}_{1d} – опір прямої послідовності по повздовжній осі
 \dot{Z}_{1q} – опір прямої послідовності по поперечній осі
 Z_2 – повний опір зворотної послідовності
 \dot{Z}_2 – опір зворотної послідовності
 Z_{2d} – повний опір зворотної послідовності по повздовжній осі
 Z_{2q} – повний опір зворотної послідовності по поперечній осі
 δ' – зазор між статором і ротором під полюсами явнополюсної машини; зазор між статором і ротором у неявнополюсної машини
 δ'' – зазор між статором і ротором в міжполюсному просторі явнополюсної машини
 $\Delta \dot{E}$ – різниця ЕРС
 Δi_{fa} – приріст струму в обмотці збудження
 ΔU – зміна напруги
 $\Delta p_{ел.а}$ – електричні втрати в якорі
 $\Delta p_{зб}$ – втрати на збудження
 $\Delta p_{маг}$ – магнітні втрати
 $\Delta p_{мех.}$ – механічні втрати
 θ – кут електромагнітного навантаження
 φ – кут між струмом та напругою статора
 ψ – кут між ЕРС холостого ходу і струмом якоря
 Ψ – потокозчеплення
 ω – кругова частота напруги
 ω_1 – кутова швидкість обертання ротора
 a – оператор зсуву
 $ABC_{ген}$ – порядок чергування фаз генератора
 $ABC_{мер}$ – порядок чергування фаз мережі
 $ВКЗ$ – відношення короткого замикання
 E_0 – ЕРС холостого ходу
 $E_{ген}$ – ЕРС генератора
 I_0 – струм нульової послідовності
 I_1 – струм прямої послідовності

- I_2 – струм зворотної послідовності
- i_a – приведений струм якоря до обмотки збудження
- I_3 – зарядний струм
- $i_{ка}$ – аперіодична складова струму к.з.
- $i_{кп}$ – періодична складова струму к.з.
- $i_{уд}$ – ударний струм
- M – момент на валу
- $M_{вх}$ – вхідний момент
- $M_{до}$ – момент демпферної обмотки
- $M_{ем}$ – електромагнітний момент
- $M_{оз}$ – момент обмотки збудження
- $M_{осн}$ – основний момент
- M_n – пусковий момент
- $M_{реакт}$ – реактивний момент
- M_c – синхронізуючий момент
- n_n – номінальна частота обертання
- p – кількість пар полюсів
- P_1 – потужність, що споживається
- $P_{ем}$ – електромагнітна потужність
- P_c – синхронізуюча потужність
- T_δ – стала часу демпферної обмотки
- Φ_0 – магнітний потік індуктора
- Φ_δ – результуючий магнітний потік
- Φ_σ – магнітний потік розсіювання
- Φ_a – магнітний потік реакції якоря
- X_0 – індуктивний опір нульової послідовності
- $X_{\sigma f}$ – індуктивний опір розсіювання обмотки збудження
- $X_{\sigma d}$ – індуктивний опір розсіювання демпферної обмотки
- X_p – опір Потье
- X_c – синхронний індуктивний опір

Вступ

Синхронні машини є машинами змінного струму, в яких частота обертання ротора знаходиться в строгій відповідності з частотою мережі.

Хоча синхронні машини можуть працювати як в двигунному, так і в генераторному режимах, причому вони автоматичного переходять з одного режиму в інший залежно від моменту на валу, однак промисловістю випускаються окремо синхронні двигуни й синхронні генератори.

Для правильної й безаварійної експлуатації синхронних машин необхідно опанувати в процесі навчання не тільки знанням їхньої конструкції, принципу дії, характеристик, але й основами теорії.

З метою полегшення та прискорення підготовки студентів до проведення випробувань в посібнику наведено загальні теоретичні відомості з курсу „Електричні машини” розділу „Синхронні машини”. В кожній роботі, разом із самостійними випробуваннями, передбачається аналіз отриманих результатів та порівняння їх з теоретичними положеннями. Для ґрунтовної підготовки до заняття рекомендується самостійно розв’язати ряд задач, що дозволить краще засвоїти суть роботи та електромеханічні процеси, що досліджуються. В завданнях, що потребують побудови механічних і робочих характеристик, доцільно використовувати технічні засоби моделювання з використанням пакетів прикладних програм типу *MATLAB*, *MathCAD*, *Delphi*, *LabVIEW* та ін.

Для самоперевірки знань запропоновані тестові завдання, які охоплюють весь матеріал даного розділу.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ПРО СИХРОННІ МАШИНИ

Синхронні машини використовують головним чином як джерела електричної енергії змінного струму; їх установлюють на потужних теплових, гідравлічних і атомних електростанціях, а також на пересувних електростанціях і транспортних установках (тепловозах, автомобілях, літаках).

Синхронні машини застосовуються на практиці частіше генератори, рідше двигуни та синхронні компенсатори. Номінальна потужність окремих синхронних машин досягає 1 млн. кВт і більше.

Конструкція синхронного генератора визначається в основному типом привода. У залежності від цього розрізняють турбогенератори, гідрогенератори і дизель-генератори. Турбогенератори приводяться в обертання паровими або газовими турбінами, гідрогенератори – гідротурбінами, дизель-генератори – двигунами внутрішнього згоряння [1].

1.1 Будова та принцип дії синхронних машин

Синхронна машина, як і інші електричні машини, складається з нерухомої частини – статора (якоря) і рухомої – ротора (індуктора). Така конструкція машини називається прямою. Рідко в деяких спеціальних типах машин використовується зворотна конструкція – індуктор у вигляді постійних магнітів або електромагнітів розташований на статорі, а обмотка якоря міститься на роторі й аналогічна до обмотки фазного ротора асинхронної машини.

Магнітопровід статора розташований всередині корпусу. Він набирається зі штампованих кілець (пластин) електротехнічної сталі товщиною 0,5 мм. На внутрішній поверхні пакета виконані пази, в яких розташовується трифазна симетрична обмотка. Таким чином, конструкції статора синхронної і асинхронної машини аналогічні.

Ротор (індуктор) синхронної машини виготовляється явнопольсним (рис. 1.1) і неявнопольсним (рис. 1.2).

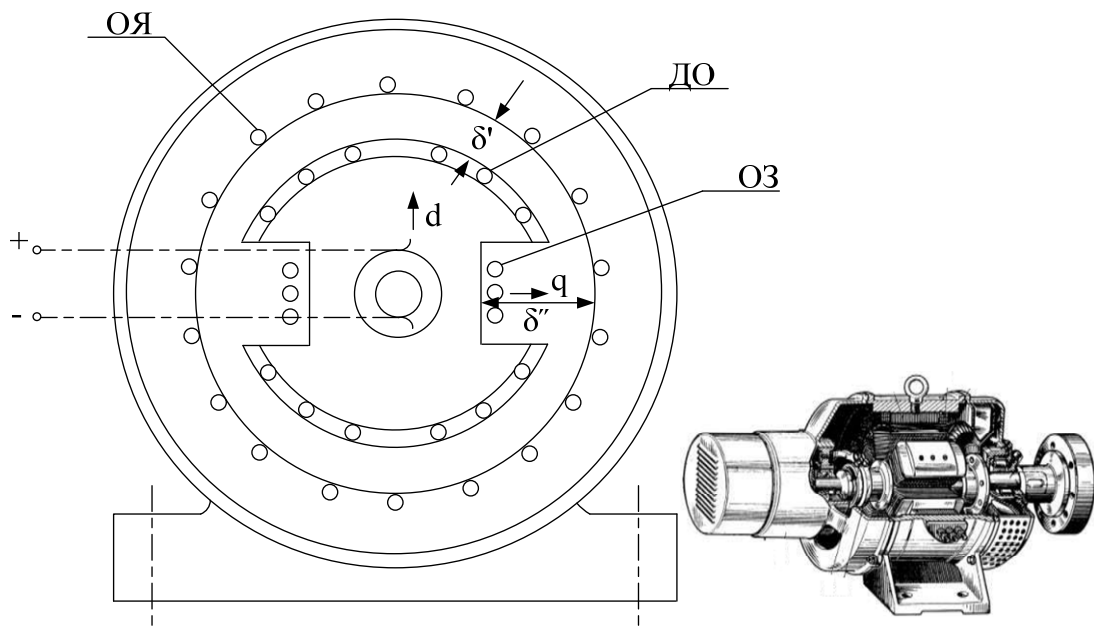


Рисунок 1.1 – Поперечний переріз явнополусної синхронної машини

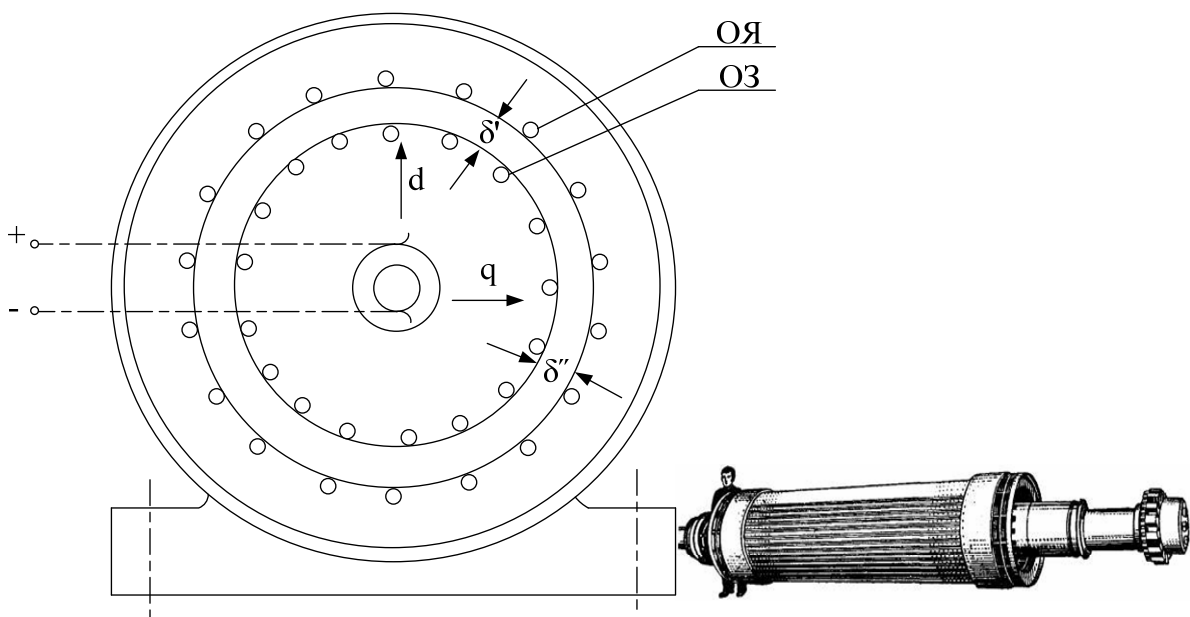


Рисунок 1.2 – Поперечний переріз неявнополусної синхронної машини

Магнітопровід ротора явнополусної машини виконують у вигляді пакета з пластин сталі товщиною 1-2 мм.

На роторі розміщена обмотка збудження (ОЗ), яка складається з котушок, розташованих на кожному полюсі і з'єднаних послідовно. Обмотка збудження живиться постійним струмом від збуджувача (джерела

постійного струму – генератора або акумулятора тощо) через щітковий контакт, розташований на валу машини.

У полюсних наконечниках явнополюсного ротора розміщена демпферна обмотка (ДО). Вона складається з неізольованих стрижнів (латунних, бронзових), вкладених у пази, з'єднаних по торцях короткозамкненими кільцями з мідної шини (рис. 1.1). ДО призначена для демпфування коливань ротора при відхиленні його швидкості від синхронної.

Синхронні машини малої потужності (до 10 кВт) можуть виконуватися без ДО.

Неявнополюсний ротор синхронної машини виконується суцільним, масивним і не містить демпферної обмотки. Її роль виконує масивне тіло ротора, у ньому вільно протікають вихрові струми, які при взаємодії з полем статора створюють демпфуючі моменти на роторі [2].

Магнітна вісь полюсів ротора називається поздовжньою віссю (віссю d) синхронної машини, вісь q – поперечною, вона зміщена щодо поздовжньої осі на 90 ел. град.

У явнополюсній машині зазор між статором і ротором під полюсами δ' і в міжполюсному просторі δ'' неоднаковий; як видно із рис. 1.1, $\delta' < \delta''$. Отже, ротор явнополюсної машини має магнітну асиметрію, оскільки магнітні провідності машини по осях d і q різні (по осі d вона більша). Крім магнітної, для явнополюсного ротора характерна електрична асиметрія, оскільки обмотка збудження створює поле тільки по осі d і взаємодіє з сторонніми полями, що діють по цій осі.

Неявнополюсна синхронна машина, як видно з рис. 1.2, має постійний зазор, рівний δ' по всьому периметру індуктора. Обмотка збудження розміщена в пазах на роторі і розподілена на його поверхні. Неявнополюсний ротор має тільки електричну несиметрію, а як магніт він симетричний.

Розглянемо принцип дії трифазного синхронного генератора. Основним магнітним потоком генератора є потік індуктора Φ_0 , що створюється постійним струмом збудження. Цей струм породжує нерухоме відносно полюсів індуктора магнітне поле, яке при обертанні індуктора обертається з однаковою з ним частотою.

Магнітне коло машини виконується таким, щоб у зазорі на полюсному поділі розподіл поля був синусоїдним.

Нехай ротор синхронної машини приводиться в рух стороннім двигуном (паровою турбіною, гідравлічною турбіною, дизельним двигуном тощо) з частотою n (об/хв). Магнітний потік Φ_0 перетинає провідники обмотки статора та індукуює в них трифазну змінну електрорушійну силу (ЕРС) частотою

$$f_1 = p \cdot n, \quad (1.1)$$

де p – кількість пар полюсів.

Значення фазної ЕРС обмотки якоря синхронної машини на холостому ході визначається як

$$E = 4,44 \cdot f_1 \cdot w_1 \cdot k_{об1} \cdot \Phi_0, \quad (1.2)$$

де w_1 – кількість витків обмотки статора;

$k_{об1}$ – обмотувальний коефіцієнт обмотки статора.

При включенні навантаження в коло трифазної обмотки статора в ній буде протікати трифазна система струмів, яка також створює власне магнітне поле, частота обертання якого визначатиметься за формулою:

$$n_1 = f_1 / p. \quad (1.3)$$

У виразах (1.1) та (1.3) кількість пар полюсів ротора p відповідає кількості пар полюсів обмотки статора, тому отримуємо $n = n_1$.

Таким чином, поле статора і ротора в режимі генератора обертаються з однаковими частотами, а тому вони є нерухомими між собою.

Так, при робочій частоті мережі $f_1 = 50$ Гц і кількості пар полюсів $p = 1$ синхронна частота обертання (об/хв) складатиме:

$$n_1 = 60 \cdot f_1 / p = 60 \cdot 50 / 1 = 3000 \text{ (об/хв)}.$$

Це найбільша синхронна частота обертання в генераторах і двигунів при $f_1 = 50$ Гц (У США, Бразилії, Японії найбільша $n_1 = 3600$ об/хв, оскільки в цих країнах стандартна частота $f_1 = 60$ Гц). При русі збудженого індуктора з постійною швидкістю ($n = \text{const}$) відносно провідників

обмотки статора, індукована ЕРС близька за формою до синусоїдної, оскільки вона повторює в часі форму розподілу поля в просторі зазора [3].

1.2 Реакція якоря в синхронних машинах

При роботі генератора під навантаженням трифазний струм обмотки статора (якоря) I_a з кількістю витків w_a створює власну магніторушійну силу (МРС) $F_a = I_a \cdot w_a$. Вказана МРС створює в повітряному проміжку обертове магнітне поле – потік Φ_a (магнітний потік реакції якоря), який двічі перетинає зазор, охоплює провідники якоря та індуктора, обертаючись з частотою n_1 . Потік Φ_a і дія реакції якоря пропорційні струму якоря I_a (при ненасиченому магнітному колі).

Результуючий потік в повітряному зазорі в режимі навантаження є геометричною сумою потоків Φ_0 і Φ_a , результат взаємодії яких залежить від характеру навантаження (індуктивне, ємнісне, активне і т. п.) [4].

Розглянемо реакцію якоря при чисто активному характері кола якоря. В такому випадку струм статора збігається за фазою з ЕРС генератора, створеною потоком Φ_0 , (кут між ЕРС холостого ходу E_0 і струмом якоря $\psi = 0$). Такий режим можна отримати при активному навантаженні, якщо компенсувати індуктивний опір обмотки якоря ємністю, включеною в коло навантаження. При цьому лінії потоку Φ_a перпендикулярні до осі d машини (рис. 1.3, а). Тому **реакція якоря при $\psi = 0$ називається поперечною**.

З рис. 1.3, а видно, що в повітряному зазорі машини поле поперечної реакції якоря під одним краєм полюса збігається з полем Φ_0 , під іншим – протилежне йому. При додаванні полів Φ_0 і Φ_a магнітне коло під одним краєм полюса насичується, що викликає спотворення синусоїдності розподілу результуючого магнітного поля машини, і, як наслідок, спотворення синусоїдності ЕРС E_δ в обмотці статора. Для зменшення дії потоку Φ_a при навантаженні повітряний зазор синхронного генератора доцільно виконувати збільшенням. При цьому збільшується магнітний опір на шляху магнітного потоку Φ_a , тому при фактичній силі струму I_a значення Φ_a зменшиться. Співвідношення між векторами магнітних потоків і ЕРС, їх взаємний зсув за фазою при активному навантаженні

наведені на векторній діаграмі (рис. 1.3, б). Індукована потіком Φ_0 ЕРС E_0 відносно Φ_0 зсунута за фазою (відстає) на 90° .

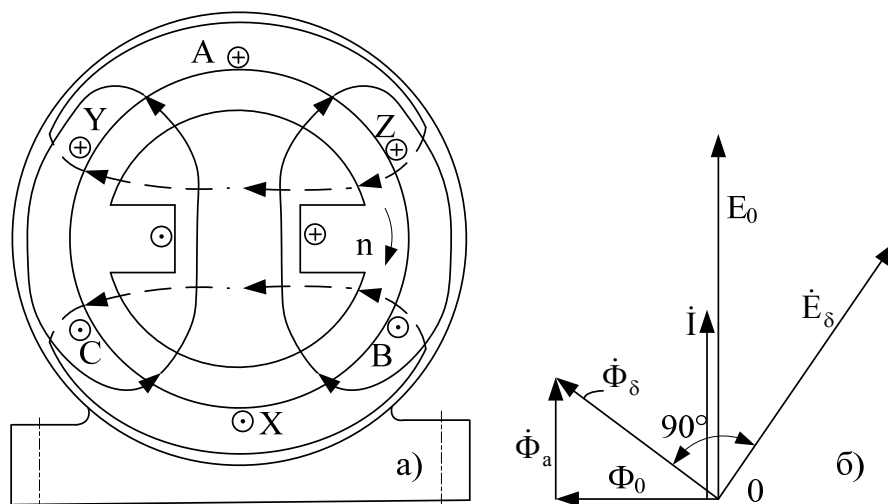


Рисунок 1.3 – Реакція якоря в СМ при активному навантаженні

Якщо навантаження чисто індуктивне, то, нехтуючи активним опором самої обмотки статора, зсув за фазою між E_0 та I_a $\psi = 90^\circ$, а **реакція якоря – поздовжня розмагнічувальна**. Потік Φ_a на всіх ділянках магнітного кола направлений зустрічно потоку Φ_0 (рис. 1.4, а), а обидва потоки Φ_0 і Φ_a протікають по поздовжній осі в індукторі. Векторна діаграма при індуктивному навантаженні показана на рис. 1.4, б.

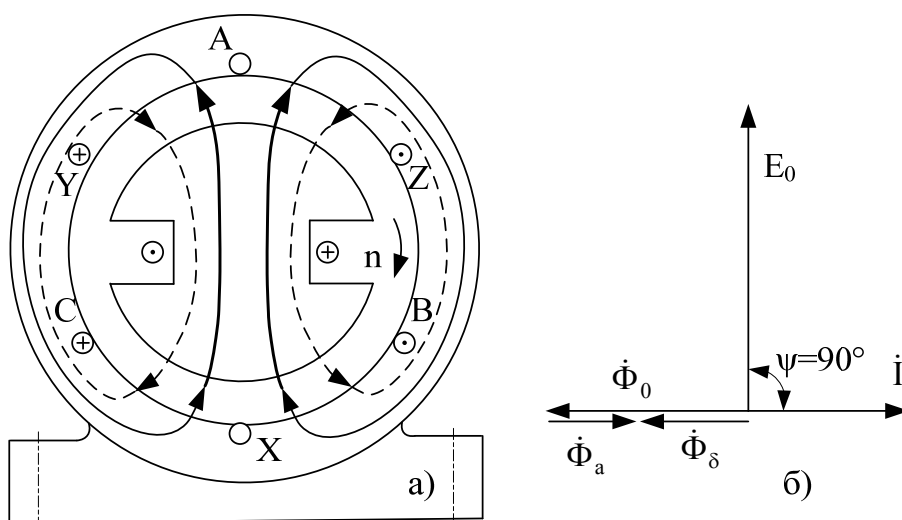


Рисунок 1.4 – Реакція якоря в СМ при індуктивному навантаженні

Оскільки потоки Φ_0 і Φ_a направлені зустрічно, вектори всіх потоків на діаграмі розташовані по осі d . Із зростанням навантаження машини (збільшенням I_a) результуючий магнітний потік Φ_δ під дією розмагнічувальної реакції якоря зменшується, отже E_δ падає, напруга на навантаженні U також зменшується. На практиці зазвичай потрібно підтримувати напругу генератора на номінальному рівні. Тому при індуктивному навантаженні також є сенс збільшити повітряний проміжок машини, щоб зменшити вплив Φ_a на результуючу ЕРС машини.

Якщо навантаження генератора ємнісне ($\psi = -90^\circ$), то **реакція якоря повздовжня намагнічувальна**. Співвідношення між основними величинами, що характеризують такий режим, наведені на векторній діаграмі (рис. 1.5) Потоки Φ_0 і Φ_a додаються на всіх ділянках магнітного кола. Із збільшенням I_a потік Φ_δ зростає, що приводить до збільшення значення U вище номінального, що також потребує обмеження Φ_a (зменшенням зазору машини).

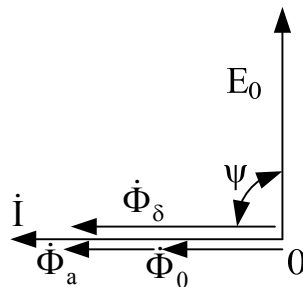


Рисунок 1.5 – Реакція якоря в СМ при ємнісному навантаженні

На практиці в енергосистемі навантаження має активно-індуктивний (змішаний) характер ($0 < \psi < 90^\circ$). Векторна діаграма при такому характері навантаження наведена на рис. 1.6. Кут θ між потоками Φ_0 і Φ_δ називається **кутом електромагнітного навантаження машини**. Реакція якоря при активно-індуктивному навантаженні поздовжньо-поперечна, причому її повздовжня складова – розмагнічувальна.

Струм якоря I_a записують у вигляді двох складових:
– повздовжньої

$$I_d = I_a \cdot \sin(\psi); \quad (1.4)$$

– поперечної

$$I_q = I_a \cdot \cos(\psi). \quad (1.5)$$

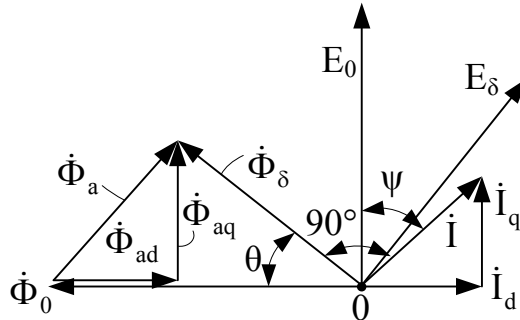


Рисунок 1.6 – Реакція якоря в СМ при змішаному навантаженні

Результуючий магнітний потік в повітряному проміжку:

$$\dot{\Phi}_\delta = \dot{\Phi}_0 + \dot{\Phi}_{ad} + \dot{\Phi}_{aq}, \quad (1.6)$$

де $\dot{\Phi}_{ad}$ – магнітний потік якоря по повздожній осі;

$\dot{\Phi}_{aq}$ – магнітний потік якоря по поперечній осі.

Результуюча ЕРС E_δ записується у вигляді суми окремих ЕРС, які були індуковані потоками Φ_0 , Φ_{ad} і Φ_{aq} :

$$\dot{E}_\delta = \dot{E}_0 + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq}, \quad (1.7)$$

де E_{ad} – ЕРС реакції якоря, обумовлена магнітним потоком Φ_{ad} (при ненасиченому магнітному колі машини);

E_{aq} – ЕРС реакції якоря, обумовлена магнітним потоком Φ_{aq} (при ненасиченому магнітному колі машини).

Оскільки струми, їх магніторушійні сили та відповідні магнітні потоки на комплексній площині збігаються за напрямком, а індуковані цими потоками ЕРС відстають від потоків (МРС та струмів) на $\pi/2$, то коефіцієнтом пропорційності між ЕРС та струмами повинен виступати індуктивний опір. Отже, відповідні ЕРС реакції якоря можуть бути записані у вигляді:

$$\dot{E}_{ad} = -j \cdot \dot{I}_d X_{ad}, \quad (1.8)$$

$$\dot{E}_{aq} = -j \cdot \dot{I}_q X_{aq}, \quad (1.9)$$

де X_{ad} – індуктивний опір реакції якоря по повздовжній осі;

X_{aq} – індуктивний опір реакції якоря по поперечній осі.

1.3 Основні рівняння синхронних машин

Напруга на виводах генератора, що працює з навантаженням, відрізняється від напруги в режимі холостого ходу. Це пояснюється цілим рядом факторів: реакцією якоря, магнітним потоком розсіювання, спадом напруги в активному опорі обмотки статора. При роботі навантаженої машини встановлено, що в ній діє кілька МРС, які, взаємодіючи, створюють результуючий магнітний потік [5]. При аналізі процесів в такій машині виходять з припущення незалежної дії всіх МРС генератора.

Крім основного магнітного потоку та потоку реакції якоря, з обмоткою якоря зчеплений магнітний потік розсіювання Φ_σ , що індукує в обмотці якоря ЕРС розсіювання:

$$\dot{E}_\sigma = -j \cdot \dot{I}_a X_\sigma, \quad (1.10)$$

де X_σ – опір розсіювання обмотки якоря.

Для явнополюсного генератора ЕРС розсіювання можна записати у вигляді:

$$\dot{E}_\sigma = \dot{E}_{\sigma d} + \dot{E}_{\sigma q} = -j \cdot \dot{I}_d X_\sigma - j \cdot \dot{I}_q X_\sigma, \quad (1.11)$$

де $\dot{E}_{\sigma d}$ – ЕРС розсіювання по повздовжній осі;

$\dot{E}_{\sigma q}$ – ЕРС розсіювання по поперечній осі.

Повздовжня ЕРС явнополюсної синхронної машини

$$\dot{E}_d = \dot{E}_{ad} + \dot{E}_\sigma = -j \dot{I}_d (X_{ad} + X_\sigma). \quad (1.12)$$

Поперечна ЕРС явнополюсної синхронної машини

$$\dot{E}_q = \dot{E}_{aq} + \dot{E}_\sigma = -j \dot{I}_q (X_{aq} + X_\sigma). \quad (1.13)$$

Позначимо

$$X_{ad} + X_\sigma = X_d, \quad (1.14)$$

$$X_{aq} + X_\sigma = X_q, \quad (1.15)$$

де X_d – синхронний індуктивний опір по поздовжній осі;

X_q – синхронний індуктивний опір по поперечній осі.

Фазна напруга обмотки якоря генератора, відповідно до другого закону Кірхгофа, рівна сумі ЕРС, індукованих у фазах за винятком спаду напруги в активному опорі фази обмотки якоря R_a . Тому рівняння, складене за цим законом для контуру обмотки якоря матиме вигляд:

$$\dot{U} = \dot{E}_0 + \dot{E}_d + \dot{E}_q - \dot{I}_a R_a, \quad (1.16)$$

де R_a – активний опір обмотки якоря.

З урахуванням (1.12) – (1.15) можемо записати:

$$\dot{U} = \dot{E}_0 - j \dot{I}_d X_d - j \dot{I}_q X_q - \dot{I}_a R_a. \quad (1.17)$$

Таким чином, напруга на виводах фази явнопольсного синхронного генератора рівна ЕРС, створеній основним полем, за винятком спадів напруги в поздовжньому й поперечному синхронних індуктивних опорах якоря. Векторна діаграма напруги явнопольсного синхронного генератора наведена на рис. 1.7.

В неявнопольсному генераторі $X_d = X_q = X_c$ (зазор по всьому периметру індуктора однаковий), опір X_c дістав назву **синхронного індуктивного опору**. З врахуванням цих висновків (1.17) для неявнопольсного генератора можна записати:

$$\dot{U} = \dot{E}_0 - j \dot{I}_a X_c - \dot{I}_a R_a. \quad (1.18)$$

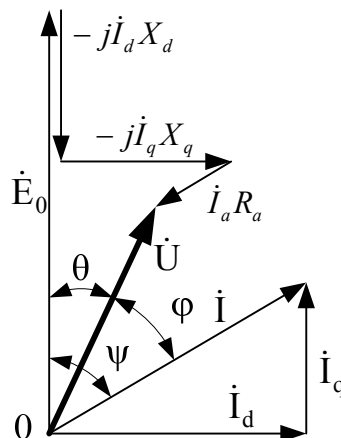


Рисунок 1.7 – Векторна діаграма явнополюсного синхронного генератора

Векторна діаграма неявнополюсного синхронного генератора, побудована за рівнянням (1.18), наведена на рис. 1.8.

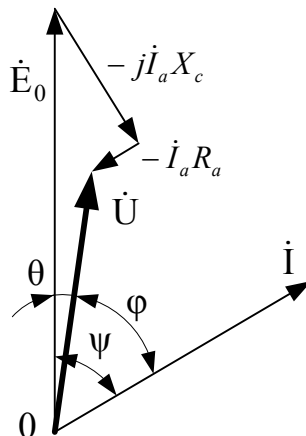


Рисунок 1.8 – Векторна діаграма неявнополюсного синхронного генератора

Як впливає з діаграм на рис. 1.7 і рис. 1.8, кут електромагнітного навантаження θ характеризує зсув не лише між векторами Φ_0 і Φ_δ (див. рис. 1.6), але і зсув за фазою між векторами E_0 та \dot{U} . Обидві діаграми (рис. 1.7 та рис. 1.8) відповідають активно-індуктивному навантаженню.

У режимі синхронного двигуна електромагнітна взаємодія між статором та ротором відрізняється від режиму генератора знаком кута θ (кут θ в синхронному двигуні від'ємний). Ведучим в режимі двигуна є

поле статора, воно зчеплене з полем ротора різнойменними полюсами і приводить його в рух із синхронною швидкістю. Якщо до ротора прикласти гальмівний момент навантаження, то його швидкість залишиться тією ж, але він зміститься відносно осі полюсів поля статора на кут, що відповідає куту навантаження θ .

Синхронні двигуни виготовляються тільки явнополюсними.

Основним рівнянням синхронного двигуна є рівняння балансу напруг, складене за другим законом Кірхгофа для контуру обмотки якоря.

$$\dot{U} = -\dot{E}_0 + \dot{I}_a R_a + j\dot{I}_d X_d + j\dot{I}_q X_q. \quad (1.19)$$

Векторна діаграма синхронного двигуна в режимі перезбудження показана на рис. 1.9. При перезбудженні струм є випереджаючим, тобто кут між ЕРС та струмом $\psi < 0$.

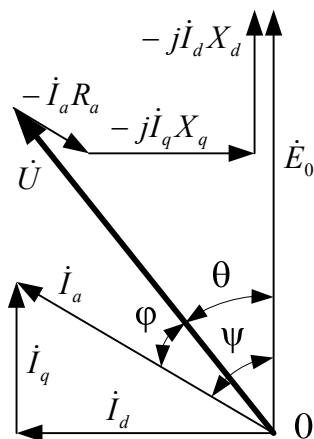


Рисунок 1.9 – Векторна діаграма синхронного двигуна

1.4 Характеристики синхронних генераторів

Серед різноманітних характеристик синхронних генераторів окрему групу складають характеристики, що визначають залежність між напругою на виводах якоря U , струмом якоря I_a і струмом збудження i_f при номінальних частотах струму $f=f_n$ (або номінальних частотах обертання $n=n_n$) і незмінному куті між струмом та напругою статора $\varphi = \text{const}$ у

сталому режимі роботи. Ці характеристики дають наочне уявлення про ряд основних властивостей синхронних генераторів. Вони можуть бути побудовані за розрахунковими даними, за допомогою векторних діаграм або за даними відповідних дослідів. Характеристики явнополюсних і неявнополюсних генераторів в основному однакові [6].

1.4.1 Характеристика холостого ходу

Характеристика холостого ходу (х.х.) визначає залежність $U = f(i_f)$ при $I = 0$ і $f = f_n$.

Характеристика холостого ходу обумовлюється магнітними властивостями синхронної машини. Може бути отримана з розрахунку магнітного кола або з дослідним шляхом.

Згідно з основним рівнянням генератора (1.17), (1.18) в режимі холостого ходу $U = E$. Характеристики х.х. різних синхронних генераторів можна зобразити у відносних одиницях:

$$U^* = U / U_{ном}, \quad (1.20)$$

$$i_f^* = i_f / i_{f0.ном}, \quad (1.21)$$

де $i_{f0.ном}$ – струм збудження в режимі х.х. при номінальній напрузі $U = U_{ном}$.

Такі характеристики мало відрізняються одна від одної. Тому при розрахунках різних режимів роботи енергетичних систем, у яких працює багато генераторів, для спрощення розрахунків приймається, що характеристики х.х. усіх турбогенераторів, а також характеристики х.х. усіх гідрогенераторів, виражені у відносних одиницях, однакові і відповідають деяким середнім даним реальних характеристик генераторів. Такі *характеристики* називаються *нормальними* (рис. 1.10).

1.4.2 Характеристика короткого замикання

Характеристика короткого замикання (к.з.) знімається при замиканні виводів усіх фаз обмотки якоря накоротко (симетричне коротке замикання) і визначає залежність $I_a = f(i_f)$ при $U = 0$ і $f = f_n$.

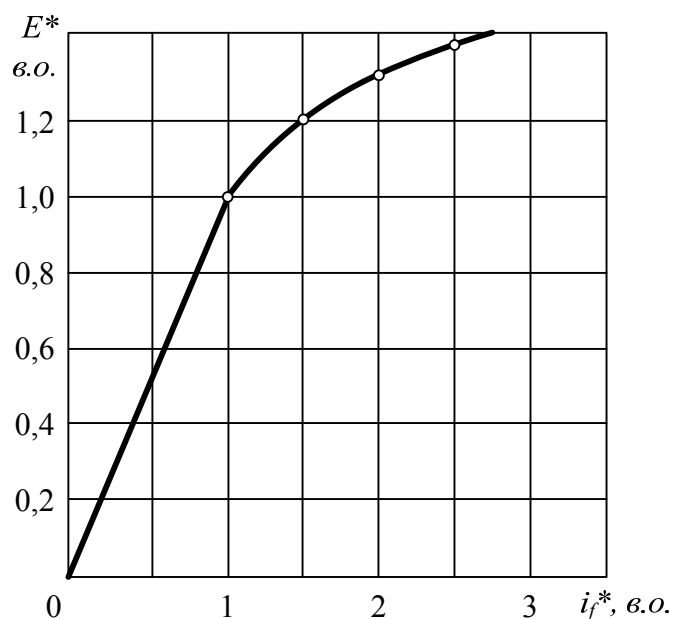


Рисунок 1.10 – Нормальна характеристика холостого ходу синхронного генератора

Якщо знехтувати досить незначним активним опором якоря ($R_a = 0$), то опір кола якоря в режимі короткого замикання буде чисто індуктивним. Тому $\psi = 90^\circ$, $I_q = 0$, $I_d = I_a$ і на підставі рівняння (1.17)

$$\dot{E}_0 = j\dot{I}_d X_d. \quad (1.22)$$

Таким чином, при к.з. в обмотці якоря протікає чисто індуктивний струм, який створює поздовжню розмагнічувальну реакцію якоря. Внаслідок цього при короткому замиканні магнітне коло машини не насичене і характеристика к.з. $I_a = f(i_f)$ прямолінійна.

Характеристики х.х. і к.з. (рис. 1.11) дають можливість визначити важливий параметр синхронної машини – **відношення короткого замикання (ВКЗ)**. Відношенням короткого замикання називають відношення струму збудження, що відповідає номінальній напрузі при х.х. до струму збудження, що відповідає номінальному струму при к.з.

$$BKЗ = i_{f0,ном} / i_{fk,ном}, \quad (1.23)$$

де $i_{fk,ном}$ – струм збудження синхронного генератора, що відповідає номінальному струму якоря $I_{аном}$ при к.з.

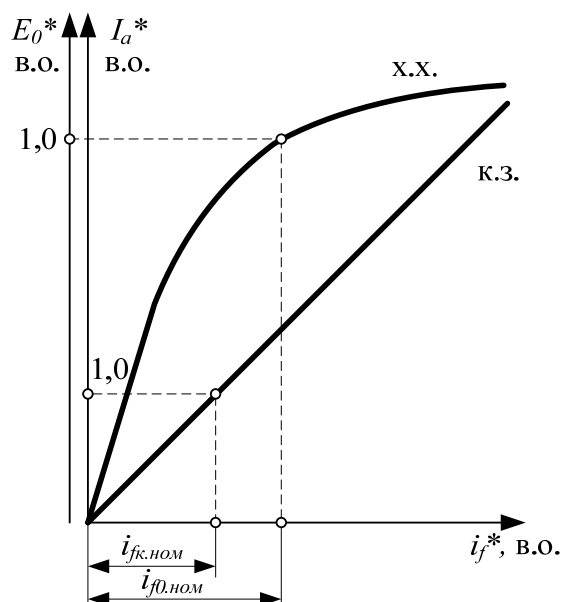


Рисунок 1.11 – Характеристика короткого замикання синхронного генератора

Відношення $BKЗ$ має велике практичне значення при аналізі властивостей синхронної машини: машини з малим $BKЗ$ мають меншу статичну стійкість (здатність утримуватись в синхронізмі) при паралельній роботі з мережею, мають більші коливання напруги при різких змінах навантаження, однак вони мають менші габарити та дешевші, ніж машини з більшим значенням $BKЗ$. Неявнополюсні машини (турбогенератори) мають $BKЗ = 0,4 \dots 0,7$, а явноплюсні машини (гідрогенератори) мають $BKЗ = 1,0 \dots 1,4$. Тому сталий струм короткого замикання у синхронній машині може бути меншим номінального.

Значення $BKЗ$ обернено пропорційне синхронному опору по поздовжній осі X_d :

$$BKЗ = \frac{U_n}{I_n \cdot X_d} = \frac{1}{X_d^*}.$$

$BKЗ$ тим більше, чим менше відносне значення X_d^* та більша величина повітряного зазору між статором і ротором.

Величина $BKЗ$ важлива при експлуатації синхронної машини. Вона показує кратність струму короткого замикання та визначає значення потужності, якою можна навантажити генератор.

Мале значення $BKЗ$ виходить при великому значенні X_d , що визначає великий спад напруги при навантаженні та зниженні граничної потужності генератора при даному збудженні. Велике значення X_d означає, що повітряний зазор між статором та ротором малий і проведення основного магнітного потоку не потребує великої МРС збудження, що, у свою чергу, визначає компактність розмірів статора. Синхронна машина стає дешевшою.

При великому повітряному зазорі $BKЗ$ має велике значення. Що потребує збільшення числа витків обмотки збудження та розмірів ротора. Це здорожує машину, але властивості її покращуються: менше значення X_d , менший спад напруги на навантаженні, вища максимальна потужність при даному збудженні.

1.4.3 Навантажувальна характеристика

Навантажувальна характеристика – це залежність напруги на виводах обмотки якоря від струму збудження $U = f(i_f)$, при постійному навантаженні $I_a = \text{const}$, $\cos\varphi = \text{const}$, та постійній швидкості обертання. Навантажувальну характеристику (рис. 1.12) отримують для індуктивного навантаження з $\cos\varphi < 0,2$ при $I_a = I_{аном}$.

Характеристика холостого ходу є граничним випадком навантажувальної характеристики при $I_a = 0$. При індуктивному навантаженні реакція якоря повздовжня розмагнічувальна, її магнітний потік послаблює основне поле, створене струмом збудження, зменшуючи цим результуючу ЕРС генератора, а отже, і напругу U . Тому навантажувальна характеристика розташована нижче характеристики холостого ходу.

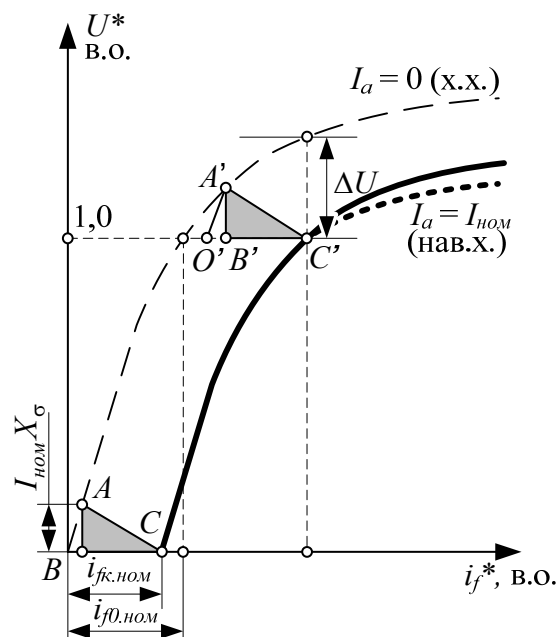


Рисунок 1.12 – Навантажувальна індукційна характеристика синхронного генератора

Навантажувальну характеристику можна побудувати за допомогою характеристик холостого ходу, короткого замикання та характеристичного трикутника ABC (рис. 1.12). Точка C трикутника знаходиться на осі струму збудження і відповідає такому значенню i_f , при якому в режимі к.з. ($U = 0$) струм якоря I_a рівний номінальному, координату цієї точки можна визначити з характеристики к.з. Координата точки A визначається, виходячи з відомого значення індуктивного опору розсіювання обмотки статора X_σ шляхом відкладання на осі напруги значення, що відповідає спаду напруги на опорі розсіювання $I_{ном}X_\sigma$. Якщо X_σ невідоме, то його визначають з трикутника $A'B'C'$: відрізок $O'C'$ рівний відрізку OC , з точки O проводять пряму, паралельну до лінійної частини характеристики х.х. і на перетині з цією характеристикою знаходять точку B' . Далі X_σ знаходять за виразом:

$$X_\sigma = B'C' / I_{ном}. \quad (1.24)$$

Точку B отримують шляхом опускання перпендикуляра з т. A до перетину з віссю i_f . Катет BC трикутника відповідає МРС реакції якоря, вираженій в масштабі струму збудження. Лінія розрахункової

навантажувальної характеристики являє собою геометричне місце т. C при паралельному перенесенні трикутника ABC вздовж характеристики х.х.

Експериментальна навантажувальна характеристика відрізняється від розрахункової тим, що в діапазоні значень $U > U_{ном}$ проходить нижче від розрахункової, оскільки при значних значеннях i_f збільшується *відносно* значення магнітних потоків розсіювання обмотки збудження, що веде до відповідного зменшення приросту основного магнітного потоку Φ_0 , зниження приросту ЕРС E_0 та напруги U , відповідно.

1.4.4 Зовнішні характеристики

Зовнішні характеристики є основними експлуатаційними характеристиками генераторів. Зовнішні характеристики відображують залежність напруги на виводах генератора від навантаження $U = f(I_a)$ при постійному струмі збудження $i_f = \text{const}$. На характер зовнішніх характеристик сильно впливає $\cos\varphi$ навантаження. На рис. 1.13 наведені зовнішні характеристики генератора для трьох значень $\cos\varphi$ навантаження.

При індуктивному навантаженні ($\varphi > 0$) напруга на виводах генератора знижується внаслідок дії двох факторів: збільшення спаду напруги на опорі кола якоря та зниження магнітного потоку через розмагнічувальну дію реакції якоря.

При активному навантаженні ($\varphi = 0$) напруга на виводах також буде знижуватись внаслідок дії обох факторів, але вплив поперечної реакції якоря на результуючий магнітний потік та ЕРС машини менший, тому характеристика має жорсткий характер.

При ємнісному навантаженні ($\varphi < 0$) напруга на виводах генератора збільшується внаслідок зростання результуючого магнітного потоку через намагнічувальну дію реакції якоря. Швидкість наростання напруги при ємнісному навантаженні менша за швидкість зниження при індуктивному навантаженні, оскільки зростання ЕРС E_0 внаслідок намагнічувальної дії реакції якоря повинно компенсувати спад напруги на опорі кола якоря.

Найчастіше синхронні генератори розраховуються для роботи з індуктивним навантаженням з $\cos\varphi = 0,8$, при якому зміна напруги ΔU складає 25...35%.

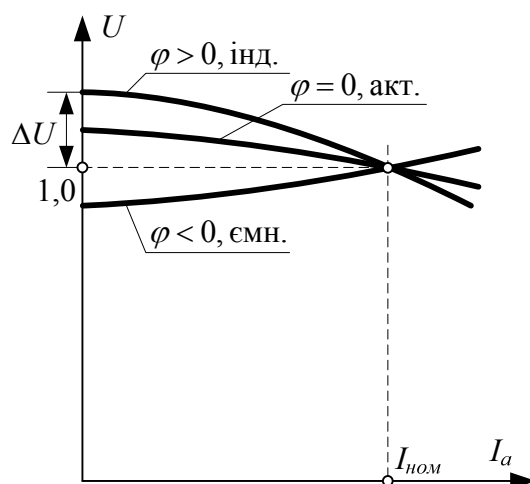


Рисунок 1.13 – Зовнішні характеристики синхронного генератора

1.4.5 Регулювальні характеристики

Регулювальна характеристика визначає залежність струму збудження i_f від навантаження (струму якоря I_a), необхідну для підтримання постійної напруги на виводах $U = U_{ном} = \text{const}$. Фактично регулювальні характеристики є дзеркальним відображенням зовнішніх характеристик для відповідного характеру навантаження (рис. 1.14). Це пояснюється тим, що при відхиленні напруги від номінального значення можливість впливу на неї з метою повернення до початкового значення є лише одна – це регулювання струму збудження (швидкість обертання для синхронної машини змінювати не можна і для всіх характеристик $n = n_{ном} = \text{const}$).

Наприклад, регулювальна характеристика для індуктивного навантаження проходить найвище, оскільки при значному зниженні напруги потребується така ж «протидія» – значне збільшення струму збудження. Для ємнісного навантаження потрібне навіть зниження струму збудження, оскільки в повітряному проміжку вже діє намагнічувальна реакція якоря, яка підсилює основний магнітний потік Φ_0 і сприяє збільшенню напруги.

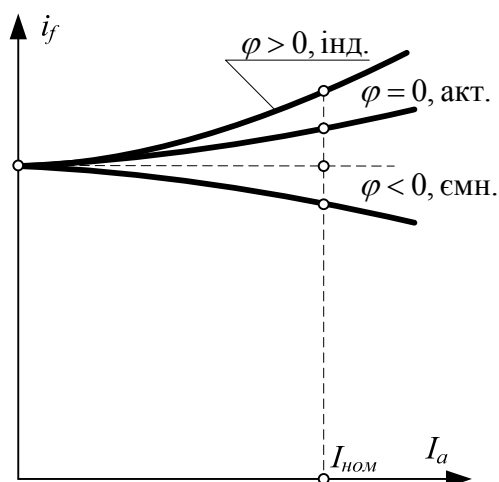


Рисунок 1.14 – Регулювальні характеристики синхронного генератора

1.5 Практична діаграма електрорушійних сил генератора

При проектуванні та експлуатації синхронних машин існує необхідність визначення струму збудження, потрібного для забезпечення заданого режиму роботи (U , I_a , $\cos\varphi$) з врахуванням насичення магнітної системи. З цією метою для неявнополюсних машин використовується спрощена діаграма електрорушійних сил, яка була запропонована французьким електротехніком *Потьє*. Мета побудови діаграми – отримання регулювальної характеристики $i_f = f(I_a)$ для заданого значення напруги та характеру навантаження [7]. Вихідними даними до побудови практичної діаграми є:

- характеристика холостого ходу машини $E_0 = f(i_f)$;
- задане значення характеру навантаження $\cos\varphi$;
- відоме значення опору Потьє X_p , яке близьке до індуктивного опору розсіювання обмотки якоря X_σ ($X_p = 1,05 \dots 1,1 \cdot X_\sigma$), визначається за (1.24);
- параметри обмоток якоря та збудження w_a , $k_{об.а}$, w_f , $k_{об.ф}$, що необхідні для приведення струму якоря до масштабу струму збудження ($k_{об.а}$ – обмотувальний коефіцієнт обмотки якоря; w_f – кількість витків обмотки збудження; $k_{об.ф}$ – обмотувальний коефіцієнт обмотки збудження).

В першу чергу визначають коефіцієнт приведення струму якоря до струму збудження, що визначається з умови рівності МРС реальної та приведеної обмотки:

$$k_a = \frac{2m}{\pi} \cdot \frac{w_a \cdot k_{об.а}}{w_f \cdot k_{об.ф}}, \quad (1.25)$$

де m – кількість фаз.

Після цього для побудови регулювальної характеристики задаються діапазоном зміни струму навантаження I_a в межах від 0 до $1,25 \cdot I_{ном}$, для якого знаходять відповідні значення приведенного струму якоря до обмотки збудження:

$$i_a = I_a \cdot k_a. \quad (1.26)$$

Побудована діаграма Потьє для трьох значень струму якоря (0, $0,5I_{ном}$ та $I_{ном}$) наведена на рис. 1.15. Для практики побудова проводиться для 6...7 точок регулювальної характеристики. Стрілками показано послідовність отримання відповідних значень струму збудження: i_{f0} , i_f' та $i_{f,ном}$.

Розглянемо послідовність знаходження струму збудження, наприклад, для струму якоря, що відповідає номінальному значенню $i_{a,ном}$. На площині характеристики х.х. відкладається з початку координат по осі ЕРС вектор напруги заданої величини (номінальне значення $U_{ном}$).

Відповідно до заданого характеру навантаження $\cos\phi$ в сторону відставання на кут ϕ відносно вектора $U_{ном}$ відкладається вектор струму $i_{a,ном}$, в масштабі струму збудження. Перпендикулярно до напрямку струму якоря з кінця вектора $U_{ном}$ відкладається в масштабі напруг спад напруги на індуктивному опорі Потьє $I_{ном}X_p$. Геометрична сума векторів $U_{ном}$ та $I_{ном}X_p$ рівна ЕРС E_δ , яка наводиться в повітряному зазорі результуючим магнітним потоком

$$\dot{\Phi}_\delta = \dot{\Phi}_0 + \dot{\Phi}_a. \quad (1.27)$$

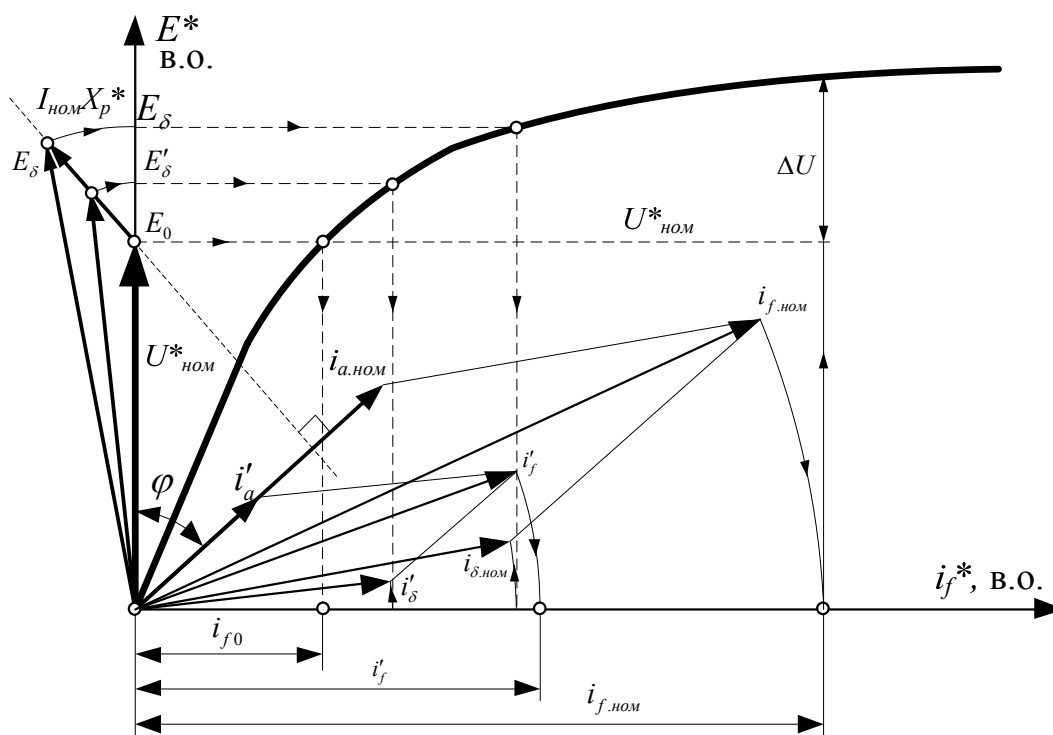


Рисунок 1.15 – Практична діаграма електрорушійних сил синхронного генератора

Значенню ЕРС E_δ відповідає значення струму збудження i_δ , яке знаходиться за допомогою характеристики х.х. Геометричне місце вектора струму i_δ визначається на площині побудови практичної діаграми як перпендикуляр до E_δ – це пояснюється тим, що вектор магнітного потоку Φ_δ (та відповідно вектор МРС F_δ) проходить перпендикулярно до ЕРС. При побудові практичної діаграми допускають спрощення: фактично вектори Φ_δ , F_δ та i_δ випереджують вектор E_δ на кут $\pi/2$, а на діаграмі будуються в сторону відставання. Однак при побудові результатом є визначення скалярного значення струму збудження, а тому таке спрощення є правомірним, оскільки дає ті ж результати, що і при використанні повної векторної діаграми машини.

Виходячи з рівняння рівноваги МРС та рівноваги приведених струмів

$$i_f = i_a + i_\delta \quad (1.28)$$

знаходиться вектор струму збудження i_f , що відповідає номінальному навантаженню.

За відомим значенням струму збудження $i_{f,ном}$ в режимі номінального навантаження можна за допомогою практичної діаграми знайти зміну напруги ΔU як різницю між ЕРС в номінальному режимі і напругою U . Часто цю різницю виражають у відсотках до номінальної напруги

$$\Delta U_{\%} = \frac{E_0 - U_{ном}}{U_{ном}} \cdot 100\%. \quad (1.29)$$

Зміна напруги для турбогенераторів складає 25...35 %, що слід враховувати при різкому скиді навантаження і переході до роботи в режимі х.х.

1.6 Робота синхронних генераторів з несиметричним навантаженням

При роботі з несиметричним навантаженням струми в фазах генератора будуть відрізнятися і зсув між ними в загальному випадку може відрізнятися від 120° . Для дослідження роботи генератора в такому режимі використовується *метод симетричних складових*, згідно з яким несиметрична система струмів розкладається на симетричні складові прямої I_1 , зворотної I_2 та нульової I_0 послідовностей [8].

Суттєвою особливістю струмів прямої послідовності є те, що вони створюють магнітне поле, яке синхронно переміщується з ротором, тобто є нерухомим відносно ротора.

Магнітні поля струмів прямої та зворотної послідовностей в повітряному зазорі обертаються в протилежних напрямках і електромагнітні зв'язки з ротором виявляються різними. Поле струмів зворотної послідовності створює на ротор додатковий гальмівний момент, що знижує ККД машини. При значній несиметрії під дією саме струмів зворотної послідовності може виникнути недопустимий нагрів демпферної обмотки та масивних частин ротора. В результаті взаємодії магнітного потоку збудження та магнітного потоку струмів зворотної послідовності на

ротор діють знакозмінні механічні зусилля з подвійною частотою мережі. Ці зусилля викликають додатковий шум та вібрацію машини.

Поле струмів нульової послідовності відрізняється від полів прямої та зворотної послідовностей тим, що є пульсуючим. Тому опори прямої, зворотної та нульової послідовностей в синхронних машинах різні.

Несиметричну систему струмів пов'язують з відповідною несиметричною системою фазних напруг U_a , U_b та U_c , кожен з яких також можна розкласти на симетричні складові прямої U_1 , та зворотної U_2 та нульової U_0 . Рівняння рівноваги ЕРС для однієї фази, наприклад фази А, будуть мати вигляд:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_0 + \dot{I}_1 \dot{Z}_1; \\ \dot{U}_2 = \dot{I}_2 \dot{Z}_2; \\ \dot{U}_0 = \dot{I}_0 \dot{Z}_0, \end{cases} \quad (1.30)$$

де \dot{Z}_1 , \dot{Z}_2 , \dot{Z}_0 – опори прямої, зворотної та нульової послідовностей.

Струми прямої послідовності I_1 відповідають струмам симетричного навантаження. Вони створюють реакцію якоря, опори обмотки якоря для них однакові: індуктивні X_d , X_q та активний R_a . Опір прямої послідовності для неявнополюсної машини рівний:

$$\dot{Z}_1 = R_a + jX_c, \quad (1.31)$$

а для неявнополюсної –

$$\dot{Z}_{1d} = R_a + jX_d; \quad (1.32)$$

$$\dot{Z}_{1q} = R_a + jX_q, \quad (1.33)$$

де \dot{Z}_{1d} – опір прямої послідовності по повздовжній осі;

\dot{Z}_{1q} – опір прямої послідовності по поперечній осі.

Струми зворотної послідовності створюють магнітне поле, яке рухається відносно поля струмів прямої послідовності з ковзанням $s = 2$. Опір зворотної послідовності рівний:

$$\dot{Z}_2 = R_2 + jX_2, \quad (1.34)$$

де R_2 та X_2 – активний та індуктивний опори зворотної послідовності.

Активний опір $R_2 > R_1$, оскільки до R_2 входить складова втрат в роторі через протікання струмів зворотної послідовності в контурах ротора (ідентична до втрат від перемагнічування та вихрових струмів, викликаних протіканням магнітного потоку зворотної послідовності). Ці втрати додатково збільшуються за рахунок електричних втрат за наявності демпферної обмотки.

Індуктивний опір зворотної послідовності $X_2 \ll X_1$. Струми зворотної послідовності в демпферній обмотці ротора мають частоту $f_2 = 2 \cdot f_1$ і створюють власне поле, яке в свою чергу нерухоме відносно поля струмів зворотної послідовності статора. Цим вони послаблюють вплив поля зворотної послідовності статора на осерді ротора та зменшують несиметрію. Індуктивний опір зворотної послідовності близький до індуктивного опору розсіювання обмотки якоря $X_2 \approx X_\sigma$.

Для визначення опору зворотної послідовності та його складових проводять спеціальний дослід: в двигунному режимі при пониженій напрузі на обмотці якоря ротор обертають із синхронною швидкістю в зворотному до поля напрямку. При цьому вимірюються струми, напруги та активна потужність в колі статора. Виходячи з відомого значення опору R_1 та виміряних втрат активної потужності, знаходять активну складову опору зворотної послідовності R_2 . За відомими струмами та напругами знаходять значення повного опору зворотної послідовності Z_2 , після чого визначається індуктивний опір X_2 :

$$X_2 = \sqrt{Z_2^2 - R_2^2}. \quad (1.35)$$

В явнополюсних машинах опори зворотної послідовності по поздовжній Z_{2d} та поперечній Z_{2q} осях відрізняються ($Z_{2d} \neq Z_{2q}$). Результуючий опір Z_2 знаходять дослідним шляхом, а для визначення складових використовують співвідношення

$$\dot{Z}_2 = \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2} = \frac{2 \cdot \dot{Z}_{2d} \dot{Z}_{2q}}{\dot{Z}_{2d} + \dot{Z}_{2q}}, \quad (1.36)$$

яке витікає з визначення середнього струму зворотної послідовності в досліді

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{I}_{2d} + \dot{I}_{2q}}{2}. \quad (1.37)$$

В сучасних неявнополюсних синхронних машинах $X_2^* = 0,12 \dots 0,18$, а в явнополюсних $X_2^* = 0,2 \dots 0,4$. Враховуючи, що $R_2 \ll X_2$, можна вважати повний опір зворотної послідовності близьким до його індуктивної складової $Z_2 \approx X_2$.

Струми нульової послідовності збігаються за напрямком у всіх фазах і тому не створюють обертового поля та, відповідно, обертового моменту на ротор.

Струми нульової послідовності \dot{I}_0 мають місце тоді, коли є вивід нульової точки обмотки статора або тоді, коли ця точка заземлена. Ці струми значно менше впливають на роботу синхронної машини, аніж струми зворотної послідовності.

Струми нульової послідовності при протіканні по фазних обмотках якоря, зміщених в просторі на 120° , створюють фазні МРС. Перші (основні) гармоніки цих фазних ЕРС в кожен момент часу мають однакове значення, але виявляються зміщеними в просторі теж на кут 120° . Їх сума буде рівною нулю і поля основної гармоніки струми нульової послідовності не створюють. Поле в повітряному проміжку будуть створювати пульсуючі МРС гармонік, кратних 3. Поля від цих гармонік невеликі, тому ЕРС та струми, які ці поля індукують в демпферній обмотці та обмотці збудження також малі.

Опір нульової послідовності визначається дослідним шляхом при послідовному з'єднанні усіх фаз генератора та обертанні його із синхронною швидкістю. Повний опір нульової послідовності:

$$\dot{Z}_0 = R_0 + jX_0, \quad (1.38)$$

де R_0 та X_0 – активний та індуктивний опори нульової послідовності.

Активний опір R_0 дещо більший за активний опір обмотки якоря R_a через втрати від струмів нульової послідовності в демпферній обмотці, але

на практиці вважають $R_0 \approx R_a$. Індуктивний опір X_0 визначається полями розсіювання обмотки якоря, тому вважається, що $X_0 \approx X_a$.

Обмотки синхронних генераторів з'єднують в зірку, а нульову точку заземлюють через достатньо великий опір. Тому струми нульової послідовності практично не впливають на роботу машини.

Отже, несиметрія навантаження приводить до спотворення симетрії напруг генератора і відповідно до збільшення втрат. Несиметрія навантаження, при якій допускається тривала робота синхронної машини, обмежується допустимими значеннями нагріву та вібрацій. Тривала робота турбо- та гідрогенераторів зі струмами, що не перевищують номінальних значень, допускається, якщо різниця струмів у фазах не перевищує $10\% I_{ф.ном.}$

1.7 Несиметричні короткі замикання синхронних генераторів

Несиметричне коротке замикання є граничним випадком несиметричного навантаження. Розрізняють три види несиметричного короткого замикання:

- коротке замикання однієї фази (однофазне к.з.);
- двофазне коротке замикання (лінійне к.з.);
- подвійне двофазне коротке замикання (двофазне к.з. на нуль).

Схеми коротких замикань вказаних видів наведені на рис. 1.16.

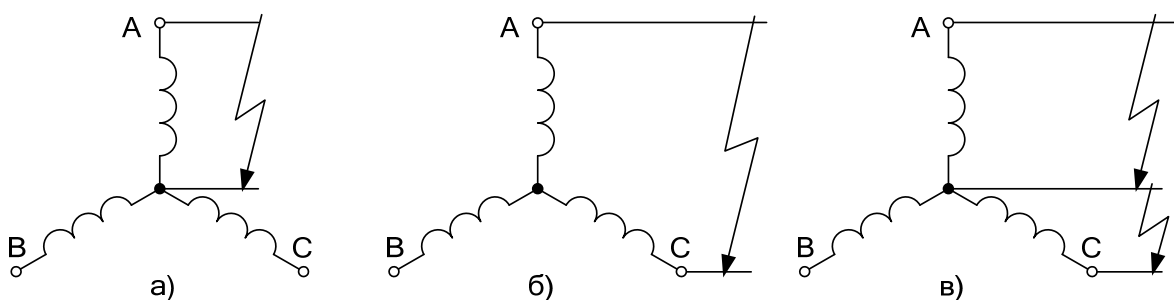


Рисунок 1.16 – Схеми несиметричних коротких замикань:

а) однофазне, б) двофазне, в) подвійне однофазне

Усталені значення струмів несиметричних коротких замикань отримують шляхом використання методу симетричних складових [9]. При однофазному к.з. струми прямої і зворотної послідовностей інших фаз рівні нулю згідно з рис. 1.16, а, а струм у фазі А матиме всі складові і буде визначатися за виразом:

$$\dot{I}_{к.з.} = \dot{I}_A = 3 \cdot \dot{E} / (\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \dot{Z}_0). \quad (1.39)$$

Потрійне збільшення струму к.з. порівняно з його фазним значенням обумовлене тим, що після розкладання його на симетричні складові струми прямої, зворотної та нульової послідовності матимуть ненульові значення в усіх фазах:

$$\dot{I}_{A1} = (\dot{I}_A + \dot{I}_B \cdot a + \dot{I}_C \cdot a^2); \quad (1.40)$$

$$\dot{I}_{A2} = (\dot{I}_A + \dot{I}_B \cdot a^2 + \dot{I}_C \cdot a) / 3; \quad (1.41)$$

$$\dot{I}_{A0} = (\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C) / 3, \quad (1.42)$$

де a – оператор зсуву ($a = e^{j120^\circ}$).

Індуктивні опори набагато більші за активні, тому можна вважати, що $\dot{Z}_1 = jX_d$, $\dot{Z}_2 = jX_2$, $\dot{Z}_0 = jX_0$. При таких умовах струм к.з. є чисто індуктивним і створює поздовжню розмагнічувальну реакцію якоря, але лише в одній фазі. На решту фаз такої реакції якоря не виявляється, тому магнітне поле збудження не повною мірою гаситься полем реакції якоря, ЕРС \dot{E} буде мати достатньо велике значення, а звідси випливає, що усталене значення струму при такому виді к.з. буде найбільшим порівняно з рештою видів.

Струм при двофазному к.з. протікає послідовно по двох фазних обмотках, а лінійна напруга між цими фазами рівна нулю (на рис. 1.16, б $U_{AC} = 0$). Струми к.з. згідно зі схемою визначатимуться $\dot{I}_A = -\dot{I}_C$, $\dot{I}_B = 0$. При цьому струми симетричних складових можуть також бути виражені через один з фазних струмів, наприклад \dot{I}_A :

$$\dot{I}_{A1} = \frac{\dot{I}_A}{3}(1 - a), \quad (1.43)$$

$$\dot{I}_{A2} = \frac{\dot{I}_A}{3} (1 - a^2), \quad (1.44)$$

$$\dot{I}_{A0} = \frac{\dot{I}_A + \dot{I}_C}{3} = 0. \quad (1.45)$$

Враховуючи (1.45), оскільки при двофазному к.з. струм в нульовому проводі відсутній, результуючий струм двофазного к.з. визначатиметься, виходячи з лінійного значення ЕРС та опорів прямої та зворотної послідовностей

$$\dot{I}_A = \sqrt{3} \cdot \frac{\dot{E}}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2}. \quad (1.46)$$

При подвійному однофазному к.з. (рис. 1.16, в) напруги у відповідних фазах, які замкнені накоротко, такі: $U_A = U_C = 0$. При цьому симетричні складові струму у фазі А:

$$\dot{I}_{A1} = \frac{\dot{I}_A + a \cdot \dot{I}_C}{3}, \quad (1.47)$$

$$\dot{I}_{A2} = \frac{\dot{I}_A + a^2 \cdot \dot{I}_C}{3}, \quad (1.48)$$

$$\dot{I}_{A0} = \frac{\dot{I}_A + \dot{I}_C}{3}. \quad (1.49)$$

При розв'язанні системи рівнянь (1.47–1.49) отримаємо:

$$\dot{I}_A = \sqrt{3} \cdot \dot{E} \cdot \frac{\sqrt{\dot{Z}_2^2 + \dot{Z}_0^2 + \dot{Z}_2 \dot{Z}_0}}{\dot{Z}_1 \dot{Z}_2 + \dot{Z}_1 \dot{Z}_0 + \dot{Z}_2 \dot{Z}_0}. \quad (1.50)$$

Найбільш небезпечними для машини є внутрішні несиметричні к.з., коли частина витків обмотки замикаються на корпус або виникає замикання частини витків двох фаз. Внутрішні несиметричні к.з. приводять до пожежі в міді та в сталі і важкої аварії синхронної машини.

Єдиним способом уникнення аварій, викликаних внутрішніми несиметричними к.з., є високоякісне виготовлення синхронних машин.

1.8 Раптове коротке замикання в синхронних генераторах

При роботі синхронного генератора може виникнути к.з. раптово. В перший момент к.з. виникає перехідний процес, який супроводжується протіканням великих струмів, що в кілька разів перевищують номінальне значення. Ці струми викликають значні електродинамічні зусилля, які можуть привести до пошкодження обмотки та руйнування ізоляції.

Електромагнітні процеси, які мають місце при раптовому к.з. під час роботи з навантаженням мало відрізняються від випадку, коли раптове к.з. трапилось під час роботи на х.х. Тому розглянемо перехідний процес при початкових умовах, що відповідають режиму х.х., тобто $t = 0$, струм $i_a(t) = i_a(0) = 0$. Диференційне рівняння, яким описується контур обмотки якоря при раптовому к.з.

$$-d\Psi(t)/dt = i(t)R_a, \quad (1.51)$$

де Ψ – потокозчеплення.

При $X_a \gg R_a$ можна прийняти $R_a \rightarrow 0$, звідки

$$d\Psi(t)/dt = 0, \Psi(t) = \text{const}. \quad (1.52)$$

Отже, раптове к.з. слід розглядати, виходячи з принципу постійного потокозчеплення. Згідно з цим принципом після виникнення к.з. при раптовій зміні струму в статорі в обмотках ротора (демпферній та збудження) виникає додатковий струм, який запобігає проникненню потоку розмагнічувальної реакції якоря в ротор [10].

При зміні струму якоря в перший момент часу після виникнення к.з. додатковий струм в демпферній обмотці перешкоджає проникненню зустрічного потоку реакції якоря в обмотку збудження. Це положення визначається *надперехідним опором* машини X_a'' . Розподіл струмів по обмотках та їх магнітні потоки в перший момент після виникнення к.з. наведено на електромагнітній схемі машини на рис. 1.17, а.

Додатковий *струм* при раптовому к.з. для утримання постійного потокозчеплення в демпферній обмотці *називається ударним* $i_{y\delta}$, оскільки саме вона приймає першою на себе різкий стрибок потоку з боку обмотки якоря. Приріст струму в обмотці збудження Δi_{fa} викликаний тою ж причиною, що і в демпферній обмотці. Схема заміщення машини, яка відповідає надперехідному опору X_d'' , наведена на рис. 1.17, б.

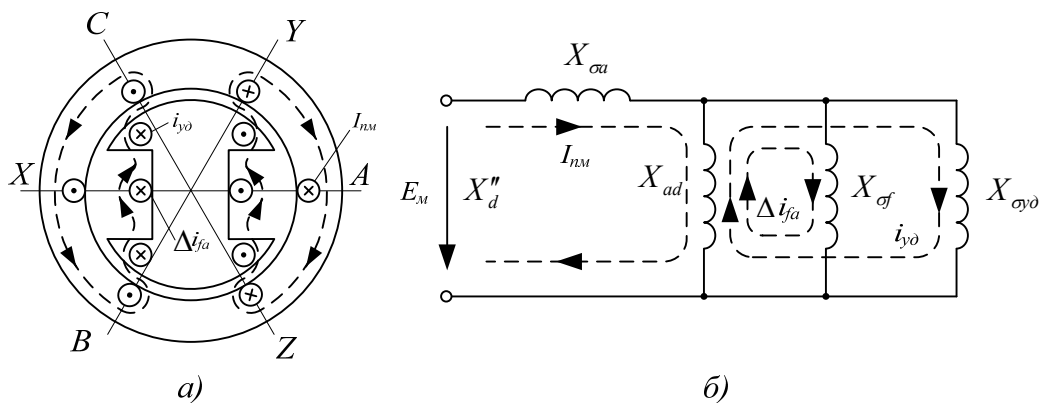


Рисунок 1.17 – Синхронна машина при раптовому короткому замиканні в перший момент часу: а) електромагнітна схема; б) схема заміщення

Додатковий струм в обмотці ротора означає деяке зменшення вхідного опору синхронної машини, тому надперехідний опір є найменшим порівняно з наступними етапами протікання перехідного процесу. Згідно зі схемою заміщення надперехідний опір визначатиметься за виразом

$$X_d'' = X_{\sigma i} + \frac{1}{1/X_{ad} + 1/X_{of} + 1/X_{\sigma y\delta}}, \quad (1.53)$$

де X_{of} та $X_{\sigma y\delta}$ – індуктивні опори розсіювання обмотки збудження та демпферної обмотки, відповідно.

З часом струм $i_{y\delta}$ в демпферній обмотці знижується, тривалість його дії визначається сталою часу демпферної обмотки $T_\delta = L_\delta/R_\delta$ (L_δ , R_δ – індуктивність та активний опір демпферної обмотки). Приріст струму в обмотці збудження зменшується довше, оскільки вона має більшу сталу часу $T_f = L_f/R_f \gg T_\delta$ (L_f , R_f – індуктивність та активний опір обмотки

збудження). Такий стан машини, при якому постійне потокозчеплення підтримується лише за рахунок додаткового струму в обмотці збудження, характеризується **перехідним опором** машини. Розподіл струмів, магнітних потоків та схема заміщення машини, що відповідають перехідному опору, наведені на рис. 1.18.

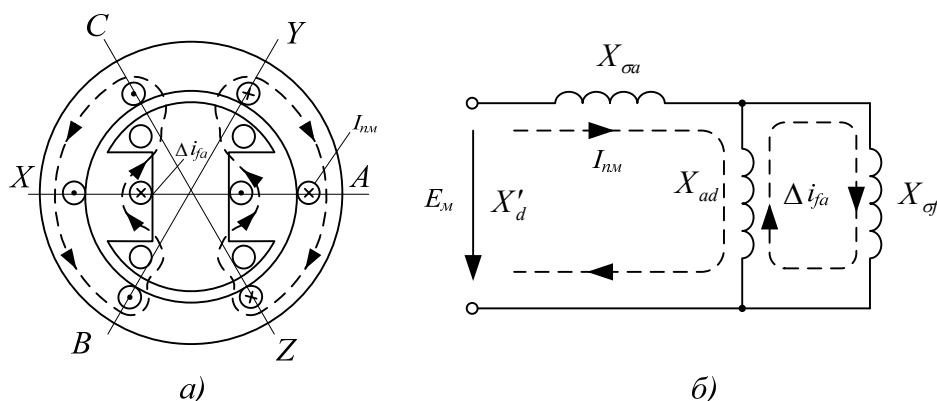


Рисунок 1.18 – Синхронна машина при раптовому короткому замиканні в другий момент часу: а) електромагнітна схема; б) схема заміщення

Згідно зі схемою заміщення на рис. 1.18, б, перехідний опір машини визначатиметься за виразом

$$X'_d = X_{\sigma a} + \frac{1}{1/X_{ad} + 1/X_{of}}. \quad (1.54)$$

Після закінчення перехідного процесу приріст струму в обмотці збудження зменшується, а магнітний потік реакції якоря вже безперешкодно протікає через масивне осердя ротора. Такий режим роботи відповідає усталеному режиму к.з., який описаний в п. 1.4.2. В усталеному режимі вхідний опір машини визначається синхронним індуктивним опором X_d , а для неявнополюсної машини X_c . Розподіл струмів, магнітних потоків та схема заміщення машини, що відповідають усталеному режиму к.з., наведені на рис. 1.19.

При раптовому к.з. в струмах обмотки якоря є періодична i_{kn} та аперіодична i_{ka} складові (рис. 1.20). Періодичні складові фазних струмів створюють обертове магнітне поле, яке нерухоме відносно ротора.

Аперіодичні складові створюють нерухоме магнітне поле відносно обмоток якоря, яке наводить в обмотках ротора змінні струми з частотою мережі. Початкове значення аперіодичної складової струму якоря залежить від моменту виникнення к.з.

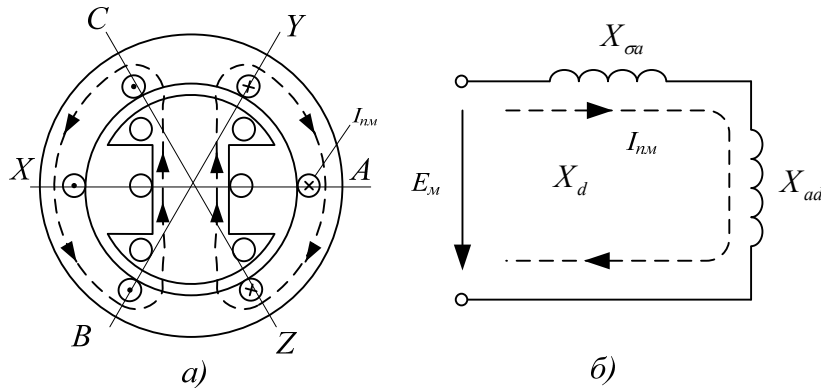


Рисунок 1.19 – Синхронна машина в усталеному режимі короткого замикання: а) електромагнітна схема, б) схема заміщення

Найбільш небезпечним для синхронної машини є ударне значення струму к.з. I_{yd} (рис. 1.20). Для машини з демпферною обмоткою воно може бути обчислене за виразом

$$I_{yd} = 1.05 \cdot 1.8 \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot U_{ном}}{X''_d}, \quad (1.55)$$

а для машини без демпферної обмотки $X''_d = X'_d$.

Коефіцієнт 1,8 враховує згасання аперіодичної складової струму, а коефіцієнт 1,05 приймається для врахування допустимого завищення напруги $U_{ном}$ на 5% [9].

Теплова дія струмів короткого замикання не становить для машини особливої небезпеки, тому що струми досить швидко згасають і, крім того, релейний захист досить швидко відключає ділянку мережі, де відбулося коротке замикання.

Небезпечні електродинамічні зусилля діють на лобові частини обмоток і пропорційні квадрату струму короткого замикання. Ці зусилля прагнуть відігнути лобові частини обмотки статора до більшого діаметра, ближче до

торцевої поверхні сердечника якоря. Крім того, такі зусилля діють також між котушковими групами різних фаз і окремих котушок.

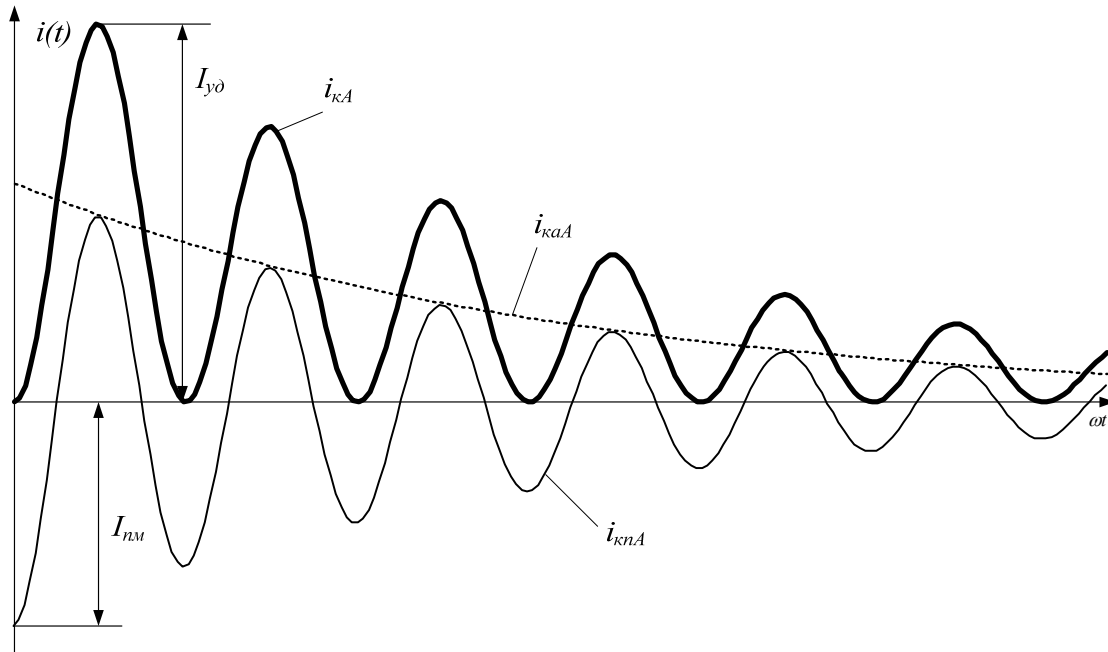


Рисунок 1.20 – Струми якоря при раптовому короткому замиканні

Циклічні деформації лобових частин, особливо перегини при виході з паза, можуть викликати ушкодження ізоляції і її пробій. Тому в потужних машинах потрібне досить надійне кріплення лобових частин.

Постійна складова електромагнітного моменту, що діє на вал машини при раптовому короткому замиканні, невелика, тому що струми короткого замикання є практично чисто індуктивними.

Пульсуючі складові моменту, що виникають у результаті взаємодії магнітних потоків, що рухаються відносно один одного, досить великі. Крім того, у початковий момент короткого замикання машина випробує сильний удар, тому що енергія магнітних полів у цей момент значно зростає за рахунок кінетичної енергії ротора. Це обумовлює виникнення гальмівного моменту, що має характер короткочасного імпульсу. Унаслідок викладеного велика увага повинна приділятися забезпеченню механічної міцності машини.

2 ПАРАЛЕЛЬНА РОБОТА СИНХРОННИХ МАШИН З МЕРЕЖЕЮ

2.1 Умови вмикання синхронних машин на паралельну роботу

Синхронні машини в основному працюють паралельно з іншими синхронними машинами як в межах однієї електростанції, так і в межах енергосистеми. Електричні станції об'єднані в єдину енергетичну систему, тому всі синхронні генератори в такій системі підключені через трансформатори до спільних шин. Спільними шинами є високовольтні лінії електропередач, а навантаженням – асинхронні та синхронні електродвигуни, освітлювальні та інші електроустановки, які також підключені через трансформатори.

При дослідженні електромагнітних та електромеханічних процесів в синхронних машинах, які працюють паралельно з мережею, вважається, що мережа має великий запас потужності, тому вхідний опір мережі приймають рівним нулю, а амплітуда та частота напруги мережі завжди незмінні. Згідно з такими припущеннями робота окремої синхронної машини практично не впливає на мережу, а будь-які зміни в роботі машини будуть відображатися в першу чергу на її енергетичних та силових характеристиках [11].

Окремо взятий синхронний генератор на електростанції протягом року не постійно знаходиться в експлуатації. Існують періоди технічного обслуговування, поточного ремонту, випробувань тощо, під час яких генератор тимчасово виводиться з роботи, а потім повинен бути увімкнений в роботу. Процес увімкнення синхронної машини в роботу називається *синхронізацією*. Синхронізація може бути точною та грубою.

При точній синхронізації потрібно слідкувати за виконанням таких умов:

- частота напруги мережі $f_{мер}$ та частота ЕРС генератора $f_{ген}$ повинні бути однаковими;
- напруга мережі $U_{мер}$ та ЕРС $E_{ген}$ генератора повинні бути однаковими;
- порядок чергування фаз мережі $ABC_{мер}$ повинен відповідати порядку чергування фаз генератора $ABC_{ген}$.

Аналітично ці умови можуть бути записані у вигляді системи рівнянь

$$\begin{cases} f_{мер} = f_{ген} \\ U_{мер} = E_{ген} \\ ABC_{мер} = ABC_{ген} \end{cases} \quad (2.1)$$

Рівність частот досягається шляхом регулювання швидкості обертання ротора (за допомогою парової, гідравлічної турбіни, дизельного двигуна тощо), а рівність напруг – шляхом регулювання струму збудження синхронної машини.

При таких умовах в контурі «мережа – машина» сума ЕРС рівна нулю (рис. 2.1), а ЕРС постійно знаходиться у протифазі до напруги мережі і врівноважує її, тобто

$$\dot{U}_{мер} + \dot{E}_{ген} = 0. \quad (2.2)$$

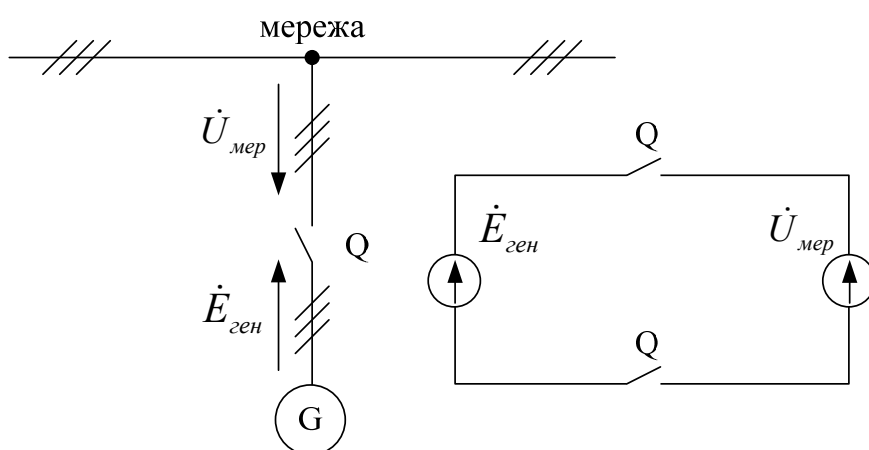


Рисунок 2.1 – Контур синхронізації «мережа – машина»

Якщо умова (2.2) виконується, то струм через точку підключення генератора до мережі не протікатиме, що відповідатиме оптимальному моменту вмикання машини на паралельну роботу. Порядок чергування фаз, рівність частот і амплітуд напруг генератора та мережі, а також фазовий зсув між ними визначається за допомогою **синхроскопів**. Найпростішим синхроскопом є ламповий синхроскоп, схема якого наведена на рис. 2.2.

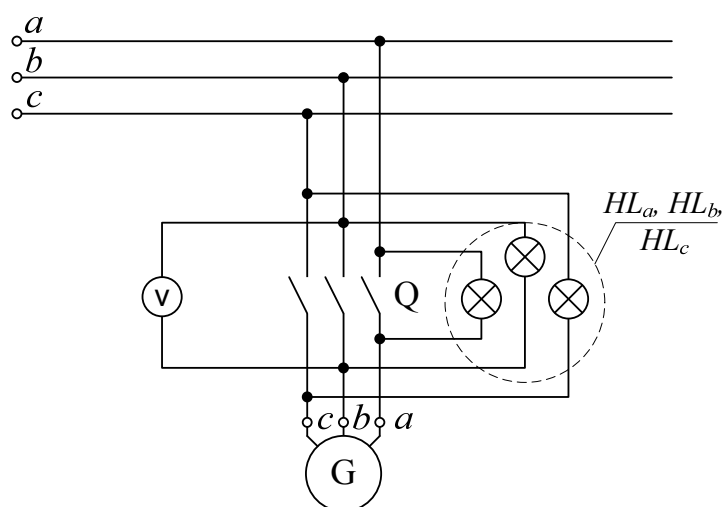


Рисунок 2.2 – Схема вмикання лампового синхроскопа

При правильному чергуванні фаз, рівності напруг мережі та генератора, рівності частот лампи синхроскопа $HL_a - HL_c$ одночасно гаснуть (така схема називається «вмикання на згасання»). За допомогою такого синхроскопа легко досліджувати природу додаткових струмів, які протікатимуть через контур «машина – мережа» при недотриманні умов синхронізації.

На електростанціях в ряді випадків використовується метод грубої синхронізації або **самосинхронізації**. Обмеження на використання вмикання із самосинхронізацією накладаються з метою збереження надійності синхронної машини. Самосинхронізація використовується для генераторів з потужністю не більше 500 МВт. При самосинхронізації мають місце складні електромагнітні та електромеханічні перехідні процеси. В обмотках короткочасно протікають струми, які перевищують номінальні значення, що супроводжується механічними імпульсами (ударами) на обмотки, вал машини та з'єднувальну муфту з турбіною.

Самосинхронізація забезпечується таким чином. Ротор генератора розганяється до швидкості майже синхронної (напрямок обертання відповідає фазуванню виводів генератора, що має збігатися з відповідним фазуванням мережі). Потім обмотка якоря підключається до мережі та швидко подається напруга на обмотку збудження, що забезпечує протікання струму збудження не менше, ніж $i_{f0,ном}$. Різниця між швидкістю обертання ротора та швидкістю обертання магнітного поля статора майже

рівна нулю, тому під дією синхронізуючого моменту генератор сам втягується в синхронізм.

За виконанням умов синхронізації в сучасних машинних залах електростанцій слідкують спеціальні мікропроцесорні системи керування, вхідними даними для яких є змінні рівнянь (2.1), отримані від відповідних сенсорів, а вихідними командами – значення швидкості обертання турбіни та струму збудження. Такі системи інтегруються разом з системами автоматичного регулювання збудження генераторів, діагностики в АСУ ТП електростанції.

2.2 Регулювання активної потужності синхронних машин. Кутові характеристики

Розглянемо синхронну машину, яка працює паралельно з дотриманими умовами синхронізації (2.1). Векторна діаграма, яка ілюструє роботу машини в такому режимі, відповідає рівнянню (2.2) і наведена на рис. 2.3, а. Вектори ЕРС генератора $E_{ген}$ та напруги мережі $U_{мер}$ знаходяться в протифазі, мають рівні довжини і обертаються на комплексній площині з круговою частотою $\omega = 2\pi f$ (при цьому $f_{мер} = f_{ген}$).

Якщо ротор машини під дією надлишкового моменту турбіни почне прискорюватись, то в контурі «мережа – машина» рівновага ЕРС порушиться й виникне різниця ЕРС $\Delta\dot{E}$, яка знаходитиметься за виразом

$$\Delta\dot{E} = \dot{U}_{мер} + \dot{E}_{ген}. \quad (2.3)$$

Під дією різниці ЕРС $\Delta\dot{E}$ через обмотку якоря машини та точку підключення до мережі протікатиме струм \dot{I}_a , електромагнітне зусилля якого направлене на утримання ротора машини в синхронізмі. Тому фактично прискорення ротора не відбудеться, але він зміститься відносно свого початкового положення на кут θ/p в напрямку дії надлишкового моменту. Значення кута θ визначається величиною надлишкового моменту, однак залежність між ними нелінійна і буде встановлена далі. Крім того, кут θ/p між магнітними полями збудження (ротора) та якоря (статора) відповідає куту θ на комплексній площині між векторами ЕРС та

напруги, вираженому в електричних градусах. Струм якоря машини в такому випадку знаходиться за законом Ома:

$$\dot{I}_a = \frac{\Delta \dot{E}}{jX_c} = -j \frac{\Delta \dot{E}}{X_c}. \quad (2.4)$$

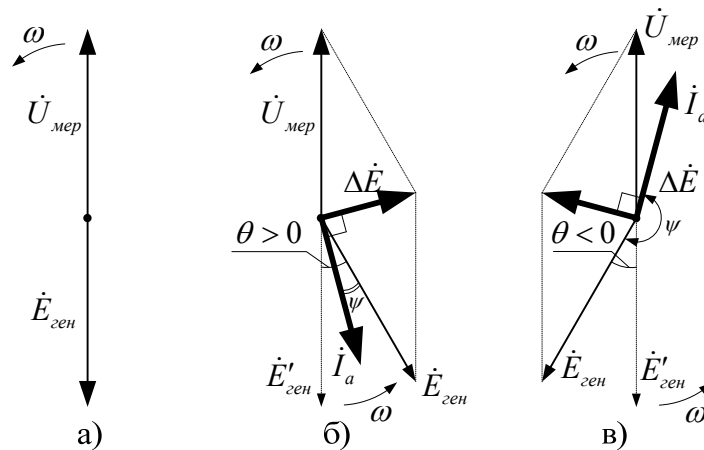


Рисунок 2.3 – Спрощені векторні діаграми синхронної машини при паралельній роботі з мережею

Оскільки $U = U_{мер} = \text{const}$, то силу струму I_a (а як наслідок – і активну потужність) можна змінювати тільки двома способами:

- змінюючи ЕРС E_0 за величиною;
- змінюючи ЕРС E_0 за фазою.

Векторна діаграма, яка ілюструє роботу синхронної машини з випереджаючим кутом електромагнітного навантаження θ , наведена на рис. 2.3, б. З векторної діаграми випливає, що при додатному значенні кута електромагнітного навантаження ($\theta > 0$), кут між ЕРС машини $\dot{E}_{ген}$ та струмом якоря \dot{I}_a гострий, тобто $\psi < \pi/2$.

Електромагнітна потужність, що розвивається синхронною машиною визначається за виразом

$$P_{ем} = m \cdot E_{ген} \cdot I_a \cdot \cos \psi, \quad (2.5)$$

де m – кількість фаз обмотки якоря ($m = 3$ для трифазних машин) [12].

При значенні кута $\psi < \pi/2$ його косинус буде більшим нуля, при цьому вся електромагнітна потужність P_{em} також буде більшою нуля. Це означає, що активна потужність, яка має місце при відповідному куті $\theta > 0$, віддається в мережу і машина працює в генераторному режимі. Очевидно, що при збільшенні надлишкового моменту на вал машини з боку турбіни кут θ буде зростати, вектор $\Delta \vec{E}$ також буде зростати і за законом Ома буде рости струм якоря I_a . Як наслідок, рости й електромагнітна потужність машини P_{em} , яка крім втрат віддається в мережу. Таким чином маємо таке перетворення потужностей в синхронній машині: при збільшенні потужності на валу (спожитої потужності)

$$P_1 = M \cdot \omega_1, \quad (2.6)$$

де ω_1 – кутова швидкість обертання ротора, рад/с, ($\omega_1 = 2\pi f/p$);

M – момент на валу,

збільшується і електромагнітна потужність машини, яка відповідає потужності, що передається за допомогою магнітного поля через повітряний зазор від ротора до статора.

Таким чином, для збільшення навантаження генератора необхідно збільшувати прикладений до його вала зовнішній момент (тобто обертовий момент первинного двигуна), а для зменшення навантаження – зменшувати цей момент.

При збільшенні електромагнітної потужності буде зростати, відповідно і корисна активна потужність, яка віддається в мережу:

$$P_2 = m U_{мер} \cdot I_a \cdot \cos\varphi. \quad (2.7)$$

Однак для випадку з $\theta > 0$ кут $\varphi > \pi/2$, а коефіцієнт потужності машини $\cos\varphi < 0$. Тому і вся корисна потужність виявляється від'ємною $P_2 < 0$. Це пояснюється тим, що корисна потужність визначається відносно мережі і для генератора вона є від'ємною, оскільки генератор не споживає потужність з мережі, а віддає в мережу.

Якщо до вала машини, яка працює паралельно з мережею, після виконання умов синхронізації (2.1), прикласти додатковий гальмівний момент, то ротор намагатиметься сповільнитись, його вісь зміститься

відносно початкового положення на кут $\theta/p < 0$. Векторна діаграма для такого випадку наведена на рис. 2.3, в. Порядок визначення величини та напрямку струму якоря \dot{I}_a зберігається. Знайдений таким чином струм якоря матиме додатну проекцію на вектор напруги мережі $U_{мер}$ та від'ємну проекцію на вектор ЕРС машини $E_{ген}$. Це означає, що кут $\varphi < \pi/2$, а кут $\psi > \pi/2$, відповідно знаки електромагнітної та корисної потужностей зміняться. Додатна корисна потужність P_2 свідчить про те, що активна електрична потужність споживається з мережі, а це відповідає двигунному режиму роботи. Спожита з мережі потужність витрачається машиною на подолання додаткового гальмівного моменту та утримання машини в синхронізмі.

При зміні напрямку зовнішнього моменту (якщо вал ротора не обертає, а гальмує) машина автоматично переходить з генераторного в двигунний режим.

Для уточнення залежності потужності та моменту синхронної машини від кута електромагнітного навантаження скористаємось основним рівнянням явнопольосної машини з припущенням, що $R_a = 0$. Основне рівняння матиме вигляд

$$\dot{U} = \dot{E} - j\dot{I}_d X_d - j\dot{I}_q X_q. \quad (2.8)$$

Векторна діаграма синхронної машини, яка описана рівнянням (2.8), наведена на рис. 2.4.

З векторної діаграми кут $\varphi = \psi - \theta$. Корисна потужність P_2 (2.7) може бути записаною через різницю кутів:

$$P_2 = m U \cdot I_a \cdot \cos(\psi - \theta). \quad (2.9)$$

З використанням елементарних тригонометричних перетворень вираз (2.9) запишемо

$$P_2 = m U \cdot (I_a \cdot \cos\psi \cdot \cos\theta + I_a \cdot \sin\psi \cdot \sin\theta). \quad (2.10)$$

Враховуючи, що $I_a \cdot \cos\psi = I_q$, а $I_a \cdot \sin\psi = I_d$, отримаємо

$$P_2 = m U \cdot (I_q \cdot \cos\theta + I_d \cdot \sin\theta). \quad (2.11)$$

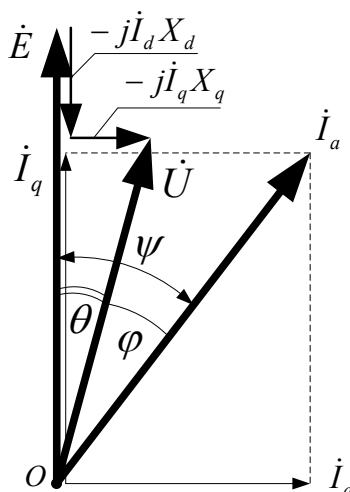


Рисунок 2.4 – Спрощена векторна діаграма явнополюсної СМ

Використовуючи метод проєкцій з векторної діаграми знаходимо значення струмів I_d та I_q .

$$I_d = \frac{E - U \cdot \cos \theta}{X_d}, \quad (2.12)$$

$$I_q = \frac{U \cdot \sin \theta}{X_q}. \quad (2.13)$$

Після підстановки знайдених значень I_d та I_q в (2.11) та спрощення виразу отримаємо

$$P_2 = \frac{m \cdot U \cdot E}{X_d} \sin \theta + \frac{mU^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin(2\theta). \quad (2.14)$$

Цей вираз є шуканою залежністю потужності синхронної машини від кута електромагнітного навантаження θ і називається **кутовою характеристикою** синхронної машини [5, 8]. Потужність в синхронних машинах прямопропорційна моменту, оскільки швидкість обертання постійна. Крім того, з точки зору електромеханіки, момент частіше використовується для проведення інженерних розрахунків динаміки руху

вала машини, зусиль які діють на вал тощо. Тому часто використовують кутову характеристику моменту синхронної машини, яка отримана з (2.14) з врахуванням залежності електромагнітного моменту

$$M_{em} = P_{em} / \omega_1, \quad (2.15)$$

та припущенням, що електричні втрати в статорі машини $\Delta p_{ел.а} \rightarrow 0$. В такому разі електромагнітна потужність $P_{em} = P_2$. Кутова характеристика моменту явнопольсної машини матиме вигляд

$$\begin{aligned} M_{em} &= \frac{m \cdot U \cdot E}{\omega_1 \cdot X_d} \sin(\theta) + \frac{mU^2}{2 \cdot \omega_1} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin(2\theta) = \\ &= M_{осн} + M_{реакт.} \end{aligned} \quad (2.16)$$

Перша складова моменту $M_{осн}$ називається **основною**, оскільки залежить від струму збудження через ЕРС E . Друга складова $M_{реакт.}$ називається **реактивною**, оскільки від струму збудження не залежить і визначається явнопольсністю машини за рахунок того, що $X_d \neq X_q$. За рахунок реактивної складової явнопольсна машина може утримуватись в синхронізмі та продовжувати свою роботу навіть при втраті збудження. Кутова характеристика моменту зображена на рис. 2.5.

Екстремум функції (2.14) по змінній θ відповідає максимальному моменту машини, з яким вона може працювати в синхронізмі (рис. 2.5). При роботі з кутами $\theta > \theta_{кр}$ момент машини знижується і вона випадає із синхронізму, що є аварійним режимом [13].

Номінальним значенням кута навантаження є $\theta_{ном} = 20...30^\circ$, тому машина короткочасно може витримувати 2...2,5 кратне перевантаження, не випадаючи із синхронізму. Відношення максимального моменту (або потужності) синхронної машини до його номінального значення називається **статичним перевантаженням**. Якщо знехтувати реактивною складовою потужності, то статичне перевантаження можна записати у вигляді

$$k_n = \frac{P_{em.max}}{P_{ем.ном}} = \frac{mU(E / X_d)}{mUI_{ном} \cos \varphi} = \frac{I_k}{I_{ном} \cos \varphi} = BKЗ \cdot \frac{1}{\cos \varphi}. \quad (2.17)$$

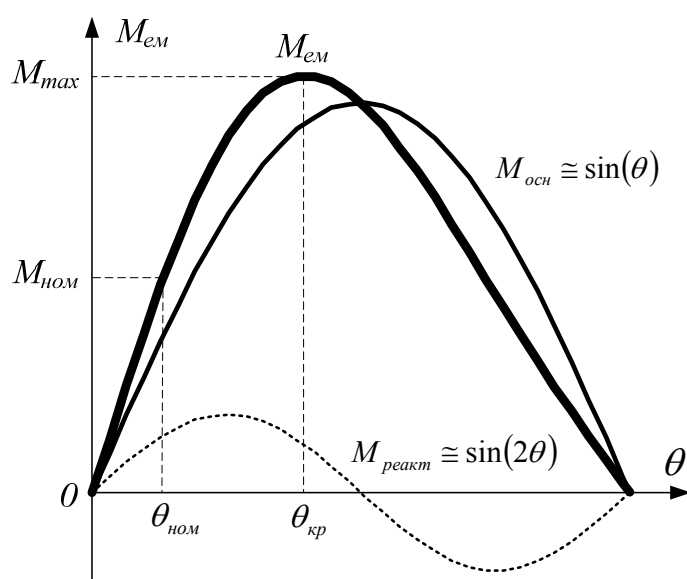


Рисунок 2.5 – Кутова характеристика моменту явнополюсної СМ

Здатність машини утримуватись в синхронізмі характеризують *синхронізуюча потужність P_c* та *синхронізуючий момент M_c* . Ці величини розраховуються, виходячи із залежностей

$$P_c = \frac{dP_{em}}{d\theta} = \frac{m \cdot U \cdot E}{X_d} \cdot \cos \theta + m \cdot U^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \cos(2\theta), \quad (2.18)$$

$$M_c = \frac{dM_{em}}{d\theta} = \frac{m \cdot U \cdot E}{\omega_1 \cdot X_d} \cdot \cos \theta + \frac{m \cdot U^2}{\omega_1} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \cos(2\theta). \quad (2.19)$$

Для неявнополюсних машин кутові характеристики містять лише основні складові потужності та моменту, відповідно (2.20) та (2.21).

$$P_{em} = \frac{m \cdot U \cdot E}{X_c} \sin \theta, \quad (2.20)$$

$$M_{em} = \frac{m \cdot U \cdot E}{\omega_1 \cdot X_c} \sin \theta. \quad (2.21)$$

Кутові характеристики справедливі як для генераторного, так і для двигунного режимів роботи синхронної машини. Тому для всього

можливого діапазону значень кута $\theta \in [-\pi; \pi]$ повна кутова характеристика моменту матиме вигляд, наведений на рис. 2.6.

З повної кутової характеристики визначається критерій стійкості синхронної машини

$$\frac{dM_{em}}{d\theta} > 0. \quad (2.22)$$

Робота синхронної машини буде стійкою, якщо додатному приросту кута навантаження відповідає додатний приріст моменту та потужності [9].

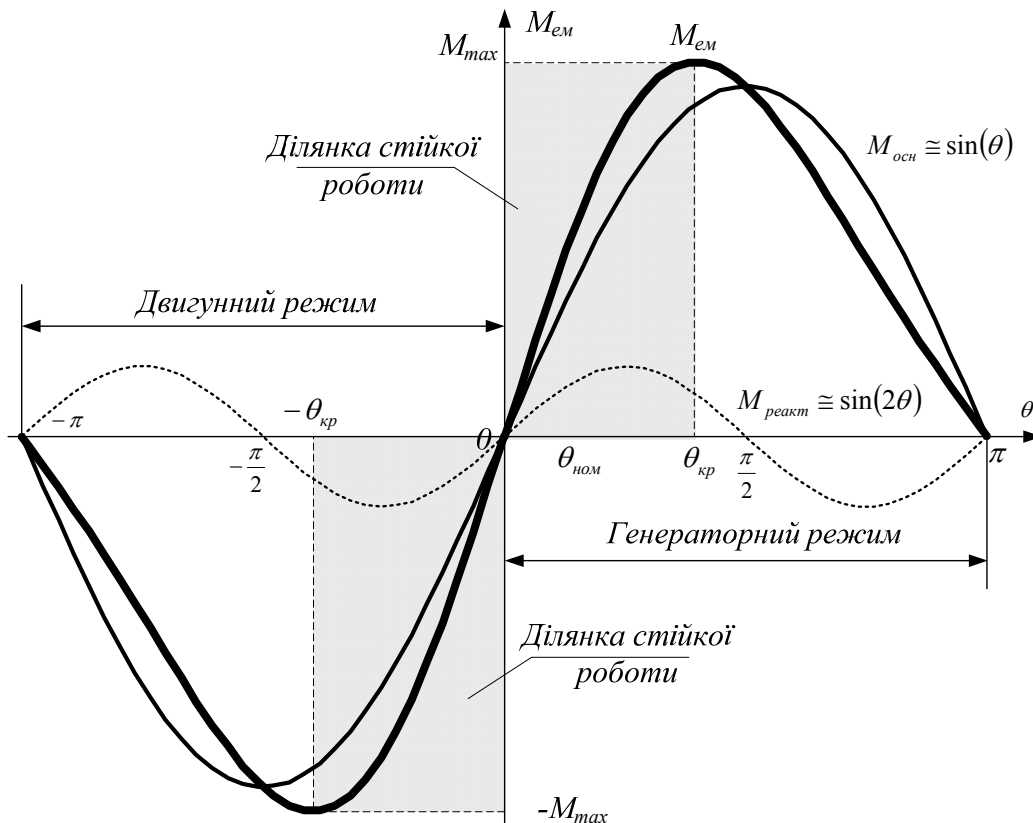


Рисунок 2.6 – Повна кутова характеристика моменту синхронної машини

2.3 Регулювання реактивної потужності синхронних машин. U-подібні характеристики

Однією з переваг синхронних машин є їх властивість працювати з постійною швидкістю як в генераторному, так і в двигунному режимах.

Цей висновок відноситься не лише до активної потужності, як розглядалося в п. 2.2, але й до реактивної потужності.

Розглянемо генератор, який увімкнений на паралельну роботу з мережею відразу після виконання умов синхронізації. Струм збудження в такому режимі має значення, близьке до $i_{f0.ном}$, а векторна діаграма для такого режиму відповідає рівнянню (2.2) і наведена на рис. 2.7, а.

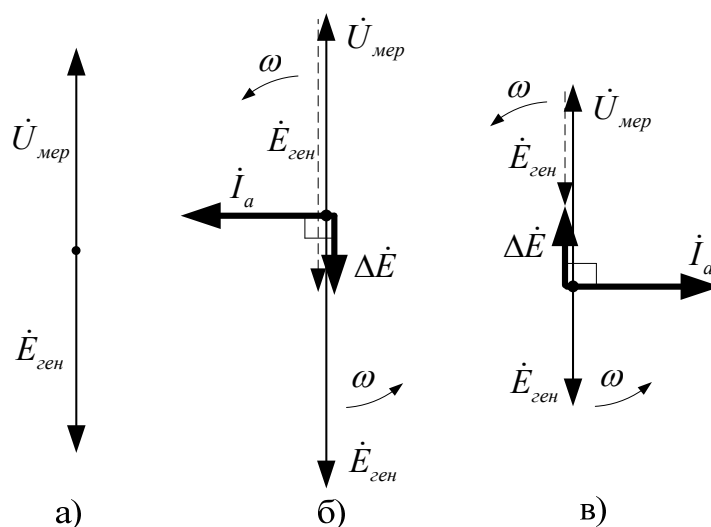


Рисунок 2.7 – Спрощена векторна діаграма синхронної машини при регулюванні струму збудження

Якщо збільшити струм збудження машини відносно його початкового значення $i_{f0.ном}$, то ЕРС $\dot{E}_{ген}$ буде більшою за напругу мережі $\dot{U}_{мер}$. Такий режим роботи машини називається **перезбудженням** [1, 2]. Векторна діаграма для перезбудженої машини наведена на рис. 2.7, б. З векторної діаграми очевидно, що різниця ЕРС в контурі «мережа – машина» $\Delta\dot{E}$ не буде нульовою і згідно із рівнянням (2.3) направлена в сторону ЕРС машини $\dot{E}_{ген}$. Під дією цієї різниці ЕРС $\Delta\dot{E}$ по обмотці якоря та через точку підключення машини до мережі протікатиме струм якоря \dot{I}_a , який визначатиметься за рівнянням (2.4). Оскільки обмотка якоря має чисто індуктивний опір X_d (для неявнополусних машин X_c), то струм відставатиме відносно зміни ЕРС на кут $\pi/2$.

При перезбудженні відстаючий струм \dot{I}_a відносно $\Delta\dot{E}$ є випереджаючим відносно вектора напруги мережі $\dot{U}_{мер}$, тобто для мережі синхронна машина виступатиме як генератор реактивної потужності (ємність), що віддає реактивний струм в мережу. Слід зазначити, що такий режим протікає навіть при нульовому значенні кута навантаження $\theta = 0$ і активна потужність не споживається з мережі й не віддається в неї. Якщо струм збудження збільшувати далі, то це приведе до збільшення ЕРС машини, а при постійній напрузі мережі – до збільшення зміни ЕРС. За законом Ома (2.4) збільшення зміни ЕРС спричинить зростання струму \dot{I}_a і реактивна потужність, яка віддається в мережу, збільшиться.

Якщо струм збудження відносно вихідного положення векторів на рис. 2.7, зменшити, то отримаємо режим **недозбудження** синхронної машини. В режимі недозбудження індукована магнітним потоком збудження ЕРС $\dot{E}_{ген}$ менша від напруги мережі $U_{мер}$, а різниця ЕРС $\Delta\dot{E}$ має напрямок, що збігається з вектором $U_{мер}$ (рис. 2.7, в). В сторону відставання на кут $\pi/2$ від вектора різниці ЕРС $\Delta\dot{E}$ та вектора напруги мережі буде направлений струм якоря \dot{I}_a .

Отже, робота синхронної машини з недозбудженням буде протікати зі струмами, які відносно мережі є чисто індуктивними, а машина таким чином виступатиме в ролі споживача реактивної потужності (індуктивності). Як і при перезбудженні, режим недозбудження також можливий при нульовій активній потужності машини. Якщо струм збудження відносно попереднього значення зменшувати далі, то ЕРС $\dot{E}_{ген}$ машини стане ще меншою, а різниця ЕРС $\Delta\dot{E}$ – більшою. Згідно із (2.4) зростання $\Delta\dot{E}$ буде приводити до зростання струму якоря \dot{I}_a .

Таким чином, при струмові збудження $i_{\phi, ном}$ та нульовій активній потужності ($\theta = 0$) струм якоря машини буде практично рівний нулю, а робота машини протікатиме з $\cos\varphi = 1$. Якщо машину перезбуджувати, то струм якоря зростає і він є ємнісним, а якщо недозбуджувати, то струм якоря також зростає, але він є індуктивним. Здатність синхронної машини регулювати генерування/споживання реактивної потужності незалежно від активної є цінною властивістю, яка широко використовується в електроенергетиці.

При зміні струму збудження змінюється лише реактивна складова струму I_a , тобто реактивна потужність машини Q .

Залежність струму якоря від струму збудження $I_a = f(i_f)$ для машини, яка працює на електричну мережу, називається *U-подібною характеристикою*. Типовий вигляд цієї залежності наведений на рис. 2.8.

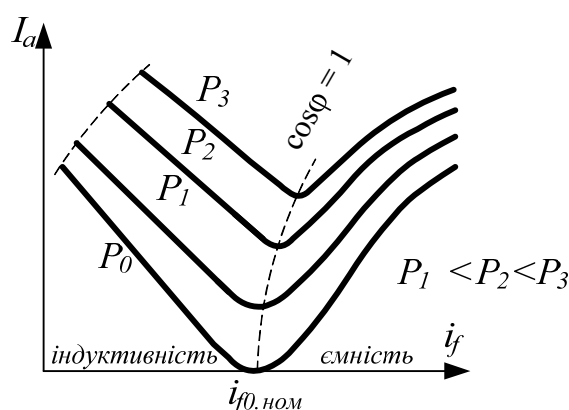


Рисунок 2.8 – U-подібні характеристики синхронної машини

В тому випадку, коли синхронна машина працює на мережу з деяким значенням кута електромагнітного навантаження $\theta \neq 0$, в обмотках якоря навіть без перезбудження і недозбудження машини буде протікати струм, що визначається активною електромагнітною потужністю машини. Якщо при цьому проводити регулювання струму збудження в більшу або меншу сторони, то отримують U-подібну характеристику, яка відповідає встановленому активному значенню потужності, наприклад P_1 на рис. 2.8. Мінімум такої характеристики відповідає активній складовій струму якоря, а приріст струму при збільшенні та зменшенні струму збудження забезпечується за рахунок реактивної складової в першому випадку ємнісної, а в другому випадку індуктивної. Тому для синхронної машини характерне ціле сімейство U-подібних характеристик, які зняті для окремих значень активної потужності (кута електромагнітного навантаження). Сімейство характеристик наведено на рис. 2.8.

Лінія, яка обмежує U-подібні характеристики з боку менших значень струму збудження називається *лінією статичної стійкості*. При роботі з деяким кутом навантаження існує мінімальний струм збудження, за

рахунок якого машина утримується в синхронізмі. При зменшенні струму збудження нижче межі статичної стійкості магнітного потоку ротора недостатньо для стабільного потокозчеплення з полем якоря і машина випадає із синхронізму, що є аварійною ситуацією [2, 14].

Мінімум U -подібних характеристик для всього сімейства не відповідає одному значенню струму збудження $i_{f0.ном}$, а зміщується в сторону більших значень струму збудження з ростом активної потужності. Це пояснюється тим, що зі збільшенням активної потужності зростає й активна складова струму якоря. За рахунок цього збільшується спад напруги на індуктивному опорі розсіювання якоря $I_a X_\sigma$, який доводиться компенсувати збільшенням ЕРС машини і, відповідно, струмом збудження для підтримки значення $\cos\phi = 1$ в мінімумі характеристики.

U -подібні характеристики для двигунного та генераторного режимів синхронної машини практично не відрізняються.

Однією з важливих характеристик синхронних машин є зарядна потужність:

$$S_3 = m \cdot \frac{U_{ном}^2}{X_d} = m \cdot U_{ном} \cdot I_3, \quad (2.23)$$

де I_3 – зарядний струм, який при роботі машини на чисто ємнісне навантаження створює такий магнітний потік реакції якоря, якого достатньо для встановлення номінальної напруги на виводах при відключеній обмотці збудження.

При розрахунку лінії електропередач для стійкої роботи генератора потрібно, щоб зарядна потужність лінії $S_{3.л}$ не перевищувала зарядну потужність генератора $S_{3.г}$ ($S_{3.л} < S_{3.г}$). Тоді він буде повністю компенсувати ємнісні зв'язки між лініями електропередач за рахунок спадаючої вітки U -подібної характеристики.

2.4 Режими роботи синхронного генератора при паралельній роботі з мережею

2.4.1 Способи регулювання

Зміна активної і реактивної потужностей синхронного генератора, що працює паралельно з мережею великої потужності, здійснюється шляхом зміни зовнішнього моменту і струму збудження. Щоб забезпечити необхідний режим роботи генератора, звичайно одночасно регулюють і струм збудження, і обертальний момент [10, 12].

Розглянемо два граничних випадки регулювання:

- а) моменту при незмінному струмі збудження;
- б) струму збудження при незмінному зовнішньому моменті.

2.4.2 Робота генератора при незмінному струмі збудження

Розглядаємо режим $i_f = \text{const}$, $M = \text{var}$.

Для генератора з неявновираженими полюсами векторну діаграму (рис. 2.9) будують за рівнянням

$$\dot{U} = \dot{E}_0 - jI_a X_{cn}. \quad (2.24)$$

Вектор напруги мережі $\dot{U}_{мер}$ по контурі обмотки генератора має напрямок, зустрічний векторові напруги генератора, тобто $\dot{U} = -\dot{U}_{мер}$.

Якщо генератор працює з $\cos\varphi = 1$, то вектор струму якоря I_a збігається за напрямком з вектором напруги \dot{U} , а вектор ЕРС \dot{E}_0 випереджає ці вектори на кут θ_1 . При зміні навантаження, наприклад при його зростанні, потрібно збільшити момент, прикладений до вала генератора. При цьому кут θ повинний збільшитися до деякого значення θ_2 відповідно до зростання потужності зі значення P_1 до P_2 .

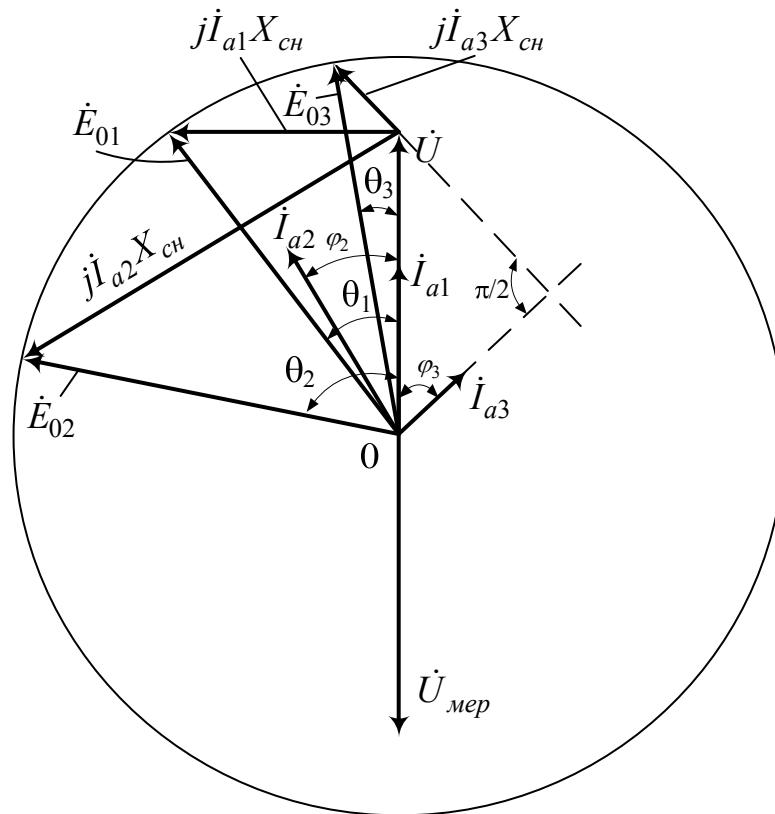


Рис. 2.9 – Векторна діаграма синхронного генератора при $i_f = \text{const}$, $M = \text{var}$

Приймаючи корисну потужність (що віддається в мережу), рівну електромагнітній

$$P = m \cdot \frac{E_0}{X_{cn}} \cdot U \sin \theta, \quad (2.25)$$

для співвідношення потужностей P_1 і P_2 маємо

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2}. \quad (2.26)$$

Таким чином, при збільшенні потужності з P_1 до P_2 вектор ЕРС \dot{E}_0 повертається у бік випередження й утворює з вектором \dot{U} кут θ_2 . Кінець вектора \dot{E}_0 ковзає по окружності радіусом, рівним \dot{E}_0 , тому що струм збудження залишається незмінним.

З'єднавши кінець вектора \dot{U} з кінцем вектора \dot{E}_{02} , одержимо вектор $j\dot{I}_{a2}X_{сн}$. Вектор струму \dot{I}_{a2} перпендикулярний до спаду напруги $j\dot{I}_{a2}X_{сн}$, а його модуль визначиться зі співвідношення

$$\frac{I_{a2}}{I_{a1}} = \frac{|\dot{I}_{a2}X_{сн}|}{|j\dot{I}_{a1}X_{сн}|}. \quad (2.27)$$

2.4.3 Робота генератора при незмінному зовнішньому моменті

Розглядаємо режим $M = \text{const}$, $i_f = \text{var}$.

Незмінність зовнішнього моменту на валові генератора еквівалентна незмінності його потужності

$$P = mUI_a \cos \varphi. \quad (2.28)$$

При роботі на мережу великої потужності $U = U_{мер} = \text{const}$. Як наслідок, при зміні струму збудження залишається постійною активна складова струму якоря $I_a \cos \varphi = \text{const}$. На векторній діаграмі (рис. 2.10) ця умова виражається тим, що кінець вектора \dot{I}_a ковзає по прямій AB , перпендикулярній до вектора напруги \dot{U} . Однак при незмінній потужності (для машини з неявновираженими полюсами) справедлива умова

$$P = m \frac{E_0 U}{X_{сн}} \sin \theta = \text{const}. \quad (2.29)$$

При зміні струму збудження залишаються незмінними всі величини, крім E_0 і $\sin \theta$. Отже, умова незмінної потужності приводить до умови $E_0 \sin \theta = \text{const}$. На діаграмі ця умова відображається в тому, що кінець вектора \dot{E}_0 ковзає по прямій CD , паралельній вектору напруги \dot{U} . Чим менший за модулем вектор \dot{E}_0 , тим більший кут θ . Вектор струму \dot{I}_a перпендикулярний до вектора спаду напруги $j\dot{I}_a X_{сн}$.

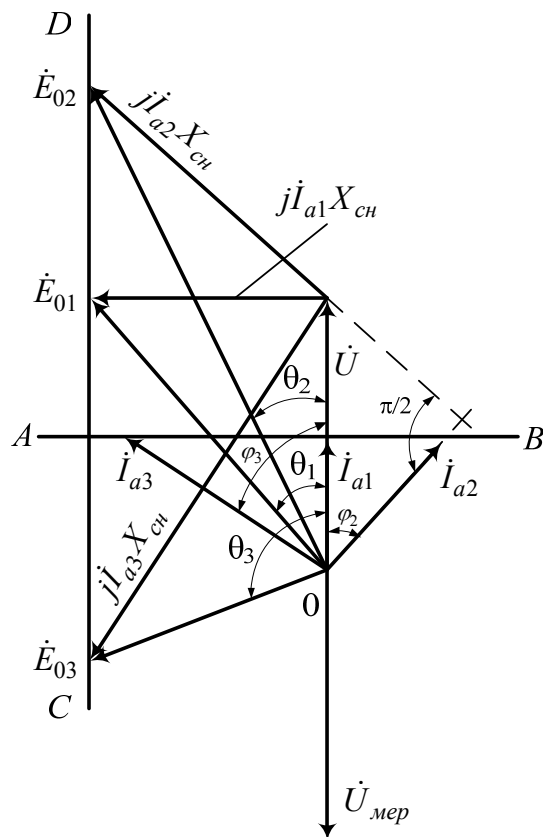


Рис. 2.10 – Векторна діаграма синхронного генератора при $M = \text{const}$, $i_f = \text{var}$

3 СИНХРОННІ ДВИГУНИ

3.1 Енергетична діаграма синхронного двигуна

Синхронним двигуном є синхронна машина, яка працює паралельно з мережею з від'ємним значенням кута електромагнітного навантаження θ .

Не дивлячись на те, що синхронні машини мають принцип оберненості, промисловість випускає окремо синхронні генератори й синхронні двигуни, у яких є деякі конструктивні відмінності. Демпферна обмотка в синхронних двигунах виконує роль допоміжної пускової обмотки, тому розраховується на більші струми і більш тривалий режим. Всі синхронні двигуни мають явнополюсну конструкцію.

Розглянемо енергетичну діаграму потужностей синхронного двигуна, яка наведена на рис. 3.1.

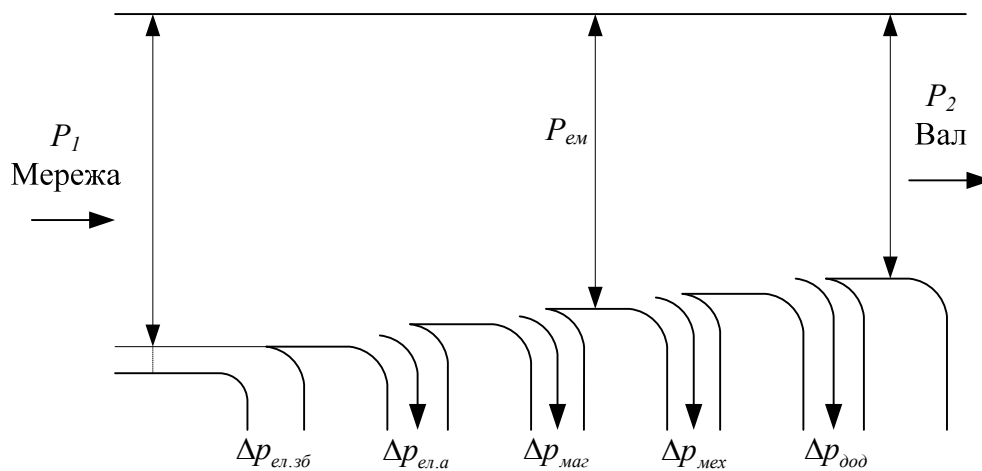


Рисунок 3.1 – Енергетична діаграма синхронного двигуна

Синхронний двигун споживає з мережі активну потужність P_1 :

$$P_1 = m \cdot U \cdot I_a \cdot \cos\varphi, \quad (3.1)$$

яка витрачається на подолання механічного навантаження на валу у вигляді корисної потужності:

$$P_2 = M_2 \cdot \omega, \quad (3.2)$$

та покриття втрат всередині машини (рис. 3.1).

Окремою складовою енергетичної діаграми є електромагнітна потужність синхронного двигуна, яка відповідає потужності, що передається від статора машини через повітряний проміжок до ротора й залежить від кута електромагнітного навантаження (2.14). Електромагнітну потужність також визначають як еквівалентну електричну потужність

$$P_{em} = m \cdot E \cdot I_a \cdot \cos\psi, \quad (3.3)$$

або еквівалентну механічну потужність

$$P_{em} = M_{em} \cdot \omega. \quad (3.4)$$

Втрати на збудження в синхронних двигунах $\Delta p_{зб}$ враховуються в складовій *механічних втрат* $\Delta p_{мех}$ якщо збуджувач жорстко з'єднаний з валом самого двигуна, але можуть і не враховуватись в тому разі, коли живлення обмотки збудження забезпечується з мережі від тиристорного перетворювача або взагалі від стороннього джерела живлення.

Електричні втрати в обмотці якоря

$$\Delta p_{ел.а} = m \cdot I_a^2 \cdot R_a, \quad (3.5)$$

визначають потужність, яка виділяється в обмотці якоря у вигляді тепла. Для їх зменшення потрібно збільшувати переріз провідників обмотки якоря, однак це призводить до подорожчання машини. Електричні *втрати* залежать від навантаження і є **змінними**.

Магнітні втрати синхронного двигуна $\Delta p_{маг}$ відповідають втратам в сталі якоря, який хоча і знаходиться на статорі, але постійно перемагнічується обертовим магнітним полем. Відповідно, на перемагнічування осердя затрачається потужність, яка пропорційна масі магнітопроводу та частоті перемагнічування. Додатково витрачається потужність на подолання гальмівних моментів, викликаних протіканням вихрових струмів в магнітопроводі (ця складова магнітних втрат пропорційна квадрату частоти напруги живлення). Магнітні втрати є *постійними втратами*.

Механічні втрати в двигуні – це втрати потужності на подолання опору тертя в підшипникових вузлах та вентиляцію. Вони також відносяться до категорії постійних втрат.

Додаткові втрати $\Delta p_{\text{дод}}$ враховують неточності при розрахунках магнітних втрат через вплив насичення, полів розсіювання обмоток та втрат від пульсацій магнітної індукції в зубцевій зоні статора. Додаткові втрати приймають рівними 0,5% від спожитої потужності ($0,005 \cdot P_1$), тому вони належать до змінних втрат. Таким чином ККД синхронного двигуна залежить від навантаження і складає 80...90% при роботі з номінальним навантаженням для двигунів потужністю до 100 кВт.

3.2 Кутові характеристики

Перехід з режиму генератора в режим двигуна в синхронній машині супроводжується зміною фази вектора ЕРС \dot{E}_0 відносно вектора напруги \dot{U} (знаком кута навантаження θ). Тому формули електромагнітної потужності та моменту явнополюсного синхронного двигуна можна отримати з відповідних виразів синхронного генератора, підставивши в них від'ємні значення кута $\theta < 0$:

$$P_2 = \frac{m \cdot U \cdot E}{X_d} \sin(-\theta) + \frac{mU^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin(-2\theta), \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} M_{em} &= \frac{m \cdot U \cdot E}{\omega_1 \cdot X_d} \sin(-\theta) + \frac{mU^2}{2 \cdot \omega_1} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin(-2\theta) = \\ &= M_{\text{осн}} + M_{\text{реакт.}} \end{aligned} \quad (3.7)$$

При цьому електромагнітна потужність P_{em} та електромагнітний момент M_{em} синхронного двигуна є від'ємними.

Зміна знака потужності вказує на зміну потоку енергії та відповідну зміну режиму роботи синхронної машини.

На координатній площині кутові характеристики синхронного двигуна розміщені в третьому квадранті (рис. 3.2).

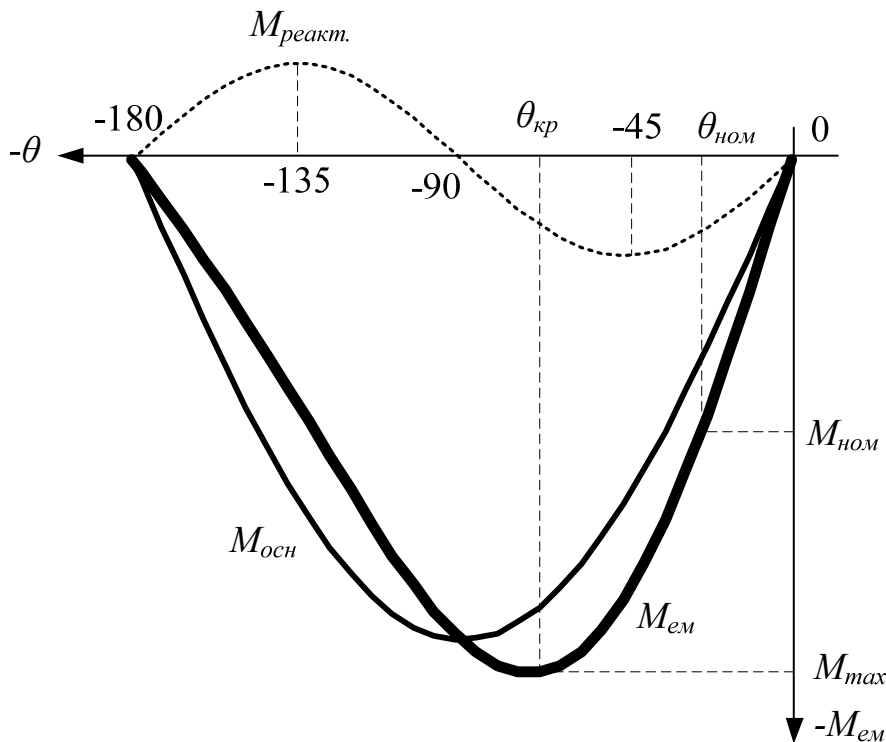


Рис. 3.2 – Кутові характеристики явнополюсного синхронного двигуна

У синхронному двигуні електромагнітний момент спрямований у бік обертання та є обертовим моментом, тоді як у генераторі електромагнітний момент є гальмівним. У явнополюсному синхронному двигуні обертовий момент може створюватися при відсутності струму збудження за рахунок реактивного моменту $M_{реакт.}$

У неявнополюсному двигуні $X_d = X_q$, а реактивні складові потужності та моменту $M_{реакт.}$ відсутні:

$$P_2 = \frac{m \cdot U \cdot E}{X_d} \sin(-\theta), \quad (3.8)$$

$$M_{ем} = \frac{m \cdot U \cdot E}{\omega_1 \cdot X_d} \sin(-\theta). \quad (3.9)$$

Оскільки оперувати з від'ємними потужностями та моментами незручно, то при розгляді синхронного двигуна потужності й моменти

приймають додатними. А кутові характеристики зображують у першому квадранті.

Область стійкої роботи синхронного двигуна знаходиться в межах зміни кута θ від нуля до $\theta_{кр}$.

Для неявнополюсного синхронного двигуна критичний кут $\theta_{кр} = 90^\circ$, а для явнополюсного – $\theta_{кр} < 90^\circ$. При номінальному навантаженні $\theta_{ном} = 20...30^\circ$.

Величина M_{max} характеризує перевантажувальну здатність синхронного двигуна. Статичне перевантаження синхронного двигуна

$$k_n = \frac{M_{max}}{M_{ном}} = 1,8...2,6.$$

Перевантажувальну здатність синхронного двигуна можна збільшити за рахунок збільшення струму збудження та збільшення повітряного зазору.

Збільшення повітряного зазору приводить до збільшення вартості синхронного двигуна, тому що збільшуються його габарити внаслідок збільшення числа витків обмотки збудження.

Якщо розглянути формули потужностей синхронного двигуна явнополюсного (3.6) та неявнополюсного (3.8), то можна побачити, що вони менш чутливі до зміни напруги мережі відносно асинхронних двигунів, тому що пропорційні першому степені цієї напруги, тоді як асинхронні двигуни мають квадратичну залежність від напруги живлення.

3.3 Робочі характеристики

Робочими характеристиками синхронних двигунів є залежності моменту на валу, струму якоря, спожитої потужності та ККД від навантаження, тобто потужності на валу P_2 .

Робочі характеристики синхронного двигуна отримують за двох умов: або струм збудження зберігають постійним $i_f = \text{const}$, або зберігають постійним коефіцієнт потужності машини відносно мережі $\cos\varphi = \text{const}$. Як впливає з рис. 2.8, при збільшенні навантаження для утримання

постійного $\cos \varphi$, наприклад $\cos \varphi = 1$, потрібно збільшувати струм збудження для компенсації спаду напруги в індуктивному опорі розсіювання обмотки якоря. Саме цей вид робочих характеристик (для $\cos \varphi = \text{const}$) наведений на рис. 3.3. Цим пояснюється і зростаючий вигляд залежності струму збудження від навантаження $i_f = f(P_2)$.

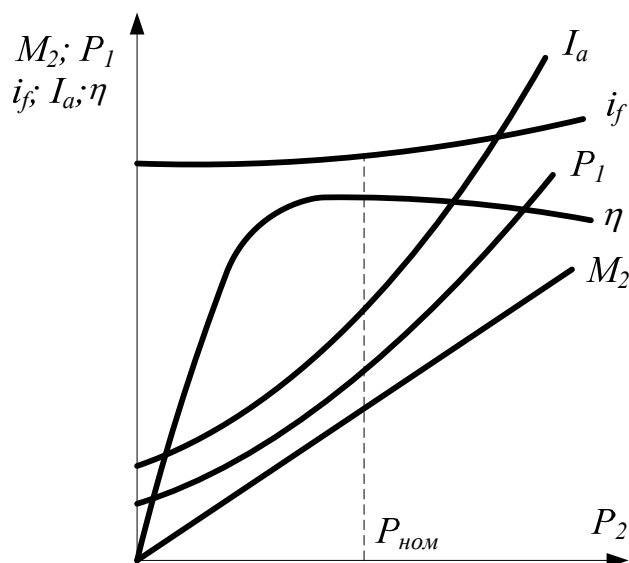


Рисунок 3.3 – Робочі характеристики синхронних двигунів

Залежність моменту на валу M_2 від потужності P_2 носить лінійний характер, оскільки при роботі двигуна з номінальною швидкістю $\omega_{ном} = \omega_1 = \text{const}$ потужність прямопропорційна моменту згідно з (3.2).

При роботі двигуна на холостому ході споживана потужність відповідає постійним втратам (механічним та магнітним) всередині машини. Тому при $P_2 = 0$ струм якоря I_a та спожита потужність P_1 не рівні нулю. Із ростом навантаження P_2 буде збільшуватися спожита потужність P_1 , і, відповідно, струм якоря. Приріст спожитої потужності нелінійний відносно приросту навантаження, а носить параболічний характер. Це пояснюється тим, що спожита потужність відрізняється від корисної сумарними втратами – постійними та змінними, а категорія змінних втрат (електричних та додаткових) пропорційна квадрату навантаження. Залежність струму якоря за (3.1) при постійній напрузі $U = \text{const}$ та

$\cos\varphi = \text{const}$ відповідає залежності спожитої потужності від навантаження, але вираженій в іншому масштабі [6].

Якщо робочі характеристики визначаються для випадку з $i_f = \text{const}$, то значення струму збудження вибирається в діапазоні перезбудження машини, що сприяє покращенню коефіцієнта потужності мережі $\cos\varphi$.

3.4 Способи пуску

Синхронний двигун не може бути запущеним безпосереднім включенням обмотки статора (якоря) у мережу змінного струму. Це пояснюється тим, що обертове магнітне поле обмотки якоря з'являється практично миттєво й рухається в просторі з синхронною швидкістю ω_1 . Полюси цього поля, переміщаючись в просторі, будуть взаємодіяти то з однойменними, то з різнойменними полюсами нерухомого збудженого ротора. Відповідно до цього буде змінюватися напрямок обертового моменту, який діє на ротор. Протягом половини періоду зміни струму в обмотках момент буде спрямований в одну сторону, а протягом іншої половини – у протилежну.

Пуск міг би відбутися, якби ротор розігнався до сталої швидкості протягом першого півперіоду після вмикання, коли обертовий момент не змінює свій знак. При частоті 50 Гц півперіод дорівнює 0,01 с. Через механічну інерцію за такий час ротори практично всіх синхронних двигунів розігнатися не зможуть.

Існує кілька способів пуску двигуна. Ці способи полягають у тому, що в процесі пуску ротор двигуна розганяється до швидкості обертового поля, після чого двигун входить у синхронізм і починає працювати як синхронний.

Застосування одержали:

- пуск за допомогою розгінного двигуна;
- частотний пуск;
- асинхронний пуск.

Найбільше поширення має асинхронний пуск.

Пуск за допомогою розгінного двигуна полягає в тому, що стороннім (розгінним) двигуном ротор синхронної машини розганяється

до номінальної швидкості. Після цього проводять дії, що відповідають виконанню умов синхронізації (2.1) при включенні машини на паралельну роботу з мережею. Виконується включення на паралельну роботу з мережею. Після підключення машини до мережі розгінний двигун за допомогою муфти відводять від вала синхронної машини і вона переходить в двигунний режим. Потужність розгінного двигуна невелика і складає 10...20% номінальної потужності синхронної машини.

Частотний пуск застосовується в тому випадку, якщо синхронний двигун підключений до автономного джерела, частоту напруги якого можна змінювати від нуля до номінальної (наприклад, перетворювач частоти). Якщо плавно підвищувати частоту напруги живлення, то відповідно буде збільшуватися швидкість магнітного поля. Ротор, підхоплений полем статора, поступово буде підвищувати свою швидкість від нуля до номінальної. У процесі пуску машина увесь час працює в синхронному режимі. З точки зору перехідних процесів та тривалості пуску частотний пуск є оптимальним. Недоліком такого пуску є необхідність в перетворювачі частоти, вартість якого тотожна, а в ряді випадків перевищує вартість електродвигуна.

Асинхронний пуск аналогічний пуску асинхронного двигуна. Для цього на роторі в полюсних наконечниках розміщена пускова (демпферна) обмотка, що виконується за типом короткозамкнутої обмотки ротора асинхронного двигуна. При пуску трифазна обмотка статора включається в мережу. Струм, який буде протікати по цій обмотці, створить обертове магнітне поле. Воно наведе в пусковій обмотці ротора ЕРС і струм. У результаті взаємодії струму пускової обмотки ротора з обертовим магнітним полем утвориться момент M (рис. 3.4), під дією якого ротор почне рухатися й розганятиметься до швидкості, близької до швидкості поля n_1 . Обертання буде відбуватися з ковзанням s , що залежить від навантаження на валу.

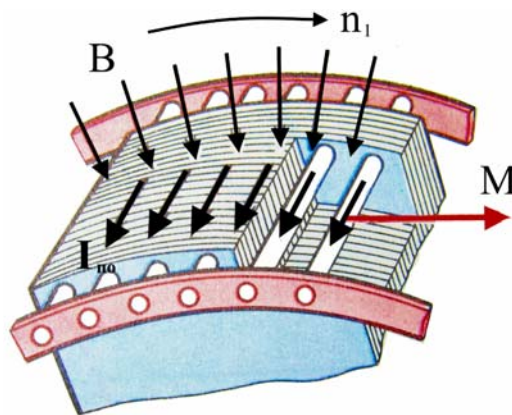


Рисунок 3.4 – Створення обертового моменту пусковою обмоткою синхронного двигуна

Входження в синхронізм досягається після включення постійного струму в обмотку збудження за рахунок синхронізуючого моменту, який при цьому виникає. З цього часу машина починає працювати як синхронний двигун. Під час пуску обмотка збудження не повинна бути розімкнutoю, інакше внаслідок великого числа витків у ній обертовим полем буде індукватися значна ЕРС, небезпечна не тільки для ізоляції, але й для обслуговуючого персоналу. Обмотку збудження не можна також замикати накоротко, тому що в цьому випадку вона утворить несиметричний (однофазний) контур. Такий контур є причиною утворення додаткового моменту M_{oz} (рис. 3.5), під дією якого спостерігається провал у кривій механічної характеристики двигуна $M = f(s)$ поблизу напівсинхронної швидкості при ковзанні $s \approx 0,5$. Результуючий момент синхронного двигуна при асинхронному пуску обчислюватиметься як сума моментів пускової (демпферної) обмотки M_{do} та обмотки збудження M_{oz} :

$$M = M_{do} + M_{oz}. \quad (3.6)$$

Внаслідок такого провалу ротор при пуску може застрягти на проміжній швидкості. Таке явище роботи синхронного двигуна з усталеною швидкістю, що відповідає половині синхронної, називається **одноосним ефектом**. Для уникнення одноосного ефекту на початку пуску обмотка збудження повинна бути замкнута на резистор з опором, приблизно в 10-15 разів більшим, ніж опір самої обмотки. Після закінчення

пуску обмотка збудження відмикається від опору і вмикається на джерело постійного струму.

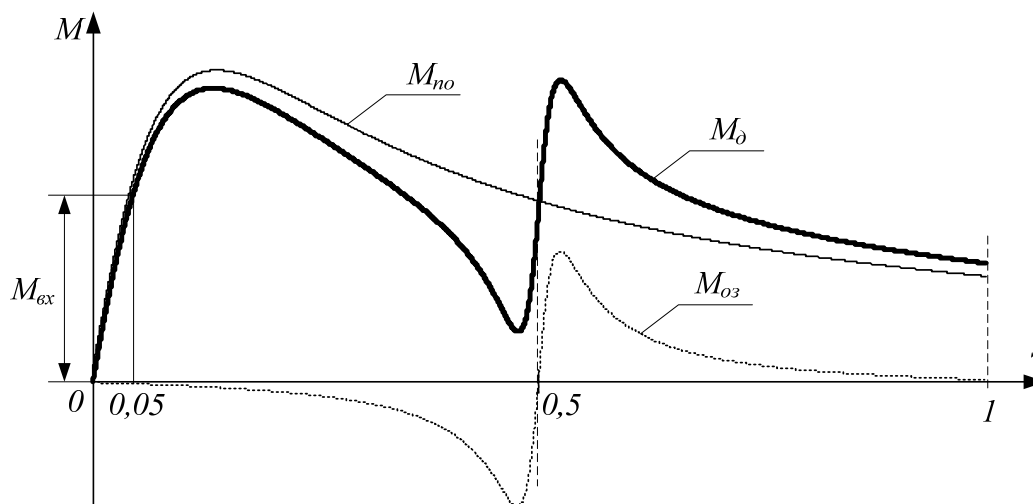


Рисунок 3.5 – Механічні характеристики обмоток синхронного двигуна при асинхронному пуску

Асинхронний пуск синхронного двигуна характеризується значеннями пускового струму й обертальних моментів – початкового пускового M_n (при $s = 1$) і вхідного M_{ex} (рис. 3.5). **Вхідним** називається асинхронний **момент** при швидкості ротора, рівній $0,95\omega_1$ ($s = 0,05$). Цей момент дорівнює найбільшому навантажувальному моменту, при якому можливе входження двигуна в синхронізм при включенні постійного струму в обмотку збудження.

Якщо мережа, в яку вмикається синхронний двигун, недостатньо потужна, то для того, щоб уникнути великого спаду напруги при асинхронному пуску, застосовують заходи для зниження початкового пускового струму: ввімкнення через автотрансформатор, реактор тощо [2, 5].

3.5 Регулювання частоти обертання

Частота обертання синхронного двигуна n дорівнює частоті обертового магнітного поля n_1 , тобто

$$n = n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p}$$

Тому її можна регулювати шляхом зміни частоти напруги живлення або числа полюсів $2p$.

Регулювати частоту обертання шляхом зміни числа полюсів у синхронному двигуні недоцільно, тому що на відміну від асинхронного тут потрібно змінювати число полюсів як на статорі, так і на роторі, що приводить до значного ускладнення конструкції ротора. Тому практично використовують лише зміну частоти напруги живлення [13].

До синхронного двигуна можуть бути застосовані всі основні положення теорії частотного регулювання асинхронного двигуна, у тому числі необхідність одночасної зміни як частоти f_1 , так і напруги живлення U . У чистому вигляді частотне регулювання частоти обертання синхронних двигунів застосовується тільки при дуже малих потужностях, коли навантажувальні моменти невеликі, а інерція приводного механізму мала. При великих потужностях такі умови є тільки в деяких типах електроприводів, наприклад в електроприводах вентиляторів.

Для синхронних двигунів, що використовуються в електроприводах з великим моментом інерції приводного механізму, необхідно дуже плавно змінювати частоту напруги живлення, щоб двигун не випав із синхронізму. Для таких електроприводів найбільш придатним є *метод частотного регулювання із самосинхронізацією*, при якому двигун у принципі не може випасти із синхронізму.

3.6 Переваги і недоліки синхронного двигуна порівняно з асинхронним

Синхронні двигуни мають такі переваги:

а) можливість роботи при $\cos\varphi = 1$; це приводить до поліпшення $\cos\varphi$ мережі, а також до скорочення розмірів двигуна, тому що його струм менший струму асинхронного двигуна тієї ж потужності. При роботі з випереджальним струмом синхронні двигуни служать генераторами

реактивної потужності, яка надходить в асинхронні двигуни, що знижує споживання цієї потужності від генераторів електростанцій;

б) меншу чутливість до коливань напруги, тому що їхній максимальний момент пропорційний напрузі в першому степені (а не квадратів напруги);

в) строга сталість частоти обертання незалежно від механічного навантаження на валові.

Недоліками синхронних двигунів є:

а) складність конструкції;

б) порівняльна складність пуску в хід;

в) труднощі з регулюванням частоти обертання, що можливо тільки шляхом зміни частоти напруги живлення,

Зазначені недоліки синхронних двигунів роблять їх менш вигідними, ніж асинхронні двигуни, при обмежених потужностях до 100 кВт. Однак при більш високих потужностях, коли особливо важливо мати високий $\cos\varphi$ і зменшені габаритні розміри машини, синхронні двигуни переважають над асинхронними.

Лабораторна робота № 1С ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Мета роботи

вивчити конструкцію, принцип дії синхронного генератора, експериментально визначити характеристики і основні параметри трифазного синхронного генератора, зробити аналіз характеристик генератора залежно від характеру його навантаження, визначити коротке замикання за графічними побудовами з використанням характеристик генератора.

1С.1 Програма виконання лабораторної роботи

1. Ознайомитися з пристроєм лабораторного стенда, конструкцією синхронного генератора, записати номінальні величини та їх значення, підібрати відповідні прилади.

2. Дослідним шляхом зняти характеристики:

- а) холостого ходу;
- а) навантажувальні при $\cos\varphi = 1$ і $\cos\varphi = 0$;
- в) зовнішні при $\cos\varphi = 1$ і $\cos\varphi = 0$;
- г) регульовальні при $\cos\varphi = 1$;
- д) короткого замикання.

За експериментальними даними:

а) побудувати у відносних одиницях всі зняті характеристики, причому характеристики холостого ходу, короткого замикання та навантаження повинні бути побудовані в одній координатній площині;

б) за характеристиками холостого ходу і короткого замикання визначити ненасичені значення опору X_d і відношення короткого замикання генератора $BKЗ$;

в) за характеристиками холостого ходу та індуктивного навантаження ($\cos\varphi = 0$) побудувати реактивний трикутник генератора й визначити опір розсіювання обмотки статора $X_{\delta a}$.

1С.2 Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи

1. Скласти схему дослідної установки (рис. 1С.1). Синхронний генератор GS приводиться в рух за допомогою двигуна постійного струму М. Для цього потрібно запустити двигун таким чином.

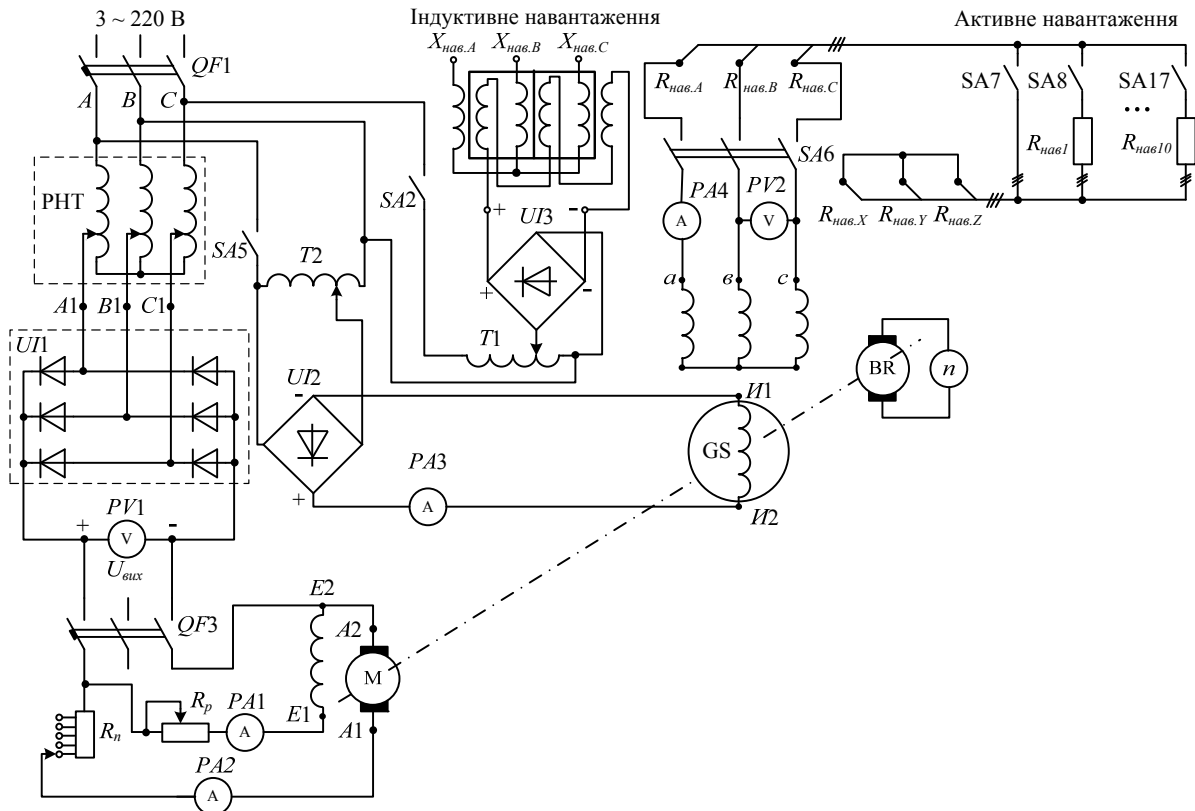


Рисунок 1С.1 – Схема для знімання характеристик синхронного генератора

Триполюсним автоматом $QF1$ подається напруга на трифазний автотрансформатор РНТ, за допомогою рукоятки встановлюється номінальна напруга двигуна постійного струму М $U = U_{ном.ДПС}$. Двигун запускається вмиканням автомата $QF3$, а потім поступово переключенням ступенів пускового реостата R_n з положення 0 у крайнє праве положення. Швидкість обертання двигуна постійного струму регулюється зміною його струму збудження за допомогою регульовального реостата R_p [14].

2. Характеристику холостого ходу знімають при розімкнутих ключах $SA2$ та $SA6$ ($I_a = 0$, $n_{ном} = const$, швидкість обертання підтримується регулюванням струму приводного двигуна за допомогою реостата R_p).

Починають дослід при $U_0 = 1,1 \cdot U_{ном}$. Інші точки характеристики холостого ходу знімають, зменшуючи струм збудження до нуля. Необхідно змінювати струм тільки в бік його зменшення (в іншому випадку вийде великий розкид експериментальних даних через перемагнічування магнітопроводу за гістерезисними циклами. Характеристику будують за 6-7 точками. Результати вимірювань заносять до табл. 1С.1.

Таблиця 1С.1 – Дослід холостого ходу

Величини	1	2	3	4	5	6	7	Примітка
$I_{зб}, A$								$I_a = 0$ $n = n_{ном}$
U_0, B								
$I_{зб}^*, B. O.$								
$U_0^*, B. O.$								

Розрахункові формули:

$$U_0^* = U_0 / U_{ном}, \quad (1С.1)$$

$$I_{зб}^* = I_{зб} / I_{зб,0}, \quad (1С.2)$$

де $I_{зб,0}$ – струм збудження при $U = U_{ном}$.

3. Навантажувальні характеристики $U = f(i_f)$ при $I_a = \text{const}$, $\cos\varphi = \text{const}$, $n = n_{ном} = \text{const}$ знімають при індуктивному навантаженні та струмі на статорі $I_a = (0,6 \dots 0,8) \cdot I_{ном}$. Індуктивне навантаження змінюється плавно зміною струму управління дроселя (від ЛАТРа Т1 через випрямляч УІЗ). Першу точку знімають при струмі збудження, що забезпечує $U = 1,1 \cdot U_{ном}$, наступні точки – при зменшенні опору навантаження й струму збудження генератора. Спочатку зменшують опір навантаження, а потім плавно – струм збудження до тих пір, поки не встановиться прийнятий струм навантаження в статорі. Результати вимірювань заносять до табл. 1С.2.

Таблиця 1С.2 – Навантажувальні характеристики

Величини	1	2	3	4	5	6	7	Примітка
i_f, A								Індуктивне навантаження $\cos\varphi = 0$
U, B								
$i_f^*, \text{в. о.}$								
$U^*, \text{в. о.}$								

4. Зовнішні характеристики $U = f(I_a)$ при $i_f = \text{const}$, $\cos\varphi = \text{const}$, $n = n_{\text{ном}} = \text{const}$. У режимі холостого ходу генератора встановлюють такий струм збудження, при якому $U = U_{\text{ном}}$. Потім при незмінному струмі збудження поступово збільшують струм навантаження до номінального, знімаючи 5–7 точок. Характеристику знімають за активного та індуктивного навантажень. Дані заносять до табл. 1С.3.

Таблиця 1С.3 – Зовнішні характеристики

Величини	1	2	3	4	5	6	7	Примітка
I_a, A								Активне навантаження $i_f = \text{const}$ $\cos\varphi = 1$
U, B								
$I_a^*, \text{в. о.}$								
$U^*, \text{в. о.}$								
Величини	1	2	3	4	5	6	7	Примітка
I_a, A								Індуктивне навантаження $i_f = \text{const}$ $\cos\varphi = 0$
U, B								
$I_a^*, \text{в. о.}$								
$U^*, \text{в. о.}$								

5. Регульовальну характеристику $i_f = f(I_a)$ знімають при $U = U_{\text{ном}} = \text{const}$, $\cos\varphi = \text{const}$, $n = n_{\text{ном}} = \text{const}$. На холостому ході генератора встановлюють $U = U_{\text{ном}}$, потім вмикають 1 або 2 ступені навантаження, після чого, змінюючи струм збудження, відновлюють напругу до значення $U = U_{\text{ном}}$. Записують значення i_f та I_a . Збільшуючи

струм до $I_a = I_{ном}$, знімають 5 – 7 експериментальних точок (в кожній точці напруга має дорівнювати $U_{ном}$) [15]. Результати заносять до табл. 1С.4.

Таблиця 1С.4 – Регулювальна характеристика

Величини	1	2	3	4	5	6	7	Примітка
$i_f, \text{ А}$								$\cos\varphi = 1$
$I_a, \text{ А}$								
$i_f^*, \text{ в. о.}$								
$I_a^*, \text{ в. о.}$								

6. Характеристику короткого замикання $I_a = f(i_f)$ знімають при $U = 0$, $n = n_{ном} = \text{const}$. Обмотка статора замикається накоротко тумблером SA7. Незбуджений генератор обертається при $n = n_{ном}$. Струм збудження плавно (уважно!) збільшується до такого значення $i_{f,к}$, при якому $I_a = I_{ном}$ (на цьому інтервалі знімається 6 – 7 експериментальних точок). Результати вимірювань заносяться до табл. 1С.5.

Таблиця 1С.5 – Характеристика короткого замикання

Величини	1	2	3	4	5	6	7	Примітка
$i_f, \text{ А}$								$U = 0$
$I_a, \text{ А}$								
$i_f^*, \text{ в. о.}$								
$I_a^*, \text{ в. о.}$								

Рівняння напруг явнополюсного генератора має вигляд:

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + jX_d \dot{I}_d + jX_q \dot{I}_q + R_a \dot{I}. \quad (1С.3)$$

У режимі короткого замикання $U = 0$. Якщо знехтувати R_a і врахувати, що струм $I_q = 0$ (характер кола статора – чисто індуктивний), рівняння кола якоря (1С.3) матиме вигляд:

$$\dot{E}_0 = jX_d \dot{I}. \quad (1С.4)$$

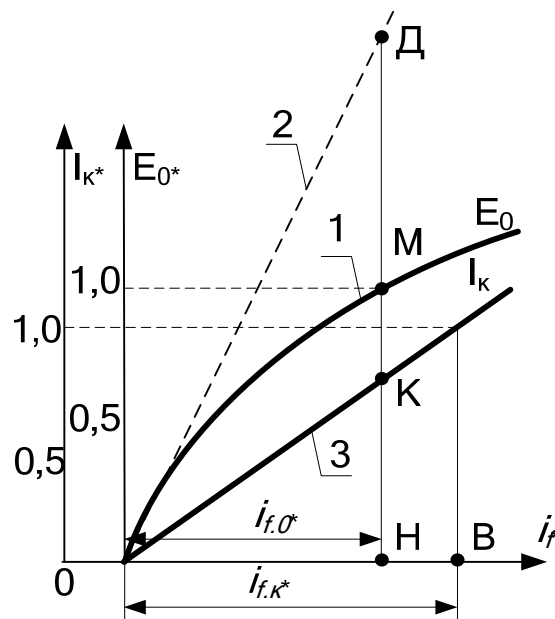


Рисунок 1С.2 – Визначення поздовжнього синхронного індуктивного опору

На цьому співвідношенні оснований графічний метод визначення синхронного індуктивного опору X_d . На одному графіку (рис. 1С.2) показані характеристики холостого ходу і короткого замикання (струм збудження для двох характеристик повинен мати однаковий масштаб (крива 1 – експериментальна характеристика холостого ходу; 2 – випрямлена характеристика холостого ходу; 3 – характеристика короткого замикання).

Значення X_d відповідає ненасиченому стану магнітної системи:

$$X_{d*} = \frac{E_{0*}}{I_*} = \frac{HD}{HK}. \quad (1С.5)$$

Відношення короткого замикання:

$$BK3 = \frac{I_{зб.0*}}{I_{зб.к*}} = \frac{OH}{OB}. \quad (1С.6)$$

$BK3$ пропорційне значенню повітряного зазору машини й визначає її статичне перевантаження.

Індуктивний опір розсіювання X_{σ} обмотки статора визначається з реактивного трикутника (див. рис. 1.12), побудованого за відомими характеристиками холостого ходу, короткого замикання та навантажувальною.

1С.3 Запитання до захисту



1. Поясніть будову й принцип дії синхронного генератора.
2. Реакція якоря синхронного генератора при активному навантаженні.
3. Реакція якоря при індуктивному, ємнісному й змішаному навантаженнях.
4. Векторні діаграми напруг явнополюсного та неявнополюсного синхронного генератора.
5. Синхронні індуктивні опори явнополюсної та неявнополюсної машин.
6. Поясніть вигляд всіх характеристик синхронного генератора.
7. Методика графічного визначення X_d і X_{σ} .
8. Як побудувати реактивний трикутник синхронної машини?

1С.4 Задачі для самостійного розв'язання

1. Чому магнітопровід статора синхронної машини збирають з окремих листів електротехнічної сталі, а ротор може бути виготовлений з масивного заліза?

2. Визначити синхронну частоту обертання синхронного гідрогенератора при $f_1 = 20$ Гц і $p = 10$.

3. Визначити кількість полюсів синхронного турбогенератора, якщо $f_1 = 60$ Гц, а $n_1 = 3600$ об/хв.

4. Назвати види реакцій якоря синхронного генератора при різному характері його навантаження. Чому зазор синхронних машин виконується збільшеним в порівнянні з асинхронними?

5. Визначити величину основної гармоніки ЕРС витка обмотки статора, який має повний крок, для трифазної обмотки синхронного генератора при $n = 750$ об/хв, діаметрі розточення статора $D_1 = 0,73$ м, довжині статора $l = 0,54$ м, середньої індукції в повітряному зазорі $0,765$ Тл, $f = 50$ Гц.

6. Визначити електромагнітну потужність синхронного генератора, якщо механічна потужність, яка підводиться до генератора від турбіни, $P_1 = 25,5$ МВт, втрати в обмотці збудження $\Delta p_{зб} = 142$ кВт, ККД збудника $\eta_{зб} = 0,85$, механічні втрати $\Delta p_{мех.} = 90$ кВт, додаткові втрати $\Delta p_{доод} = 12$ кВт. Чому дорівнює електромагнітний момент, який діє на ротор машини, і обертовий момент турбіни, якщо число пар полюсів машини $p = 24$ і номінальна частота обертання $n = 125$ об/хв.

7. Потужність, яка споживається навантаженням трифазного синхронного генератора, складає $P_{ном} = 26$ МВт. Визначити активний опір обмотки якоря, якщо електромагнітна потужність генератора рівна $P_{ем} = 26,2$ МВт, магнітні втрати в магнітопроводі статора $\Delta p_{мех.} = 150$ кВт, фазний струм генератора $I_a = 1790$ А.

8. Характеристика холостого ходу синхронного генератора наведена в табл. 1С.6. Активний опір обмотки якоря $R_a = 0,612$ Ом, $X_d = 21,8$ Ом. Визначити струм короткого замикання генератора при струмі збудження $i_f = 1790$ А.


Таблиця 1С.6 – Нормальна характеристика холостого ходу

$E, В$	115	184	230	253	276
$i_f, А$	2,94	5,07	7,53	10,28	16,3

9. За допомогою реактивного трикутника побудувати навантажувальну характеристику явнополюсного генератора для $I = I_{ном}$, $X_{\delta}^* = 0,15$, $X_{ad}^* = 1,4$ за умови, що характеристика холостого ходу задана.

10. Номінальна фазна напруга явнополюсного генератора $U_{фн} = 6060$ В, номінальний фазний струм генератора $I_{ном} = 2750$ А, індуктивний опір обмотки якоря по повздовжній осі $X_d = 2,50$ Ом. Визначити відношення короткого замикання генератора та струм короткого замикання $I_{к.з.}$, що відповідає МРС, при якій напруга в режимі холостого ходу номінальна.

Лабораторна робота № 2С ПАРАЛЕЛЬНА РОБОТА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА З МЕРЕЖЕЮ

 **Мета роботи** | дослідити процес синхронізації синхронного генератора з мережею та експериментально визначити U -подібні характеристики.

2С.1 Програма виконання лабораторної роботи

1. Ознайомитися з будовою лабораторного стенда, конструкцією генератора, записати номінальні дані генератора й приводного двигуна, підібрати вимірювальні прилади.

2. За допомогою лампового синхроскопа здійснити синхронізацію генератора з мережею та увімкнути його на паралельну роботу.

3. Дослідним шляхом зняти U -подібні характеристики генератора на холостому ході та при навантаженні.

4. За експериментальними даними побудувати залежності $I = f(i_f)$, $\cos\varphi = f(i_f)$ в одних координатних осях, а також залежності активної й реактивної складових струму якоря від струму збудження $I_a = f(i_f)$ та $I_p = f(i_f)$ – в інших.

2С.2 Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи

Схема для виконання роботи наведена на рис. 2С.1.

1. При вимкнених $QF3$ та $QF4$ ручку пускового реостату R_n двигуна постійного струму М ставлять у положення «0» і вмикають автомат $QF1$, подаючи від мережі напругу на автомат $QF3$ та РНТ. Встановлюють номінальну напругу двигуна постійного струму М за допомогою РНТ, вмикають $QF4$ та запускають приводний двигун генератора, проводячи реостатний пуск перемиканням ступенів R_n з інтервалом в 2...3 секунди в крайнє положення (до упору). Встановлюють за допомогою реостата R_p в колі збудження двигуна швидкість його обертання, близьку до синхронної швидкості обертання генератора [16].

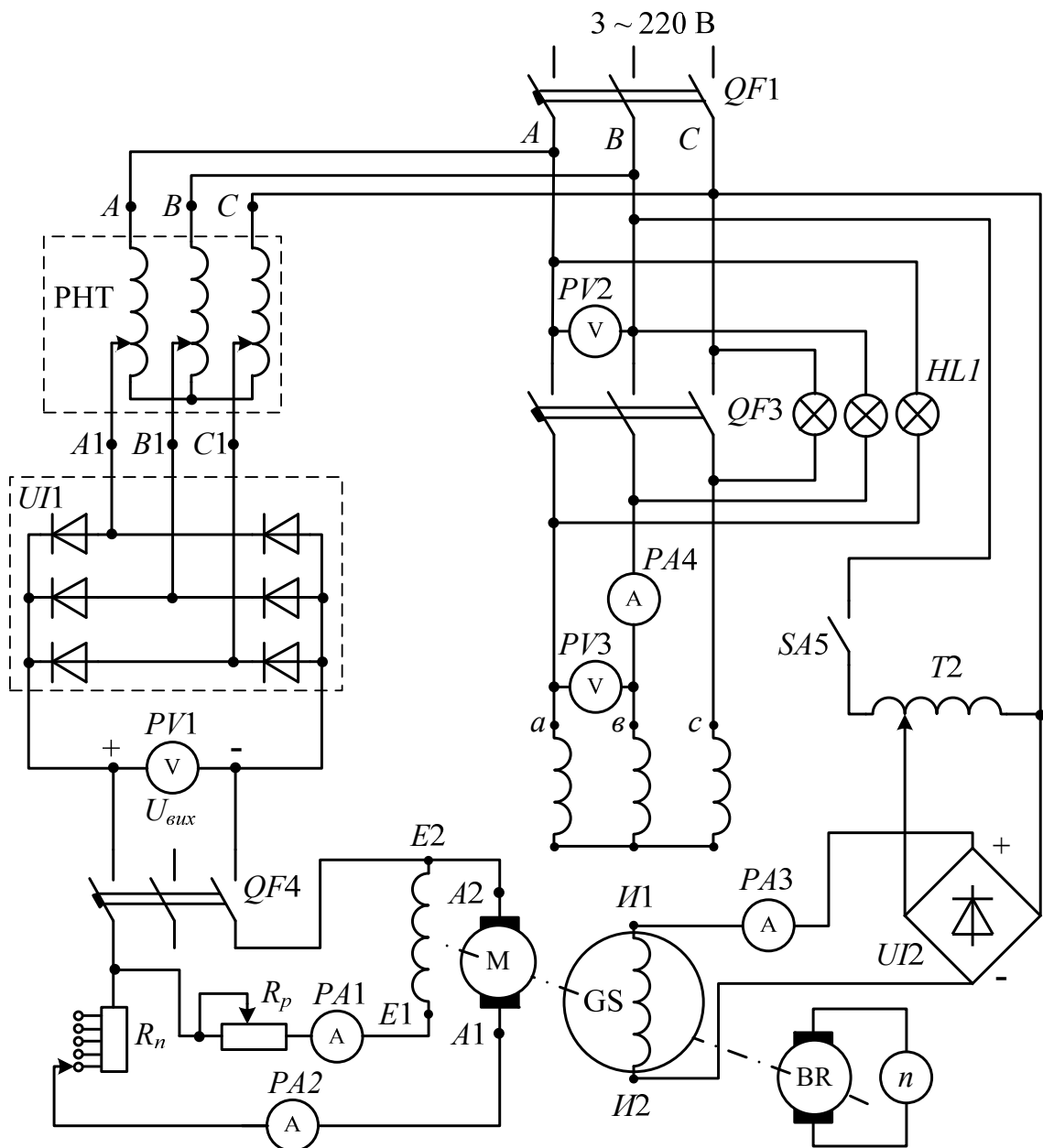


Рисунок 2С.1 – Схема дослідження паралельної роботи синхронного генератора з мережею

Вмикаючи *SA5* подають живлення на обмотку збудження синхронного генератора. Потім за допомогою ЛАТРа *T2*, регулюють струм збудження генератора з метою встановлення рівності $E = U$. При наявності різниці частот генератора й мережі в схемі «на згасання» лампи синхроскопа повинні загорятися одночасно (якщо лампи *HL1* загораються по черзі, то це вказує на різну послідовність чергування фаз генератора і мережі –

потрібно змінити фазування генератора). Переконавшись, що схема синхроскопа працює правильно, регулюють швидкість обертання агрегату зміною струму збудження і напруги регулюванням РНТ двигуна постійного струму, домагаючись, щоб інтервал між згасаннями ламп становив не менше 3...5 с. Ще раз перевіривши за допомогою вольтметрів *PV2* та *PV3*, що рівність $E = U$ зберігається, включають автомат *QF3* в момент, коли всі лампи *HL1* згаснуть. Безпосередньо після включення струм I мінімальний (генератор працює у синхронному режимі на холостому ході), струм збудження дорівнює $i_{f,c}$ (струм збудження при синхронізації).

2. Безпосередньо після включення генератора на паралельну роботу з мережею знімають U -подібну характеристику на холостому ході $I = f(i_f)$. Спочатку записують першу точку, коли $i_f = i_{f,c}$, потім зменшують струм i_f до такого значення, при якому $I = I_n$ та зафіксують в протоколі вимірювань 3 – 4 точки спадної вітки U -подібної характеристики (рис. 2.8). Встановлюють початкове значення струму збудження $i_f = i_{f,c}$ і поступово збільшують струм збудження i_f до значення, при якому $I = I_n$ та знімають 3 – 4 точки висхідної вітки U -подібної характеристики (див. рис. 2.8).

Результати вимірювань заносять до табл. 2С.1. На холостому ході активна складова струму статора $I_a \approx 0$.

Таблиця 2С.1 – U -подібна характеристика синхронного генератора

Величини	1	2	3	4	5	6	7	Примітка
$i_f, \text{ A}$								$P_2 = 0;$ $I_n = 0$
$I, \text{ A}$								
$I_a, \text{ A}$								
$I_p, \text{ A}$								
$\cos \varphi, \text{ в. о.}$								

3. Для того, щоб навантажити генератор активною потужністю, необхідно збільшити момент приводного двигуна шляхом зменшення його струму збудження ($R_p = \text{var}$) або підвищенням напруги на якорі ($U_{\text{onc}} = \text{var}$), це викликає перехід двигуна на більшу швидкість. Оскільки

частота обертання генератора залишається при цьому синхронною (вона жорстко пов'язана з частотою мережі), то зменшення потоку двигуна викликає збільшення моменту на валу електромеханічної системи.

U -подібна характеристика при навантаженні для синхронного генератора знімається в такій послідовності. На холостому ході встановлюється струм $i_f = i_{f.c}$, при якому струм $I = 0$. Збільшують момент приводного двигуна, за допомогою РНТ збільшуючи напругу приводного двигуна до тих пір, поки струм статора генератора досягне $I = 0,7 \cdot I_n$. Зменшуючи ($i_f < i_{f.c}$) і збільшуючи ($i_f > i_{f.c}$) струм збудження генератора, знімають вітки характеристики в недозбудженому і перезбудженому режимах. Обов'язково записується точка U -подібної характеристики при мінімальному струмі статора [17]. Струм збудження потрібно змінювати в таких межах, щоб $I \leq I_n$. Результати вимірювань заносять до табл. 2С.2.

Таблиця 2С.2 – U -подібна характеристика генератора з навантаженням

Величини	1	2	3	4	5	6	7	Примітка
i_f, A								$P_2^* = 0,7;$ $I^* = 0,7$
I, A								
I_a, A								
I_p, A								
$\cos\varphi, \text{в. о.}$								

4. Визначення активної та реактивної складових струму статора.

Активна складова струму статора обумовлена значенням обертового моменту приводного двигуна й не залежить від струму збудження. Тому для кожної точки U -подібної характеристики активний струм I_a незмінний і дорівнює струму статора в мінімумі U -подібної характеристики (реактивна складова I_p в цій точці приймається рівною нулю $I_p = 0$). Для решти випадків реактивний струм визначається за виразом

$$I_p = \sqrt{I^2 - I_a^2}. \quad (2С.1)$$

Коефіцієнт потужності визначатиметься за формулою

$$\cos \varphi = I_a / I. \quad (2С.2)$$

2С.3 Запитання до захисту



1. Умови включення синхронного генератора на паралельну роботу з мережею.
2. Методика практичної реалізації умов включення генератора на паралельну роботу.
3. Які відхилення від нормальної роботи генератора може викликати недотримання умов синхронізації?
4. Робота синхронної машини в режимі компенсатора.
5. Генераторний режим роботи синхронної машини паралельно з мережею.
6. Двигунний режим роботи синхронної машини.
7. Кутова характеристика явнополюсних і неявнополюсних синхронних машин.
8. Стійкість і статична перевантаженість синхронного генератора.

2С.4 Задачі для самостійного розв'язання

1. При включенні чотиріполюсної синхронної машини на паралельну роботу з мережею частотою $f_1 = 50$ Гц швидкість обертання ротора доведена до 1499 об/хв. Визначити період зміни різниці ЕРС і ковзання ротора відносно синхронної частоти.

2. У момент вмикання неявнополюсного генератора на паралельну роботу з мережею ЕРС генератора зміщена відносно рівної їй за модулем напруги мережі на кут $\alpha = 200^\circ$. Знайти у відносних одиницях струм в обмотці якоря, якщо $E = U_m = U_n$, а індуктивний опір обмотки якоря $X_d^* = 1,2$. Побудувати діаграму напруг \dot{E} , \dot{U} , $\Delta\dot{E}$, вказати напрям струму I_a та визначити кут θ між \dot{U} та \dot{E} .

3. Двополюсний трифазний турбогенератор працює паралельно з електричною мережею при $f = 50$ Гц, $U^* = 1,0$, $E^* = 1,97$, $X_d^* = 1,2$. Побудувати кутові характеристики активної потужності та

електромагнітного моменту в відносних одиницях (для розрахунку взяти не менше 6 точок).

4. Гідрогенератор має потужність $P_n = 20$ МВт, $U_{лн} = 6,6$ кВ, $I_n = 2180$ А, $X_d = 2,0$ Ом, $X_q = 1,25$ Ом, схема з'єднання обмотки статора – зірка. Він працює паралельно з мережею при номінальному струмі збудження. Побудувати кутову характеристику гідрогенератора (для розрахунку взяти не менше 6 точок).

5. Неявнополюсний генератор потужністю $S_n = 1,25$ МВА, $P_n = 1,0$ МВт має $X_d^* = 1,66$, $E^* = 2,4$. Визначити статичну перевантаженість k_n та кут між ЕРС E і напругою генератора U за допомогою векторної діаграми.

6. При незмінному струмі збудження $i_{f,n}$ обертовий момент приводного двигуна синхронного турбогенератора, який працює паралельно з мережею, зменшився в 2 рази порівняно з номінальним. Визначити новий кут θ , якщо статичне перевантаження $k_n = 1,85$.

7. Знайти межі стійкої роботи явнополюсної синхронної машини, яка працює паралельно з мережею, якщо номінальна лінійна напруга $U_{лн} = 15,75$ кВ, основна ЕРС, що відповідає номінальному струму збудження, $E_n = 23,1$ кВ, індуктивний опір $X_d = 3,5$ Ом, $X_q = 2,37$ Ом.


8. U -подібна характеристика турбогенератора задана у вигляді табл. 2С.3.

Таблиця 2С.3 – U -подібна характеристика турбогенератора

$I, \text{ А}$	660	380	330	380	660
$i_f, \text{ А}$	79	132	170	212	296

Дані відповідають активному навантаженні $P^* = 0,2$. Побудувати залежність коефіцієнта потужності $\cos\varphi$ від струму збудження генератора.

Лабораторна робота № 3С ВИПРОБУВАННЯ ТРИФАЗНОГО СИНХРОННОГО ДВИГУНА

 **Мета роботи** | експериментально визначити U -подібні й робочі характеристики синхронного двигуна, засвоїти правила пуску синхронного двигуна та провести його асинхронний запуск.

3С.1 Програма виконання лабораторної роботи

1. Ознайомитися з конструкцією лабораторного стенда, будовою випробуваної машини, записати номінальні дані двигуна і навантажувального генератора.

2. Виконати асинхронний пуск синхронного двигуна.

3. Дослідним шляхом визначити:

а) U -подібні характеристики двигуна на холостому ході;

б) U -подібні характеристики двигуна при навантаженні;

в) робочі характеристики двигуна.

4. За дослідними даними побудувати:

а) залежності $I = f(i_f)$, $I_a = f(i_f)$, $I_p = f(i_f)$, $\cos\varphi = f(i_f)$ на холостому ході та при навантаженні, причому графіки I та $\cos\varphi$ для двох випадків будувати в одних координатних осях, а $I_a = f(i_f)$ і $I_p = f(i_f)$ в інших;

б) робочі характеристики (усі в одних координатних осях):

$$I_1 = f(P_2); P_1 = f(P_2); M_2 = f(P_2); n = f(P_2); \eta = f(P_2); \cos\varphi = f(P_2).$$

3С.2 Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи

Схема для дослідження синхронного двигуна наведена на рис. 3С.1.

Досліджуваний синхронний двигун MS має трифазну обмотку на статорі та обмотку збудження, розміщену на явнополюсному роторі. Пускова обмотка на роторі відсутня. Збудження синхронного двигуна здійснюється через ЛАТР $T2$ та випрямний міст $UI2$. Навантаження на валу синхронного двигуна у робочому стані створює генератор постійного струму незалежного струму збудження G. Обмотка якоря

навантажувального генератора підключена до двох фаз активного навантаження випробувального стенда.

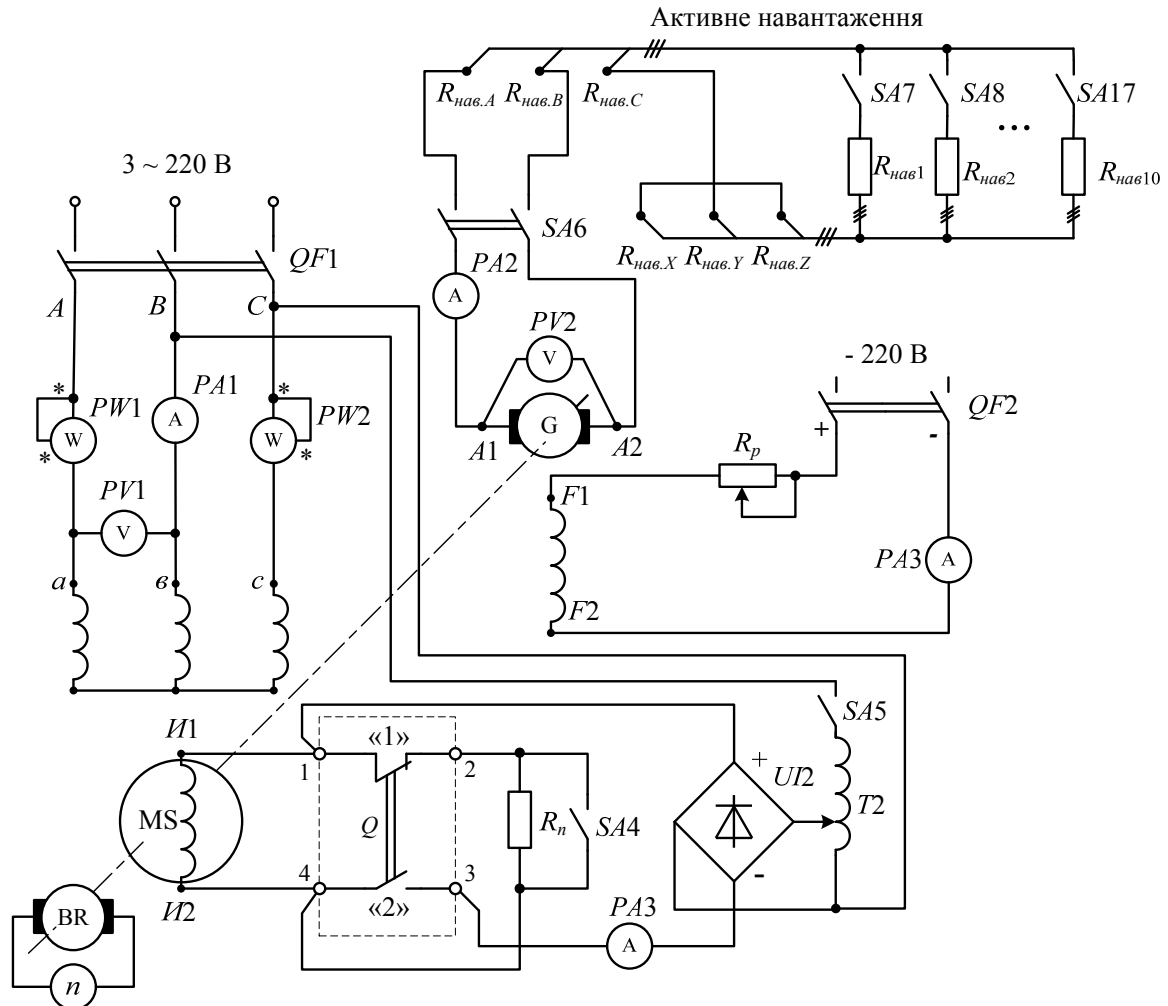


Рисунок 3С.1 – Схема дослідження характеристик синхронного двигуна

Послідовність виконання роботи.

1. Скласти схему установки за рис. 3С.1.
2. Перемикач Q поставити в положення 1, рукоятку ЛАТРа $T2$ – в нульове положення, включити перемикачі $SA4$ і $SA5$. При цьому обмотка збудження синхронного двигуна MS замкнута накоротко.
3. Після перевірки схеми отримати допуск до виконання лабораторної роботи. Подати напругу на обмотку статора двигуна вмиканням автоматичного вимикача $QF1$. Розгін двигуна спостерігати за тахометром. Переконавшись, що двигун розігнався лише до половини синхронної

швидкості обертання (діє одноосьовий ефект), відключити $SA4$. При цьому в обмотку збудження двигуна буде введено додатковий опір R_n [17].

4. При досягненні двигуном швидкості обертання, близької до синхронної, переключити Q в положення 2. Подати напругу на обмотку збудження, регулюючи її за допомогою ЛАТРа $T2$ таким чином, щоб струм збудження складав близько 3 А. Переконалися, що двигун втягнувся в синхронізм (швидкість дорівнює синхронній).

5. Випробування синхронного двигуна в режимі синхронного компенсатора (зняття U -подібних характеристик при холостому ході) проводити таким чином.

На холостому ході двигуна перемикач $SA6$ в колі навантаження навантажувального генератора відключений. Встановити за допомогою ЛАТРа $T2$ такий струм збудження двигуна $i_{f,c}$, при якому струм статора I буде найменшим. Цей мінімальний струм є активним струмом $I_{a,0}$, який споживається двигуном з мережі для створення моменту холостого ходу. При цьому $\cos\varphi = 1$.

Зменшуючи струми i_f відносно $i_{f,c}$, зняти спадну вітку U -подібної характеристики двигуна. Потім, збільшуючи i_f відносно $i_{f,c}$, зняти висхідну вітку. Струм статора не повинен перевищувати для обох віток номінальне значення $I \leq I_n$.

Результати досліджень занести до табл. 3С.1.

Таблиця 3С 1 – U -подібна характеристика синхронного компенсатора

Величини	1	2	3	4	5	6	7	Примітка
i_f, A								$M_c = 0;$ $I_{enc} = 0$
I, A								
$I_{a,0}, A$								
I_p, A								
$\cos\varphi, \text{ в. о.}$								

6. Визначення U -подібних характеристик синхронного двигуна при навантаженні здійснюють таким чином.

На холостому ході встановити струм $i_f = i_{f,c}$, при якому струм статора найменший. Для створення заданого навантаження двигуна включити $QF2$ та подати струм збудження на генератор постійного струму, встановити напругу навантажувального генератора реостатом R_p $U_{гпс} = U_{ном}$, включити $SA6$ і за допомогою декількох ступенів активного навантаження встановити струм двигуна $0,4 \cdot I_{ном}$. Зменшуючи струми i_f відносно $i_{f,c}$, зняти спадну вітку U -подібної характеристики. Потім, збільшуючи i_f відносно $i_{f,c}$, зняти висхідну вітку характеристики. Струм статора повинен бути в межах номінального значення $I \leq I_n$.

Обов'язково зняти точку характеристики при струмі збудження, що відповідає мінімальному струму статора. Цей мінімальний струм рівний активному струму статора при даному навантаженні двигуна. Дані занести до табл. 3С.2.

Таблиця 3С.2 – U -подібна характеристика синхронного двигуна

Величини	1	2	3	4	5	6	7	Примітка
i_f, A								$M_c^* = 0,4;$ $I_{яг}^* = 0,4$
I, A								
$I_{a.0}, A$								
I_p, A								
$\cos\varphi, \text{в. о.}$								

Розрахункові вирази для визначення реактивної складової струму статора синхронного двигуна та коефіцієнта потужності такі ж, як і для генераторного режиму (2С.1) та (2С.2).

7. Експериментальне визначення робочих характеристик синхронного двигуна проводиться за такою методикою.

Робочі характеристики знімаються при постійній нарузі $U = U_n$ та постійному струмові збудження $i_f = i_{f,ном}$.

Встановити номінальний струм збудження двигуна $i_f = i_{f,ном}$ за допомогою ЛАТРа $T2$. Увімкнути $QF2$ та встановити напругу навантажувального генератора реостатом R_p $U_{гпс} = U_{ном}$, включити $SA6$ і змінювати навантаження на генераторі постійного струму (і, відповідно, на

синхронному двигуні) за допомогою опорів активного навантаження. Збільшувати навантаження двигуна шляхом увімкнення додаткових ступенів навантаження на генератор, одночасно підтримуючи напругу генератора близькою до номінальної $U_{ген} \approx U_{ном}$. Зняти таким чином 6-7 значень вимірюваних величин. Найбільший допустимий струм статора $I = (1,1 \dots 1,2) \cdot I_{ном}$. Звернути увагу на положення перемикачів обмоток напруги ватметрів: споживана потужність обчислюється за методом двох ватметрів $P_1 = P_I \pm P_{II}$.

Результати вимірювань занести до табл. 3С.3.

Таблиця 3С.3 – Робочі характеристики синхронного двигуна

№ п/п	Дослідна частина						Розрахункова частина					
	U , В	I , А	P_1 , Вт	n , об/хв	U_2 , В	$I_{я2}$, А	P_2 , Вт	η , в.о	P_2 , Вт	M_2 , Н·м	$\cos\phi$, в.о.	
1												
2												
⋮												

Розрахункова частина робочих характеристик (табл. 3С.3) обчислюється за такими виразами.

Корисна потужність навантажувального генератора:

$$P_2 = U_2 \cdot I_{я2}. \quad (3С.1)$$

Коефіцієнт корисної дії синхронного двигуна:

$$\eta = \sqrt{\frac{P_2}{P_1}}. \quad (3С.2)$$

Корисна потужність на валу двигуна:

$$P_2 = \eta \cdot P_1. \quad (3С.3)$$

Корисний момент на валу двигуна:

$$M = 9,55 \cdot \frac{P_2}{n}. \quad (3C.4)$$

Коефіцієнт потужності двигуна:

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I}. \quad (3C.5)$$

3C.3 Запитання до захисту



1. Конструкція й принцип дії синхронного двигуна.
2. Переваги та недоліки синхронних двигунів в порівнянні з асинхронними.
3. Рівняння напруг і векторна діаграма синхронного двигуна.
4. Моменти при пуску синхронного двигуна, який не має пусковий обмотки.
5. Одноосьовий момент при пуску та способи його усунення.
6. Моменти при пуску синхронного двигуна з пусковою обмоткою.
7. U -подібні характеристики синхронного двигуна на холостому ходу та під навантаженням.
8. Робочі характеристики синхронного двигуна.

3C.4 Задачі для самостійного розв'язання

1. Швидкість обертання магнітного поля статора синхронного двигуна дорівнює 1500 об/хв. Чому дорівнює швидкість обертання ротора в синхронному режимі роботи?

2. Шестиполосний синхронний двигун має номінальну потужність $P_n = 6300$ кВт, номінальна напруга мережі $U = 6$ кВ, частота $f = 50$ Гц, $\cos \varphi = 0,9$ (випереджаючий), ККД $\eta = 0,971$. Визначити номінальний обертовий момент, струм якоря, активну й реактивну потужності двигуна.

3. Кратність максимального моменту шестиполосного синхронного двигуна $M_{max} / M_{ном} = 2$. Без урахування явнополосності побудувати кутову характеристику моменту, визначити кут θ при номінальному навантаженні

й номінальному збудженні. Механічними й додатковими втратами знехтувати. Кутова частота мережі $\omega_c = 314$ рад/с.

4. Восьмиполісний синхронний двигун, номінальна потужність якого $P_n = 75$ кВт, має кратність максимального моменту 1,65. Без урахування насичення і явнополісності визначити максимальний момент, при якому двигун утримується в синхронізмі, якщо струм збудження зменшити до $0,5 \cdot i_{f_n}$. Частота напруги мережі $f = 50$ Гц.

5. Трифазний синхронний двигун, номінальна потужність якого $P_n = 3600$ кВт, працює в режимі холостого ходу при $U = 6$ кВ і $\cos\varphi = 1,0$. Визначити споживану двигуном потужність, якщо сума механічних і додаткових втрат дорівнює 62 кВт, магнітні втрати $\Delta p_{mag} = 80$ кВт, потужність, яка споживається збуджувачем на валу генератора $P_f / \eta_f = 15$ кВт, активний опір обмотки якоря складає $R_a = 0,12$ Ом. Схема з'єднання обмоток – зірка.

ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ ПІДГОТОВКИ

Варіант № 1

1. Яка частота індукованої ЕРС в обмотці якоря чотирьополусного синхронного генератора, якщо його ротора обертається зі швидкістю 628 рад/с?

- а) $f = 50$ Гц;
- б) $f = 75$ Гц;
- в) $f = 100$ Гц;
- г) $f = 200$ Гц.

2. Чому полюси ротора в явнополусних синхронних машинах виконуються зі скошеними краями.

- а) для покращення форми ЕРС;
- б) для збільшення ЕРС;
- в) для зниження маси ротора;
- г) для покращення охолодження машини.

3. В чому полягає конструктивна різниця між прямою та оберненою синхронною машиною?

- а) в напрямку обертання МРС статора відносно МРС ротора;
- б) у взаємному розташуванні обмоток збудження і якоря;
- в) в напрямку обертання ротора в режимі двигуна;
- г) в конструкції ротора.

4. Чим відрізняється поздовжня демпферна обмотка в синхронних машинах від поздовжньо-поперечної.

- а) розташуванням стержнів обмоток відносно полюсів ротора;
- б) розташуванням стержнів обмоток відносно осі статора;
- в) способом з'єднання стержнів обмоток;
- г) відсутністю поперечних вентиляційних каналів в роторі.

5. Яка вісь синхронної машини називається повздовжньою?

- а) обертання ротора;
- б) полюсів ротора;

в) вісь, що збігається з максимальним значення ЕРС по каналу обмотки статора;

г) симетрії пазу статора.

6. Які машини називаються гідрогенераторами?

а) явнополюсні синхронні генератори з вертикальним валом для з'єднання з гідравлічною турбіною;

б) синхронні генератори з гідравлічним охолодженням;

в) неявнополюсні синхронні генератори з гідравлічною системою змащуванням;

г) машини, в яких перетворення енергій пов'язане з переміщенням рідини в магнітному полі.

7. Чому обмотка в пазах ротора турбогенератора закріплюється клином з немагнітного матеріалу?

а) для зменшення ваги ротора;

б) для покращення відведення тепла від лобових частин обмотки;

в) для збільшення діелектричної міцності;

г) для зменшення потоків розсіювання і насичення зубців.

8. Чому фази обмотки трифазного синхронного генератора вважають краще з'єднувати за схемою "зірка"?

1) щоб збільшити ЕРС генератора;

2) щоб усунути вплив третьої гармоніки;

3) щоб усунути вплив п'ятої гармоніки;

4) щоб збільшити ККД.

9. Чотириполюсний ротор синхронного генератора обертається з частотою 3000 об/хв. Визначте частоту ЕРС, наведену в обмотці якоря.

1) 500 Гц;

2) 50 Гц;

3) 60 Гц;

4) 100 Гц.

10. Які ротори застосовують в гідрогенераторах та турбогенераторах?

1) у гідрогенераторах – явнополюсні, у турбогенераторах – явнополюсні;

2) у гідрогенераторах – неявнополюсні, у турбогенераторах – явнополюсні;

- 3) у гідрогенераторах – неявнополюсні, у турбогенераторах – неявнополюсні;
4) у гідрогенераторах – явнополюсні, у турбогенераторах – неявнополюсні.

11. В обмотках якоря трифазного генератора з двома полюсами індукуються ЕРС частотою 50 Гц. З якою частотою обертається магнітне поле якоря?

- 1) 50 об/хв; 2) 300 об/хв;
3) 3000 об/хв; 4) 1500 об/хв.

12. Де вигідніше з електромагнітної точки зору розміщувати обмотку збудження синхронної машини?

- 1) на статорі; 2) на роторі;
3) не має різниці.

13. МРС обмотки збудження синхронної машини, що працює в усталеному режимі роботи, залежить від:

- 1) режиму роботи; 2) струму збудження;
3) синхронної швидкості
обертання; 4) частоти напруги живлення.

14. ЕРС E_f в обмотці збудження синхронної машини, що працює в усталеному режимі роботи,:

- 1) $E = 0$; 2) $E > 0$;
3) $E < 0$; 4) $0 < E < E_n$.

15. Пускову обмотку має синхронний двигун:

- 1) з явновираженими полюсами; 2) з неявновираженими полюсами;
3) як з явновираженими, так і з неявновираженими полюсами; 4) з короткозамкненим ротором.

16. Демпферна обмотка синхронного генератора призначена для:

- 1) підвищення перевантажувальної здатності; 2) згасання коливань ротора;
3) зменшення втрат потужності; 4) стабілізації напруги якоря.

17. Потужність обмотки збудження синхронної машини відносно потужності обмотки якоря складає:

- 1) $(0,3 \div 3)\%$;
- 2) $(3 \div 10)\%$;
- 3) $(5 \div 15)\%$;
- 4) $(10 \div 30)\%$.

18. З яких елементів складається автомат гасіння поля (АГП) в системах збудження синхронних генераторів?

- 1) з двох контакторів та розрядного резистора;
- 2) з розрядного та регулювального резистора;
- 3) з двох контакторів та збуджувача;
- 4) з регулювального резистора та збуджувача.

19. Яка машина служить збуджувачем синхронного генератора в безщітковій системі збудження?

- 1) генератор постійного струму паралельного збудження;
- 2) генератор постійного струму незалежного збудження;
- 3) синхронний генератор;
- 4) для збудження використовується ЕРС обмотки якоря основного генератора і збуджувач не потрібен.

20. Яка реакція якоря синхронного генератора при активно-емнісному навантаженні?

- 1) повздовжня розмагнічувальна;
- 2) повздовжня намагнічувальна;
- 3) повздовжня намагнічувальна плюс поперечна;
- 4) повздовжня розмагнічувальна плюс поперечна;
- 5) поперечна.

21. Яка реакція якоря синхронного генератора при активно-індуктивному навантаженні?

- 1) повздовжня розмагнічувальна;
- 2) повздовжня намагнічувальна;
- 3) повздовжня намагнічувальна плюс поперечна;
- 4) повздовжня розмагнічувальна плюс поперечна;
- 5) поперечна.

22. Яка реакція якоря синхронного генератора при чисто активному навантаженні?

- 1) повздовжня розмагнічувальна;
- 2) повздовжня намагнічувальна;
- 3) повздовжня намагнічувальна плюс поперечна;
- 4) повздовжня розмагнічувальна плюс поперечна;
- 5) поперечна.

23. Яка реакція якоря синхронного генератора при чисто індуктивному навантаженні?

- 1) подовжня розмагнічувальна;
- 2) подовжня намагнічувальна;
- 3) подовжня намагнічувальна плюс поперечна;
- 4) подовжня розмагнічувальна плюс поперечна;
- 5) поперечна.

24. Яка реакція якоря синхронного генератора при чисто ємнісному навантаженні?

- 1) подовжня розмагнічувальна;
- 2) подовжня намагнічувальна;
- 3) подовжня намагнічувальна плюс поперечна;
- 4) подовжня розмагнічувальна плюс поперечна;
- 5) поперечна.

25. Як змінюється результуюче магнітне поле синхронного генератора при збільшенні активно-індуктивного навантаження?

- | | |
|----------------------------------|---------------------------------|
| 1) збільшується; | 2) зменшується; |
| 3) збільшується й спотворюється; | 4) зменшується й спотворюється; |
| 5) не змінюється. | |

26. Як змінюється результуюче магнітне поле синхронного генератора при збільшенні активно-ємнісного навантаження?

- | | |
|----------------------------------|---------------------------------|
| 1) збільшується; | 2) зменшується; |
| 3) збільшується й спотворюється; | 4) зменшується й спотворюється; |

5) не змінюється.

27. У яких координатах для синхронного генератора будуються характеристики холостого ходу (ХХ) та короткого замикання (КЗ)?

- 1) $XX - I_a = f(I_z)$, $КЗ - U_0 = f(I_a)$; 2) $XX - E_0 = f(I_z)$, $КЗ - I_z = f(I_a)$;
3) $XX - E_0 = f(I_z)$, $КЗ - I_a = f(I_z)$; 4) $XX - I_z = f(I_a)$, $КЗ - I_a = f(U_0)$.

28. За яких умов характеристики холостого ходу, побудовані у відносних одиницях для різних синхронних генераторів, збігаються?

- 1) при однакових коефіцієнтах насичення;
- 2) при однакових напругах мережі;
- 3) при однакових струмах збудження;
- 4) при однакових напругах мережі та струмах збудження.

29. Як впливає відстаючий струм синхронного генератора на його магнітну систему?

- 1) розмагнічує;
- 2) підмагнічує;
- 3) не впливає;
- 4) залежить від типу навантаження.

30. Як впливає випереджувальний струм синхронного генератора на його магнітну систему?

- 1) розмагнічує;
- 2) підмагнічує;
- 3) не впливає;
- 4) залежить від типу навантаження.

31. Чому не вигідно в синхронних генераторах виконувати обмотки з укороченим кроком?

- 1) не відбувається покращення форми кривої напруги;
- 2) не досягається приглушення п'ятої гармоніки;
- 3) зменшується перша гармоніка напруги;
- 4) зменшується перевантажувальна здатність машини.

32. Магнітним потоком взаємоіндукції називають:

- 1) потік першої гармоніки магнітного поля збудження;
- 2) потік першої гармоніки магнітного поля якоря;
- 3) потік третьої і вищих гармонік магнітного поля збудження;
- 4) потік першої і вищих гармонік магнітного поля якоря.

33. У синхронного генератора струм якоря відстає від напруги на кут $\varphi = 20^\circ$, кут $\psi = 30^\circ$. Визначте кут навантаження θ .

- | | |
|-----------------|-----------------|
| 1) 10° ; | 2) 50° ; |
| 3) 20° ; | 4) 30° . |

34. У синхронного генератора струм якоря збігається з напругою й кут $\varphi = 0^\circ$, кут $\psi = 20^\circ$. Визначте кут навантаження θ .

- | | |
|-----------------|-----------------|
| 1) 0° ; | 2) 10° ; |
| 3) 20° ; | 4) 40° . |

35. У синхронного генератора струм якоря випереджає напругу на кут $\varphi = 40^\circ$, кут $\theta = 20^\circ$. Визначте кут ψ .

- | | |
|-----------------|-----------------|
| 1) 0° ; | 2) 20° ; |
| 3) 40° ; | 4) 60° . |

36. При збільшенні навантаження синхронного генератора кут θ :

- | | |
|--------------------------|---------------------------------|
| 1) залишається без змін; | 2) збільшується; |
| 3) зменшується; | 4) зменшується, але не суттєво. |

37. Повним індуктивним опором синхронної машини по поперечній осі є опір:

- | | |
|---------------|---------------|
| 1) $X_{сн}$; | 2) X_d ; |
| 3) X_q ; | 4) $X_{св}$. |

38. Діаграма Потьє будується для синхронних генераторів:

- 1) з явновираженими полюсами;
- 2) з неявновираженими полюсами;
- 3) як з явновираженими полюсами, так і з неявно вираженими полюсами;
- 4) з конструктивною схемою виконання, при якій обмотка збудження знаходиться на статорі.

39. Кут навантаження Θ синхронної машини – це кут між векторами:

- | | |
|--------------------|------------------|
| 1) U і E_0 ; | 2) U і I_a ; |
| 3) I_a і E_0 ; | 4) U і E_a . |

40. Як змінюється напруга на затискачах синхронного генератора при збільшенні індуктивного навантаження?

- 1) збільшується;
- 2) збільшується, але не суттєво;
- 3) зменшується;
- 4) не змінюється.

41. Як змінюється напруга на затискачах синхронного генератора при збільшенні ємнісного навантаження?

- 1) збільшується;
- 2) зменшується;
- 3) зменшується, але не суттєво;
- 4) не змінюється.

42. Як треба змінювати струм збудження синхронного генератора, щоб при збільшенні ємнісного навантаження напруга на затискачах генератора не змінювалася?

- 1) збільшувати;
- 2) зменшувати;
- 3) не змінювати, відбувається автоматичний процес стабілізації;
- 4) контролювати відповідно до зміни навантаження.

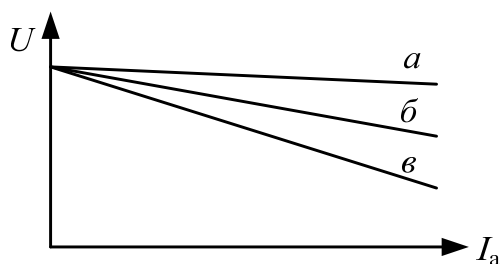
43. Як треба змінювати струм збудження синхронного генератора, щоб при збільшенні індуктивного навантаження напруга на затискачах генератора не змінювалася?

- 1) збільшувати;
- 2) зменшувати;
- 3) не змінювати, відбувається автоматичний процес стабілізації;
- 4) контролювати відповідно до зміни навантаження.

44. Як треба змінювати струм збудження синхронного генератора, щоб при збільшенні чисто активного навантаження напруга на затискачах генератора не змінювалася?

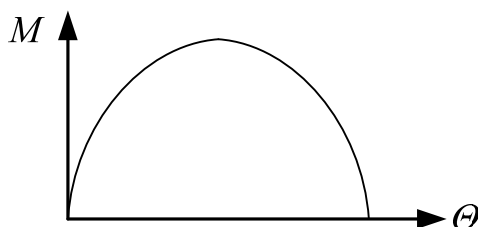
- 1) збільшувати;
- 2) зменшувати;
- 3) не змінювати, відбувається автоматичний процес стабілізації;
- 4) контролювати відповідно до зміни навантаження.

45. Синхронний генератор працює автономно на активно-індуктивне навантаження. У якому співвідношенні перебувають коефіцієнти потужності споживачів, при яких синхронний генератор має такі зовнішні характеристики, побудовані при однаковому значенні напруги холостого ходу?



- 1) $\cos\varphi_a = \cos\varphi_b = \cos\varphi_v$ 2) $\cos\varphi_a > \cos\varphi_b > \cos\varphi_v$;
 3) $\cos\varphi_a < \cos\varphi_b < \cos\varphi_v$;
 4) $\cos\varphi_a < \cos\varphi_b, \cos\varphi_a > \cos\varphi_v$.

46. Яка характеристика синхронного генератора наведена нижче?



- 1) зовнішня; 2) регульовальна;
 3) холостого ходу;
 4) кутова.

47. Для одержання невеликого спаду напруги синхронного генератора потрібно:

- 1) знижувати синхронний індуктивний опір;
 2) збільшувати синхронний індуктивний опір;
 3) збільшити насичення магнітопроводу;
 4) зменшити струм збудження.

48. При роботі синхронного генератора з відстаючим струмом з $\cos\varphi = 0,9 \div 0,85$ спад напруги складає:

- 1) $(3 \div 10)\%$; 2) $(5 \div 15)\%$;
 3) $(10 \div 25)\%$; 4) $(25 \div 35)\%$.

49. Який з перерахованих синхронних генераторів може мати $ВКЗ = 0,7$?

- 1) з явновираженими полюсами;
 2) з неявновираженими полюсами;
 3) як з явновираженими, так і з неявновираженими полюсами;

4) з конструктивною схемою виконання, коли обмотка збудження знаходиться на статорі.

50. Номінальна напруга синхронного генератора $U_{ном} = 6$ кВ, номінальний струм $I_n = 2,7$ кА, індуктивний опір обмотки якоря по повздовжній осі $X_d = 2,5$ Ом. Визначте ВКЗ синхронного генератора.

- 1) 0,515;
- 2) 1,94;
- 3) 1,126;
- 4) 0,888.

51. Номінальна напруга синхронного генератора $U_{ном} = 6$ кВ, номінальний струм $I_n = 2,5$ кА, індуктивний опір обмотки якоря по повздовжній осі $X_d = 1,5$ Ом. Визначте ВКЗ синхронного генератора.

- 1) 0,925;
- 2) 1,08;
- 3) 0,625;
- 4) 1,6.

52. Характеристика короткого замикання синхронного генератора має лінійний характер за рахунок того, що:

- 1) опір кола якоря є чисто індуктивним;
- 2) опір кола якоря є чисто ємнісним;
- 3) опір кола якоря є чисто активним;
- 4) опір кола якоря є активно-індуктивним.

53. В режимі дослідного короткого замикання робоча точка на кривій намагнічування знаходиться:

- 1) на лінійній ділянці;
- 2) на коліні згину;
- 3) в зоні насичення;
- 4) на лінійній ділянці або на коліні згину в залежності від потужності машини.

54. Усталений струм короткого замикання в синхронних машинах порівняно невеликий через те, що:

- 1) поле якоря сильно розмагнічує машину;
- 2) поле якоря сильно підмагнічує машину;
- 3) машина містить заспокійливу обмотку;
- 4) обмотка збудження знаходиться на роторі.

55. Як впливає ВКЗ на вигідність синхронної машини?

- 1) доцільніше мати машину з малим ВКЗ;
- 2) доцільніше мати машину з великим ВКЗ;
- 3) не впливає;
- 4) залежно від типу навантаження.

56. Горизонтальний катет характеристичного трикутника синхронного генератора відповідає:

- 1) струму збудження, що компенсує дію розмагнічуючої реакції якоря;
- 2) ЕРС, необхідну для компенсації спаду напруги $I_{аном}X_{си}$ при номінальному струмі якоря;
- 3) струму короткого замикання;
- 4) номінальному спаду напруги в якірному колі.

57. Вертикальний катет характеристичного трикутника синхронного генератора відповідає:

- 1) струму збудження, що компенсує дію розмагнічуючої реакції якоря;
- 2) ЕРС, необхідну для компенсації спаду напруги $I_{аном}X_{си}$ при номінальному струмі якоря;
- 3) струму короткого замикання;
- 4) номінальному спаду напруги в якірному колі.

58. Для чого використовуються лампи, що включають між синхронним генератором і мережею, при перевірці умов синхронізації?

- 1) для визначення чергування фаз;
- 2) для визначення частоти ЕРС;
- 3) для перевірки рівності напруг мережі і генератора;
- 4) для перевірки рівності частот мережі і генератора.

59. У який момент виконується включення синхронного генератора на паралельну роботу, якщо лампи синхроноскопа включені на "згасання" світла?

- 1) коли лампи горять повним розжаренням;
- 2) коли лампи гаснуть;
- 3) коли частота загоряння і затухання світла є мінімальною;
- 4) коли лампи горять в половину розжарення.

60. У який момент виконується включення синхронного генератора на паралельну роботу, якщо лампи синхроскопа включені на "обертання" світла?

- 1) коли лампи загоряються і згасають за годинниковою стрілкою;
- 2) коли лампи загоряються і згасають проти годинникової стрілки;
- 3) коли частота загоряння і затухання світла є мінімальною;
- 4) коли лампи горять повним розжаренням.

61. За рахунок чого досягається рівність напруг синхронного генератора та мережі при їх синхронізації?

- 1) регулювання струму збудження генератора;
- 2) регулювання швидкості обертання генератора;
- 3) регулювання обертового моменту генератора;
- 4) регулювання швидкості обертання генератора та його моменту.

62. За рахунок чого досягається рівність частоти та фази напруг синхронного генератора та мережі при їх синхронізації?

- 1) регулювання струму збудження генератора;
- 2) регулювання швидкості обертання генератора;
- 3) регулювання обертового моменту генератора;
- 4) регулювання швидкості обертання генератора та його моменту.

63. Метод самосинхронізації при підключенні синхронного генератора до мережі можна застосовувати у випадках, коли поштовх струму не буде перевищувати:

- | | |
|-------------------|-------------------|
| 1) $2,5I_{ном}$; | 2) $3,5I_{ном}$; |
| 3) $4,5I_{ном}$; | 4) $5I_{ном}$. |

64. Чи можна в синхронному генераторі, змінюючи його струм збудження, змінювати активну потужність P та реактивну потужність Q ?

- | | |
|---------------------------------|------------------------------------|
| 1) P – можна, Q – можна; | 2) P – не можна, Q – не можна; |
| 3) P – не можна, Q – можна; | 4) P – можна, Q – не можна. |

65. Як можна збільшувати активну потужність, яку віддає синхронний генератор в мережу?

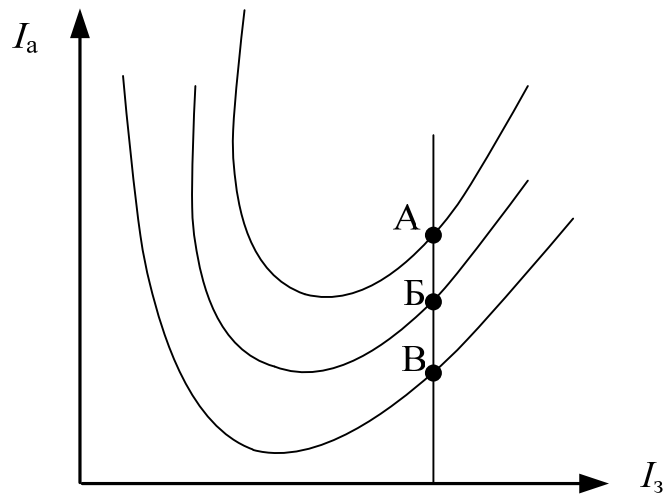
- 1) збільшувати струм збудження;
- 2) зменшувати струм збудження;

- 3) збільшувати обертовий момент;
- 4) зменшувати обертовий момент;
- 5) збільшувати коефіцієнт потужності навантаження.

66. Чи можна змінювати активну потужність P та реактивну потужність Q , що віддається синхронним генератором, змінивши його обертовий момент?

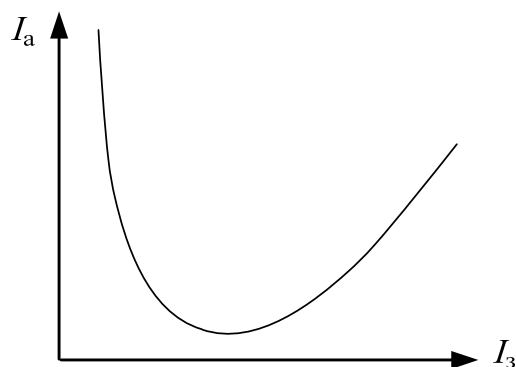
- 1) P – можна, Q – можна;
- 2) P – не можна, Q – не можна;
- 3) P – не можна, Q – можна;
- 4) P – можна, Q – не можна.

67. У якому співвідношенні перебувають коефіцієнти потужності синхронного генератора, що працює в точках А, Б, В?



- 1) $\cos\varphi_A = \cos\varphi_B = \cos\varphi_B$;
- 2) $\cos\varphi_A > \cos\varphi_B > \cos\varphi_B$;
- 3) $\cos\varphi_A < \cos\varphi_B < \cos\varphi_B$.

68. Як називається наведена характеристика синхронного генератора?



- 1) кутова;
- 2) зовнішня;
- 3) регулювання;
- 4) U-подібна.

69. При регулюванні активної потужності синхронного генератора його струм якоря можна регулювати:

- 1) струмом збудження;
- 2) зовнішнім моментом;
- 3) ЕРС холостого ходу;
- 4) кутом навантаження.

70. Як впливає зміна струму збудження синхронного генератора при його роботі паралельно з мережею під навантаженням на зміну струму якоря:

- 1) змінює його активну складову;
- 2) змінює його реактивну складову;
- 3) не впливає;
- 4) змінює його активну та реактивну складові.

71. Коли настає режим нормального збудження синхронного генератора при його роботі паралельно з мережею:

- 1) при активній складові струму якоря рівній нулю $I_{a.a} = 0$;
- 2) при реактивній складові струму якоря рівній нулю $I_{a.p} = 0$;
- 3) при струмі збудження рівному нулю $I_z = 0$;
- 4) при струмі збудження рівному номінальному $I_z = I_n$.

72. Режим перезбудження синхронного генератора відповідає:

- 1) активному навантаженню;
- 2) активно-індуктивному навантаженню;
- 3) активно-ємнісному навантаженню;
- 4) чисто індуктивному навантаженню;
- 5) чисто ємнісному навантаженню.

73. Режим недозбудження синхронного генератора відповідає:

- 1) активному навантаженню;
- 2) активно-індуктивному навантаженню;
- 3) активно-ємнісному навантаженню;
- 4) чисто індуктивному навантаженню;
- 5) чисто ємнісному навантаженню.

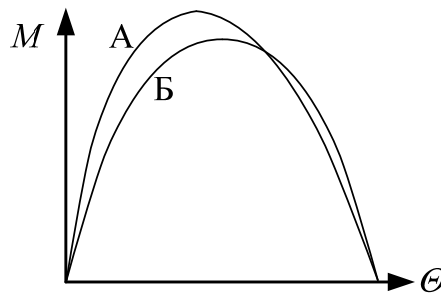
74. Перезбуджена синхронна машина, що працює в режимі холостого ходу, відносно мережі еквівалентна:

- 1) ємності;
- 2) індуктивності;
- 3) активному опору;
- 4) залежить від кривої намагнічування.

75. Недозбуджена синхронна машина, що працює в режимі холостого ходу, відносно мережі еквівалентна:

- | | |
|---------------------|--|
| 1) ємності; | 2) індуктивності; |
| 3) активному опору; | 4) залежить від кривої намагнічування. |

76. До якого типу синхронного генератора відносяться наведені характеристики?



- 1) А – неявнополюсного, Б – явнополюсного;
- 2) А – явнополюсного, Б – неявнополюсного;
- 3) А – неявнополюсного, Б – неявнополюсного;
- 4) А – явнополюсного, Б – явнополюсного.

77. Реактивний момент синхронного генератора явнополюсного типу обумовлений:

- 1) неоднаковою магнітною провідністю по різних осях;
- 2) наявністю збільшеного повітряного проміжку між статором і ротором;
- 3) наявністю демпферної обмотки в полюсних наконечниках.

78. Двигунний режим синхронної машини характеризується кутом навантаження θ :

- 1) $\theta = 0$;
- 2) $\theta = \pi/2$;
- 3) $\theta > 0$;
- 4) $\theta < 0$.

79. Холостий хід синхронної машини характеризується кутом навантаження θ :

- 1) $\theta = 0$;
- 2) $\theta = \pi/4$;
- 3) $\theta = -\pi/4$;
- 4) $\theta = \pi/2$;
- 5) $\theta = -\pi/2$.

80. При роботі синхронного генератора з номінальним навантаженням збільшили струм збудження. Як при цьому зміниться максимальний момент M_{max} і кут навантаження θ ?

- 1) M_{max} збільшиться, θ не зміниться;
- 2) M_{max} збільшиться, θ зменшиться;
- 3) M_{max} зменшиться, θ зменшиться;
- 4) M_{max} не зміниться, θ збільшиться.

81. Чому рівний критичний кут навантаження $\theta_{кр}$ явнопольного синхронного генератора?

- 1) $40^\circ - 60^\circ$;
- 2) $60^\circ - 80^\circ$;
- 3) 90° ;
- 4) 180° .

82. Чому рівний критичний кут навантаження $\theta_{кр}$ неявнопольного синхронного генератора?

- 1) $40^\circ - 60^\circ$;
- 2) $60^\circ - 80^\circ$;
- 3) 90° ;
- 4) 180° .

83. Яка перевантажувальна здатність явнопольного синхронного генератора відносно неявнопольного синхронного генератора?

- 1) така ж сама;
- 2) менша;
- 3) менша, але не суттєво;
- 4) більша.

84. Чим викликана поява реактивного моменту у явнопольного синхронного генератора?

- 1) неоднаковою магнітною провідністю по поздовжній та поперечній осях;
- 2) збільшеним струмом збудження;

- 3) зменшеному повітряному зазорі між статором та ротором;
- 4) підвищеною перевантажувальною здатністю.

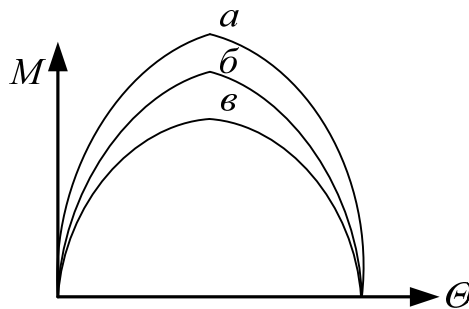
85. Як зміниться перевантажувальна здатність синхронного генератора при збільшенні повітряного зазору?

- 1) не зміниться;
- 2) зменшиться;
- 3) зменшиться, але не суттєво;
- 4) збільшиться.

86. Як зміниться перевантажувальна здатність синхронного генератора при зменшенні струму збудження?

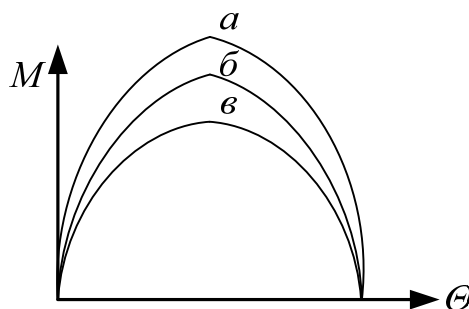
- 1) не зміниться;
- 2) зменшиться;
- 3) збільшиться;
- 4) збільшиться, але не суттєво.

87. У якому співвідношенні перебувають струми збудження синхронного генератора у наведених кутових характеристиках?



- 1) $I_{za} = I_{zb} = I_{zc}$;
- 2) $I_{za} < I_{zb} < I_{zc}$;
- 3) $I_{za} > I_{zb} > I_{zc}$.

88. У якому співвідношенні перебувають напруги синхронного генератора у наведених кутових характеристиках?



- 1) $U_a = U_b = U_c$;
- 2) $U_a > U_b > U_c$;

3) $U_a < U_b < U_c$.

89. Синхронна машина працює стійко, якщо:

- 1) $dM/d\theta > 0$; 2) $dM/d\theta < 0$;
3) $dM/d\theta = 0$.

90. Синхронна машина працює нестійко, якщо:

- 1) $dM/d\theta > 0$; 2) $dM/d\theta < 0$;
3) $dM/d\theta = 0$.

91. Підвищення перевантажувальної здатності синхронного генератора забезпечується у випадку, коли він працює:

- 1) з деяким перезбудженням;
2) з деяким недозбудженням;
3) в режимі повного збудження;
4) в зоні насичення магнітопроводу.

92. Як зміниться частота обертання синхронного двигуна, якщо механічне навантаження на валу двигуна збільшиться?

- 1) зменшиться; 2) зменшиться, але не суттєво;
3) збільшиться; 4) не зміниться.

93. Як потрібно змінювати струм збудження синхронного генератора при збільшенні його потужності для забезпечення стабільності напруги на виході?

- 1) збільшувати; 2) зменшувати;
3) зменшувати, але не суттєво; 4) не змінювати.

94. Недоліком синхронного двигуна порівняно з асинхронним двигуном є:

- 1) порівняльна складність пуску в хід;
2) менша чутливість до коливань напруги мережі;
3) можливість роботи при $\cos\varphi=1$;
4) сталість швидкості обертання.

95. Перевагою синхронного двигуна порівняно з асинхронним двигуном є:

- 1) порівняльна легкість пуску в хід;

- 2) менша чутливість до коливань напруги мережі;
- 3) неможливість роботи при $\cos\varphi=1$;
- 4) порівняльна легкість регулювання швидкості обертання.

96. При якому ковзанні визначається момент входження в синхронізм при асинхронному пуску синхронного двигуна?

- | | |
|----------------|-----------------|
| 1) $s = 1$; | 2) $s = 0,05$; |
| 3) $s = 0,1$; | 4) $s = 0,15$; |
| 5) $s = 0,5$. | |

97. Чому при асинхронному пуску синхронного двигуна обмотку збудження замикають на опір?

- 1) щоб зменшити напругу на затискачах обмотки збудження;
- 2) щоб зменшити струму в обмотці збудження;
- 3) щоб уникнути провалу механічної характеристики.

98. Коли виникає "одноосьовий ефект" при асинхронному пуску синхронного двигуна?

- 1) при замиканні обмотки збудження накоротко;
- 2) при включенні додаткового опору в коло збудження;
- 3) при досягненні ротором підсинхронної швидкості $n = 0,95n_1$;
- 4) при пуску з половинною напругою збудження.

99. Які з перерахованих способів пуску для синхронного двигуна неможливі?

- | | |
|------------------------|-----------------|
| 1) частотний; | 2) реостатний; |
| 3) пониженням напруги; | 4) асинхронний; |
| 5) прямий. | |

100. Вхідним називається асинхронний момент синхронного двигуна при:

- | | |
|--|--|
| 1) швидкості ротора, рівній $0,05\omega_1$; | 2) швидкості ротора, рівній $0,5\omega_1$; |
| 3) швидкості ротора, рівній $0,95\omega_1$; | 4) швидкості ротора, рівній $0,98\omega_1$. |

101. При регулюванні швидкості обертання синхронного двигуна із самосинхронізацією керування перетворювачем частоти здійснюється від

системи датчиків положення ротора, унаслідок чого напруга подається на кожен фазу двигуна при кутах навантаження:

- 1) $\Theta = 0^\circ$;
- 2) $\Theta < 90^\circ$;
- 3) $\Theta = 90^\circ$;
- 4) $\Theta > 90^\circ$.

102. При частотному способі регулюванні швидкості обертання синхронного двигуна магнітний потік бажано:

- 1) зменшувати;
- 2) збільшувати;
- 3) контролювати в залежності від типу навантаження;
- 4) не змінювати.

103. Яка машина використовується як синхронний компенсатор?

- 1) перезбуджений синхронний генератор;
- 2) перезбуджений синхронний двигун;
- 3) недозбуджений синхронний генератор;
- 4) недозбуджений синхронний двигун.

104. Недоліком роботи синхронної машини в режимі синхронного компенсатора для стабілізації напруги є:

- 1) завантаження мережі реактивним струмом;
- 2) завантаження мережі активним струмом;
- 3) завантаження мережі як активним, так і реактивним струмом;
- 4) низький коефіцієнт корисної дії.

105. Чому струм якоря, який споживається з мережі синхронним двигуном у режимі холостого ходу, не дорівнює нулю?

- 1) тому що швидкість двигуна обмежена;
- 2) тому що магнітна система не насичена;
- 3) тому що в двигуні проявляється реакція якоря;
- 4) тому що в двигуні є втрати енергії.

106. ККД турбогенератора $\eta = 0,97$. Номінальна лінійна напруга $U_{лн} = 10500$ В, номінальний фазний струм $I_{фн} = 1700$ А, номінальний коефіцієнт потужності $\cos\varphi = 0,8$. Визначте обертовий момент турбіни M_1 , якщо кутова швидкість ротора $\omega = 314$ рад/с.

- 1) 140652 Н·м;
- 2) 81110 Н·м;

3) 76316 Н·м;

4) 568747 Н·м.

107. До основних втрат синхронної машини не відносяться:

1) втрати на збудження;

2) механічні втрати;

3) втрати при навантаженні;

4) магнітні втрати.

108. До додаткових втрат синхронної машини відносяться:

1) втрати на збудження;

2) механічні втрати;

3) пульсаційні втрати в полюсних наконечниках ротора;

4) втрати при навантаженні;

5) магнітні втрати.

Варіант № 2

1. У якому відношенні до ЕРС синхронного генератора знаходиться поперечна складова струму якоря?

а) збігається з ЕРС за напрямком;

б) протилежна до ЕРС за напрямком;

в) відстає від ЕРС на 90° ;

г) випереджає ЕРС на 90° .

2. Якими складовими визначається синхронний індуктивний опір неявнополюсної машини?

а) індуктивним опором реакції якоря;

б) індуктивність обмотки збудження;

в) індуктивними опорами реакції якоря та розсіювання;

г) індуктивним опором обмотки збудження і збуджувача.

3. Якими складовими МРС створюється результуючий магнітний потік в повітряному зазорі неявнополюсного синхронного генератора?

а) лише МРС збудження;

б) МРС збудження і якоря;

в) лише МРС якоря;

г) МРС збудження і збуджувача.

4. Яке з рівнянь, наведених нижче, відповідає рівнянню рівноваги МРС неявнополюсного синхронного генератора?

а) $\vec{E}_\delta = U + \vec{I}_a r_a + j\vec{I}_a x_\sigma;$

б) $\vec{F}_\delta = \vec{F}_{\delta\sigma} + \vec{F}_a;$

в) $\vec{F}_{\delta\sigma} = \vec{F}_\delta + \vec{F}_a;$

г) $\vec{U} = \vec{E}_\sigma + I_e r_e + jI_e x_\sigma.$

5. Яке з рівнянь, наведених нижче, відповідає рівнянню рівноваги ЕРС неявнополюсного синхронного генератора?

а) $\vec{E}_\delta = \vec{U} + \vec{I}_a r_a + j\vec{I}_a x_\sigma;$

б) $\vec{F}_\delta = \vec{F}_{\delta\sigma} + \vec{F}_a;$

в) $\vec{F}_{\delta\sigma} = \vec{F}_\delta + \vec{F}_a;$

г) $\vec{U} = \vec{E}_\sigma + \vec{I}_a r_a + jI_a x_\sigma.$

6. Як обчислюється зміна напруги генератора при переході від номінального навантаження до холостого ходу?

а) $\Delta U\% = \frac{U_n - I_a r_a}{U_n} \cdot 100\%;$

б) $\Delta U\% = \frac{U_n - I_a Z_a}{U_n} \cdot 100\%;$

в) $\Delta U\% = \frac{E_0 - U_n}{U_n} \cdot 100\%;$

г) $\Delta U\% = \frac{E_0 - I_a Z_a}{U_n} \cdot 100\%.$

7. Як враховується вплив насичення магнітної системи синхронного генератора при побудові його векторної діаграми?

а) використанням характеристики холостого ходу;

б) підбором масштабу векторів МРС;

в) нехтуванням активного опору обмотки якоря $r_a \rightarrow 0$;

г) перерахунком індуктивного опору реакції якоря при роботі генератора з ненасиченим магнітопроводом і після насичення.

8. На які складові розкладається МРС якоря згідно з методом двох реакцій в явнополюсних синхронних генераторах?

- а) на активну та реактивну $\bar{F}_a = \bar{F}_{акт} + \bar{F}_{реак}$;
- б) на поздовжню і поперечну $\bar{F}_a = \bar{F}_d + \bar{F}_q$;
- в) на синхронну і асинхронну $\bar{F}_a = \bar{F}_{син} + \bar{F}_{асин}$;
- г) на первинну і вторинну $\bar{F}_a = \bar{F}_{a1} + \bar{F}_{a2}$.

9. Який порядок приведення МРС реакції якоря до МРС збудження в явнополюсних синхронних генераторах?

- а) $F_{ad} = k_d \cdot F_d$; $F_{aq} = k_q \cdot F_q$ – де k_d , k_q – коефіцієнти реакцій якоря;
- б) $F_{ad} = F_d / k_d$; $F_{aq} = F_q / k_q$ – де k_d , k_q – коефіцієнти реакцій якоря;
- в) $F_{ad} = \alpha \cdot F_d$; $F_{aq} = \alpha \cdot F_q$ – де α – коефіцієнт полюсного перекриття;
- г) $F_{ad} = F_d / \alpha$; $F_{aq} = F_q / \alpha$ – де α – коефіцієнт полюсного перекриття.

10. Яке з рівнянь, наведених нижче, відповідає рівнянню рівноваги ЕРС явнополюсного синхронного генератора?

- а) $\bar{U} = \bar{E}_0 - j \dot{I}_d X_d - j \dot{I}_q X_q - \dot{I} r_a - j \dot{I} X_\sigma$;
- б) $\bar{U} = \bar{E}_0 - j \dot{I}_d X_{ad} - j \dot{I}_q X_{aq} - \dot{I} r_a$;
- в) $\bar{U} = \bar{E}_0 - j \dot{I}_d X_d - j \dot{I}_q X_q - \dot{I} r_a$;
- г) $\bar{E}_0 = \bar{U} - j \dot{I}_d X_{ad} - j \dot{I}_q X_{aq} - j \dot{I} X_\sigma - \dot{I} r_a$.

11. Вкажіть, чому характеристика короткого замикання синхронного генератора має лінійний вигляд.

- а) внаслідок лінійної залежності між E_0 та I_k і $I_k = 1 / X_c \cdot E_0$;
- б) внаслідок розмагнічувальної дії реакції якоря, що перешкоджає насиченню;
- в) через незмінну швидкість обертання ротора;
- г) характеристика короткого замикання нелінійна.

12. Яка основна умова знімання навантажувальної характеристики синхронного генератора?

- а) $U_2 = \text{const}$;
- б) $i_f = \text{const}$;
- в) $I_a = \text{const}$;
- г) $n = \text{const}$.

13. Чому зовнішня характеристика синхронного генератора при ємнісному навантаженні має зростаючий характер?

- а) внаслідок зниження синхронного індуктивного опору (опорів);
- б) внаслідок компенсації ємністю навантаження індуктивності генератора;
- в) внаслідок накопичення електричного заряду на вводах ємнісного навантаження;
- г) внаслідок намагнічувальної дії реакції якоря.

14. Яка із наведених залежностей відповідає регулювальній характеристиці синхронного генератора?

- а) $U_2 = f(i_f)$ при $I_a = \text{const}$;
- б) $U_2 = f(I_a)$ при $i_f = \text{const}$;
- в) $i_f = f(I_a)$ при $U_2 = \text{const}$;
- г) $i_f = f(I_a)$ при $U_2 = 0$.

15. Який параметр машини характеризує вертикальний катет характеристичного трикутника синхронного генератора?

- а) синхронний індуктивний опір по повздовжній осі;
- б) синхронний індуктивний опір по поперечній осі;
- в) спад напруги на активному опорі кола якоря;
- г) спад напруги на індуктивному опорі розсіювання.

16. Який параметр машини характеризує горизонтальний катет характеристичного трикутника синхронного генератора?

- а) МРС якоря по повздовжній осі;
- б) МРС якоря по поперечній осі;
- в) сумарну МРС реакції якоря по повздовжній і поперечних осях;
- г) результуючу МРС машини, що формує магнітний потік в повітряному зазорі.

17. Як визначається ВКЗ синхронного генератора?

- а) $\text{ВКЗ} = I_k / I_{\text{ном}}$;
- б) $\text{ВКЗ} = I_{\text{ном}} / I_k$;
- в) $\text{ВКЗ} = I_k - I_{\text{ном}} / I_{\text{ном}}$;
- г) $\text{ВКЗ} = I_{\text{ном}} / I_k - I_{\text{ном}}$.

18. Дайте коротку характеристику регулювальної характеристики синхронного генератора з активним навантаженням.

- а) швидкозростаюча;
- б) зростаюча;
- в) повільно спадає;
- г) швидкоспадає.

19. Підведена до вала синхронного генератора механічна потужність $P_1 = 100$ кВт, механічні втрати $\Delta P_{\text{мех}} = 10$ кВт, магнітні втрати $\Delta P_{\text{маг}} = 5$ кВт, додаткові втрати $\Delta P_{\text{дод}} = 1$ кВт, електричні втрати $\Delta P_{\text{елек}} = 15$ кВт. Яка електромагнітна потужність генератора?

- а) $P_{\text{ем}} = 131$ кВт;
- б) $P_{\text{ем}} = 85$ кВт;
- в) $P_{\text{ем}} = 80$ кВт;
- г) $P_{\text{ем}} = 69$ кВт.

20. Номінальна потужність двополюсного турбогенератора складає $\Delta P_1 = 150$ кВт, а електричні втрати при номінальному навантаженні 10 кВт. Який електромагнітний момент генератора?

- а) $M_{\text{ем}} = 509$ Н·м;
- б) $M_{\text{ем}} = 446$ Н·м;
- в) $M_{\text{ем}} = 1019$ Н·м;
- г) $M_{\text{ем}} = 892$ Н·м.

21. Яка причина підвищеного нагрівання ротора синхронного генератора при несиметричному навантаженні?

- а) для струмів прямої послідовності;
- б) для струмів зворотної послідовності;
- в) для струмів нульової послідовності;
- г) збільшенням електромагнітного моменту.

22. Чим досягається ослаблення магнітного потоку струмів зворотної послідовності в синхронних генераторах?

- а) збільшенням струму збудження і основного магнітного потоку;
- б) використанням шихтованих полюсів ротора;
- в) збільшенням повітряного зазору ротора і статора;
- г) використанням демпферної обмотки.

23. В чому виявляється вплив струмів нульової послідовності на режим роботи синхронного генератора, якщо в схемі обмотки якоря є вивід нульової точки?

- а) в підвищеному нагріванні ротора;
- б) в несиметрії лінійної напруги;
- в) в несиметрії фазної напруги;
- г) в збільшеній вібрації машини.

24. В який момент часу раптового к.з. α_k періодична складова струму короткого замикання синхронного генератора має найбільше значення?

- а) $\alpha_k = 0$;
- б) $\alpha_k = \pi / 2$;
- в) $\alpha_k \leq \pi / 2$;
- г) $\alpha_k \geq \pi / 2$.

25. Як впливає індуктивність демпферної обмотки на величину надперехідного індуктивного опору синхронного генератора?

- а) збільшує опір генератора;
- б) зменшує опір генератора;
- в) не впливає на опір генератора.

26. Які з вказаних наслідків характерні для дії струмів к.з. в синхронному генераторі?

- а) пробій ізоляції кола збудження;
- б) перегрів обмоток і обгорання ізоляції обмотки якоря;
- в) деформація лобових частин пошкодження та пробій ізоляції обмотки якоря;
- г) перегрів спинки статора і пошкодження ізоляції листів магнітопроводу.

27. За яким з наведених законів буде змінюватися різниця ЕРС ΔE між синхронним генератором та мережею, при різних частотах напруги мережі і ЕРС генератора (U_m, E_2 – максимальні значення ЕРС та напруги)?

- а) $\Delta E = (U_m - E_2) \cdot \sin(\omega_2 - \omega_m) \cdot t$;
- б) $\Delta E = (U_m + E_2) \cdot \sin(\omega_2 + \omega_m) \cdot t$;
- в) $\Delta E = \sqrt{2} \cdot (U_m - E_2) \cdot \sin(\omega_2 + \omega_m) \cdot t$;

$$\text{г) } \Delta E = \sqrt{2} \cdot (U_M + E_2) \cdot \sin(\omega_2 - \omega_M) \cdot t.$$

28. В який момент подають струм на обмотку збудження синхронного генератора при проведенні самосинхронізації?

а) після розгону ротора до синхронної швидкості, перед подачею напруги на обмотку якоря;

б) після подачі напруги на обмотку якоря, перед розгоном ротора до синхронної швидкості;

в) після розгону ротора до синхронної швидкості, після подачі напруги на обмотку якоря;

г) перед розгоном ротора до синхронної швидкості і перед подачею напруги на обмотку якоря.

29. В якому з нижчевказаних випадків досягнуто синхронізації генератора з мережею, якщо ламповий синхроскоп увімкнений на обертання світла?

а) при повному згасанні ламп;

б) при обертанні світла з однаковою частотою;

в) при повному загоранні двох ламп і згасанні одної;

г) при повному згасанні двох ламп і загоранні однієї.

30. Яким є струм синхронного генератора при його паралельній роботі з мережею відносно $\Delta \bar{U} = \bar{U}_M + \bar{E}_2$, \bar{U}_M – напруга мережі, \bar{E}_2 – ЕРС генератора?

а) активний;

б) індуктивний;

в) ємнісний;

г) залежить від навантаження мережі.

31. Яке значення кута електромагнітного навантаження синхронної машини відповідає стійкому режиму синхронного генератора?

а) $\theta \in [0 \dots \pi/2]$;

б) $\theta \in [\pi/2 \dots \pi]$;

в) $\theta \in [-\pi/2 \dots \pi]$;

г) $\theta \in [-\pi/2 \dots 0]$.

32. Яке значення кута електромагнітного навантаження синхронної машини відповідає стійкому режиму синхронного двигуна?

- а) $\theta \in [0 \dots \pi/2]$;
- б) $\theta \in [\pi/2 \dots \pi]$;
- в) $\theta \in [-\pi/2 \dots \pi]$;
- г) $\theta \in [-\pi/2 \dots 0]$.

33. Трифазний неявнополосний синхронний генератор з номінальною напругою 6 кВ працює паралельно з мережею напругою 4 кВ. Синхронний індуктивний опір складає 1 Ом. Яку максимальну електромагнітну потужність може розвивати така машина?

- а) $P_{max.em} = 24$ МВт;
- б) $P_{max.em} = 36$ МВт;
- в) $P_{max.em} = 144$ МВт;
- г) $P_{max.em} = 9$ МВт.

34. Трифазний неявнополосний синхронний генератор з напругою $U_{ном} = 10$ кВ, працює паралельно з мережею з такою ж напругою $U_{мер} = 10$ кВ. Який електромагнітний момент розвиває машина при $\theta = 30^\circ$, якщо обмотка якоря генератора має $2p = 4$, а синхронний індуктивний опір $X_c = 1$ Ом?

- а) $M_{em} = 477$ кН·м;
- б) $M_{em} = 955$ кН·м;
- в) $M_{em} = 318$ кН·м;
- г) $M_{em} = 159$ кН·м.

35. При якому куті електромагнітного навантаження трифазний турбогенератор потужністю 190 МВт напругою 5,75 кВ та швидкістю обертання 3000 об/хв розвиває максимальну електромагнітну потужність?

- а) $\theta = \pi/6$;
- б) $\theta = \pi/3$;
- в) $\theta = \pi/4$;
- г) $\theta = \pi/2$

36. Електромагнітний момент синхронного генератора складає $M = 10$ кН·м при номінальному куті електромагнітного навантаження $\theta_{ном} = 30^\circ$. Знайдіть статичну перевантаженість машини.

- а) $k_n = 3$;
- б) $k_n = 2$;
- в) $k_n = 1,5$;
- г) $k_n = 2,5$.

37. Вкажіть, який із наведених виразів справедливий для питомого синхронізуючого моменту синхронного турбогенератора?

- а) $M_{синхр} = \frac{m \cdot U \cdot E_0}{\omega_1 \cdot X_c} \cdot \sin \theta$;
- б) $M_{синхр} = \frac{m \cdot U \cdot E_0}{\omega_1 \cdot X_c} \cdot \cos \theta$;
- в) $M_{синхр} = \frac{m \cdot U \cdot E_0}{\omega_1 \cdot X_c} \cdot \sin^2 \theta$;
- г) $M_{синхр} = \frac{m \cdot U \cdot E_0}{\omega_1} \cdot \cos \theta$.

38. З яких частин складається електромагнітний момент явнополюсної синхронної машини?

- а) з основної і реактивної;
- б) з поздовжньої і поперечної;
- в) з електричної і механічної;
- г) з прямої і зворотної.

39. Чому в явнополюсних синхронних машин більша статична перевантажувальна здатність порівняно з неявнополюсними?

- а) внаслідок накладання основної і реактивної складових потужностей;
- б) внаслідок меншої інерційності ротора;
- в) через менші магнітні та механічні втрати;
- г) через менший індуктивний опір по поздовжній осі машина.

40. В якій залежності від кута навантаження θ знаходиться реактивна складова електромагнітного моменту синхронної машини?

- а) $M_{em} \sim \theta$;
- б) $M_{em} \sim 2 \cdot \theta$;
- в) $M_{em} \sim \sin \theta$;
- г) $M_{em} \sim \sin 2 \cdot \theta$.

41. Знайдіть обертальний момент турбіни двополюсного синхронного генератора потужністю $P_n = 100$ кВт при $\eta = 0,9$.

- а) $M_{об} = 90$ кН·м;
- б) $M_{об} = 111$ кН·м;
- в) $M_{об} = 286$ Н·м;
- г) $M_{об} = 353$ Н·м.

42. Трифазний чотириполюсний синхронний генератор має розточку $D = 1,0$ м, знайдіть полюсний поділ статора машини.

- а) $\tau = 0,78$ м;
- б) $\tau = 1,57$ м;
- в) $\tau = 0,25$ м;
- г) $\tau = 0,5$ м.

43. Трифазний синхронний двополюсний генератор працює паралельно з мережею зі струмом $I = 100$ А та $\cos \varphi = 0,8$. Визначте струм статора при $\cos \varphi = 1$.

- а) $I = 125$ А;
- б) $I = 62,5$ А;
- в) $I = 92$ А;
- г) $I = 80$ А.

44. Яку максимальну потужність розвине двополюсний турбогенератор потужністю $P = 90$ кВт, що працює паралельно з мережею напругою $U = 10$ кВ при обриві кола збудження?

- а) $P_{max} = 9$ кВт;
- б) $P_{max} = 4,5$ кВт;
- в) $P_{max} = 45$ кВт;
- г) $P_{max} = 0$ кВт.

45. Знайдіть споживаний струм чотириполюсного синхронного двигуна з $P_{ном} = 50$ кВт та напругою живлення $U_n = 0,6$ кВ, ККД двигуна $\eta = 0,9$.

- а) $I_{\text{дв}} = 92,6 \text{ А}$;
- б) $I_{\text{дв}} = 75 \text{ А}$;
- в) $I_{\text{дв}} = 53,5 \text{ А}$;
- г) $I_{\text{дв}} = 43,3 \text{ А}$.

46. Трифазний явнополюсний синхронний генератор має номінальну напругу $U_{\text{ном}} = 600 \text{ В}$ та номінальний струм $I_{\text{ном}} = 200 \text{ А}$. Знайдіть індуктивний опір машини по поздовжній осі, якщо $\text{ВКЗ} = 1,5$.

- а) $X_d = 1,33 \text{ Ом}$;
- б) $X_d = 4,5 \text{ Ом}$;
- в) $X_d = 2 \text{ Ом}$;
- г) $X_d = 3 \text{ Ом}$.

47. Шестиполосний синхронний двигун $P_{\text{ном}} = 100 \text{ кВт}$ має кратність максимального моменту $k_n = 1,5$. При якому максимальному моменті двигун утримується в синхронізмі, якщо струм збудження зменшити наполовину?

- а) $M_{\text{max } 0,5} = 955,4 \text{ Н}\cdot\text{м}$;
- б) $M_{\text{max } 0,5} = 477,7 \text{ Н}\cdot\text{м}$;
- в) $M_{\text{max } 0,5} = 1434 \text{ Н}\cdot\text{м}$;
- г) $M_{\text{max } 0,5} = 717 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

48. Синхронний генератор працює паралельно з мережею і генерує струм $I = 80 \text{ А}$, що відповідає мінімуму U -подібної характеристики. При перезбудженні струм зріс до $I = 100 \text{ А}$. Яку величину і характер має реактивна складова струму генератора?

- а) $I_P = 20 \text{ А}$, індуктивна;
- б) $I_P = 60 \text{ А}$, індуктивна;
- в) $I_P = 20 \text{ А}$, ємнісна;
- г) $I_P = 60 \text{ А}$, ємнісна.

49. Трифазний синхронний генератор потужністю $P_{\text{ном}} = 50 \text{ кВт}$ працює з мережею при струмі статора $I = 100 \text{ А}$ та $\cos\varphi = 0,8$. Знайдіть струм статора при режимі, коли $\cos\varphi = 1$.

- а) $I = 125 \text{ А}$;
- б) $I = 80 \text{ А}$;

в) $I = 60 \text{ A}$;

г) $I = 75 \text{ A}$.

50. Як проходить U -подібна характеристика $I = f(I_{зб})$ синхронного генератора при його паралельній роботі з мережею, що знята при номінальній потужності, відносно U -подібної характеристики на холостому ході?

а) вище, зміщена вправо;

б) вище, зміщена вліво;

в) нижче, зміщена вправо;

г) нижче, зміщена вліво.

51. Як змінюється струм збудження синхронної машини, що відповідає мінімуму U - подібної характеристики при переході машини від холостого ходу до номінальної потужності?

а) не змінюється;

б) зменшується;

в) збільшується;

г) якщо в режимі генератора – збільшується, а в режимі двигуна зменшується.

52. При вмиканні чотириполюсного синхронного генератора на паралельну роботу з мережею швидкість обертання ротора доведена до 1497 об/хв. Чому рівний період зміни різниці напруги генератора і мережі, якщо $U_{ген} = U_{мер} = 600 \text{ В}$, а частота напруги мережі $f = 50 \text{ Гц}$?

а) 0,1 с;

б) 1 с;

в) 10 с;

г) 0 с.

53. Номінальна фазна напруга синхронного генератора $U_{фн} = 500 \text{ В}$; струм $I_{фн} = 100 \text{ А}$, синхронний індуктивний опір по повздовжній осі складає $X_d = 4 \text{ Ом}$. Яке ВКЗ вказаного генератора?

а) ВКЗ = 0,8;

б) ВКЗ = 1,25;

в) ВКЗ = 2,16;

г) $ВКЗ = 1,38$.

54. Яке із наведених нижче значень кута електромагнітного навантаження θ , відповідає номінальному куту для трифазного неявнополюсного синхронного генератора з відносними значеннями $X_d^* = 1,5$, $E_0^* = 1$?

а) $\theta_{нав} = 1 / 2$ рад;

б) $\theta_{нав} = \pi / 6$ рад;

в) $\theta_{нав} = \pi / 3$ рад;

г) $\theta_{нав} = 2$ рад.

55. З яким ковзанням працює синхронний двигун з номінальним навантаженням відносно обертового магнітного поля якоря?

а) $s = 0$;

б) $s = 1$;

в) $s = s_{ном}$;

г) $s = 1 - s_{ном}$.

56. Знайдіть номінальний момент чотирьопольового синхронного двигуна, якщо номінальна потужність $P_{ном} = 150$ кВт, а ККД $\eta_{ном} = 0,9$.

а) $M_n = 859,9$ Н·м;

б) $M_n = 955$ Н·м;

в) $M_n = 1061$ Н·м;

г) $M_n = 477$ Н·м.

57. Яке із наведених нижче рівнянь відповідає двигунному режиму роботи явнополюсного синхронного генератора?

а) $\vec{U} = \vec{E}_0 - jI_x c - jI_q \cdot X_{aq} - jI_d X_{ad}$;

б) $\vec{U} = -\vec{E}_0 + jI_x c$;

в) $\vec{U} = -\vec{E}_0 + jI_q \cdot X_q + jI_d X_d$;

г) $\vec{U} = \vec{E}_0 - jI_q \cdot X_q - jI_d X_d$.

58. При яких умовах можлива робота синхронного двигуна з $\cos\phi > 1$?

а) при недозбудженні;

б) при перезбудженні;

в) на холостому ході;

г) така робота неможлива.

59. Яка із вказаних потужностей вважається номінальною для синхронного двигуна?

- а) електромагнітна;
- б) корисна;
- в) повна механічна;
- г) споживана.

60. Яка із вказаних потужностей вважається номінальною для синхронного турбогенератора?

- а) корисна електрична;
- б) споживана механічна;
- в) механічна без врахування втрат на збудження;
- г) електромагнітна.

61. В який момент подається напруга на обмотку якоря синхронного двигуна при його пускові за допомогою розгінного двигуна?

- а) в першу чергу, перед розгоном ротора і подачею збудження;
- б) після розгону ротора і подачею збудження;
- в) в останню чергу, після подачі збудження, перед розгоном ротора;
- г) після розгону ротора, перед подачею збудження.

62. Яке явище виникає при синхронному пуску синхронного двигуна без пускової обмотки?

- а) пульсуюче магнітне поле;
- б) реакція якоря;
- в) одноосьовий ефект;
- г) коротке замикання.

63. Якими наслідками з вказаних нижче супроводжується одноосьовий ефект в синхронних двигунах?

- а) реверсуваням (зміною напрямку обертання) ротора;
- б) зупинкою із значним виділенням енергії в роторі;
- в) виникненням поштовхів на валу ротора;
- г) застряганням на половині синхронної швидкості обертання при розгоні.

64. Який із способів пуску найбільш сприятливий для синхронних двигунів?

- а) асинхронний;
- б) частотний;
- в) прямий;
- г) пуск за допомогою розгінного двигуна.

65. Який опір в синхронного двигуна найбільший?

- а) індуктивний опір розсіювання;
- б) активний опір якоря;
- в) індуктивний опір реакції якоря по поздовжній осі;
- г) індуктивний опір реакції якоря по поперечній осі.

66. Знайдіть фазний струм в обмотці якоря синхронного двигуна при номінальному навантаженні $P_{ном} = 10$ кВт, якщо ККД $\eta_{дов} = 0,9$, напруга $U_{ном} = 0,4$ кВ, $\cos\varphi_{ном} = 1$. Обмотка з'єднана в зірку.

- а) $I_{н.ф.} = 22,5$ А;
- б) $I_{н.ф.} = 27,8$ А;
- в) $I_{н.ф.} = 16,04$ А;
- г) $I_{н.ф.} = 12,99$ А.

67. Споживана потужність чотирьополісного синхронного двигуна складає $P_1 = 12$ кВт, електричні втрати $\Delta P_{ел} = 700$ Вт, а магнітні втрати $\Delta P_{маг} = 400$ Вт. Знайдіть електромагнітний момент двигуна.

- а) $M_{ем} = 41,7$ Н·м;
- б) $M_{ем} = 83,4$ Н·м;
- в) $M_{ем} = 34,7$ Н·м;
- г) $M_{ем} = 69,4$ Н·м.

68. Знайдіть, який максимальний момент може розвивати чотирьополісний синхронний двигун при перенавантаженні, якщо в номінальному режимі $P_{ном} = 10$ кВт, $\theta_{ном} = 30^\circ$.

- а) $M_{max} = 63,7$ Н·м;
- б) $M_{max} = 31,8$ Н·м;
- в) $M_{max} = 127,4$ Н·м;
- г) $M_{max} = 15,9$ Н·м.

69. Синхронний шестиполюсний двигун потужністю $P_1 = 50$ кВт, приводить в рух дробарку і працює з номінальним навантаженням та кутом електромагнітного навантаження $\theta_{ном} = 30^\circ$. В дробарку була завантажена неоднорідна гірська порода, що створила момент навантаження $M_{нав} = 900$ Н·м, що відбудеться з двигуном?

- а) двигун буде обертатись зі синхронною швидкістю, але зросте струм якоря;
- б) двигун випаде із синхронізму;
- в) двигун буде обертатись зі синхронною швидкістю, але струм якоря зменшиться;
- г) швидкість обертання двигуна зменшиться, а струм якоря не зміниться.

70. Яку природу мають додаткові втрати потужності в синхронних двигунах?

- а) електричну;
- б) магнітну;
- в) механічну;
- г) теплову.

71. Синхронний двигун приводить в рух екскаватор. Як зміниться $\cos\varphi$ двигуна при незмінному струмові збудження, якщо до ковша потрапила порода збільшеної щільності порівняно з розрахунковою?

- а) $\cos\varphi$ не зміниться;
- б) $\cos\varphi$ збільшиться;
- в) $\cos\varphi$ зменшиться в сторону індуктивності;
- г) $\cos\varphi$ зменшиться в сторону ємності.

72. Трифазний чотириполюсний синхронний двигун приводить в рух компресор газоперекачувальної станції. Компресор створює момент навантаження $M_{нав} = 200$ Н·м. Двигун має напругу живлення $U_{ном} = 0,4$ кВ, індуктивні опори по поздовжній і поперечній осі $X_d = 5$ Ом; $X_q = 2$ Ом. Що відбудеться з двигуном при обриві кола збудження?

- а) двигун і компресор зупиняться;

б) двигун і компресор продовжать працювати зі зменшеною швидкістю;

в) двигун і компресор продовжать працювати з незмінною швидкістю;

г) двигун різко збільшить швидкість обертання і піде «в розгін».

73. Якою електричною машиною є конструктивно синхронний компенсатор?

а) синхронним двигуном;

б) синхронним генератором;

в) синхронним реактивним двигуном;

г) синхронним гістерезисним двигуном.

74. Яка із складових струму якоря синхронного генератора створює гальмівний момент для наведеного двигуна?

а) повздовжня намагнічувальна;

б) повздовжня розмагнічувальна;

в) поперечна;

г) усі вищеназвані.

75. При якому куті електромагнітного навантаження синхронний двигун розвиває максимальний обертовий момент?

а) $\theta = 30^\circ$;

б) $\theta = 45^\circ$;

в) $\theta = 60^\circ$;

г) $\theta = 90^\circ$.

76. З якого матеріалу виготовляється пускова обмотка реактивного синхронного двигуна?

а) з міді;

б) з алюмінію;

в) з феромагнітного матеріалу;

г) з високоомного сплаву

77. В чому полягає перевага синхронних гістерезисних двигунів перед синхронними реактивними двигунами?

а) простіша конструкція;

- б) більший ККД;
- в) більший пусковий момент;
- г) більший коефіцієнт потужності $\cos\varphi$.

78. Чи може синхронний реактивний двигун працювати в генераторному режимі?

- а) може;
- б) може, але такий режим пов'язаний зі значними втратами в роторі;
- в) не може.

79. Вкажіть спосіб усунення одноосьового ефекту при асинхронному пуску синхронного двигуна, що не має пускової обмотки.

- а) вмикання реакторів послідовно з обмоткою якоря на час пуску;
- б) проведення пуску з перемикуванням Y/Δ ;
- в) вмикання резистора в коло обмотки збудження на час пуску;
- г) закорочення обмотки збудження на час пуску.

80. Знайдіть фазний струм якоря синхронного двигуна в режимі холостого ходу, якщо механічні втрати $\Delta P_{\text{мех}} = 400$ Вт, магнітні втрати $\Delta P_{\text{маг}} = 500$ Вт, додаткові втрати $\Delta P_{\text{доп}} = 200$ Вт, а напруга $U_{\text{ном}} = 600$ В. Двигун працює з $\cos\varphi = 0,8$ індуктивного характеру.

- а) $I_{a.0} = 1,83$ А;
- б) $I_{a.0} = 1,058$ А;
- в) $I_{a.0} = 0,611$ А;
- г) $I_{a.0} = 3,17$ А.

81. Визначте крок чотирьополюсного синхронного двигуна з трьома обмотками управління та окремим способом їх включення.

- а) $\alpha_k = 30^\circ$;
- б) $\alpha_k = 15^\circ$;
- в) $\alpha_k = 60^\circ$;
- г) $\alpha_k = 45^\circ$.

82. Яким способом можна збільшити швидкість синхронного крокового двигуна?

- а) вмиканням обмотки управління проводом великого перерізу;
- б) збільшенням кількості витків і МРС обмотки управління;

в) введенням в коло обмотки управління додаткового опору;
г) збільшенням амплітуди імпульсів, що попадають на обмотку управління.

83. Як зміниться швидкість обертання та момент синхронного двигуна при відхиленні частоти напруги живлення від 50 до 45 Гц?

- а) швидкість не зміниться (двигун синхронний);
- б) швидкість зміниться пропорційно зменшенню частоти, момент зросте;
- в) швидкість не зміниться, момент зменшиться;
- г) швидкість зменшиться разом з моментом.

84. Знайдіть номінальний кут електромагнітного навантаження синхронного двигуна, якщо його статична перенавантажувальність $k_n = 2$.

- а) $\theta_{ном} = 15^\circ$;
- б) $\theta_{ном} = 45^\circ$;
- в) $\theta_{ном} = 30^\circ$;
- г) $\theta_{ном} = 60^\circ$.

85. Синхронний генератор працює паралельно з мережею і генерує струм $I = 40$ А, що відповідає мінімуму U -подібної характеристики. При перезбудженні струм зріс до $I = 100$ А. Яку величину і характер має реактивна складова струму генератора?

- а) $I_P = 20$ А, індуктивний;
- б) $I_P = 91$ А, індуктивний;
- в) $I_P = 20$ А, ємнісний;
- г) $I_P = 91$ А, ємнісний.

Література

1. Concordia Charles. Synchronous Machines: Theory and Performance / Ch. Concordia. – Wiley, 1951 – 224 p.
2. Вольдек А. И. Электрические машины: учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений / Вольдек А. И. – 3-е изд., перераб. – М. : Энергия, 1978. – 832 с.
3. Walker J. H. Large synchronous machines: design, manufacture, and operation / Jack Holmes Walker. – Clarendon Press, 1981 – 258 p.
4. Gordon R. Slemon. Electric machines / Gordon R. Slemon, A. Straughen. – Addison-Wesley Pub. Co., 1980. – 575 p. – ISBN 0201077329.
5. Копылов И. П. Электрические машины. 6-е изд. / Копылов И. П. – М. : Высшая школа, 2009. – 608 с. – ISBN 978-5-06-006124-6.
6. Charles A. Gross. Electric machines / Charles A. Gross. – Taylor & Francis, 2006. – 450 p. – ISBN 0-8493-8581-4.
7. Bakshi U. A. Synchronous Machines / U. A. Bakshi, M. V. Bakshi. – Technical publications pune, 2009 – 308 p. – ISBN 9788184315578.
8. Токарев Б. Ф. Электрические машины: Учеб. пособие для вузов / Токарев Б. Ф. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 624 с. – ISBN 5-283-00595-X.
9. Осин И. Л. Электрические машины: Синхронные машины / И. Л. Осин, Ю. Г. Шакарян. Под ред. И. П. Копылова. – М. : Высшая школа, 1990 – 304 с. – ISBN 5-06-000737-5.
10. Яцун М. А. Електричні машини: навч. посібник / Яцун М. А. – 2-е вид., стереот. – Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2004. – 440 с. – ISBN 966-553-403-3.
11. Гольдберг О. Д. Электромеханика. Учеб. для вузов / О. Д. Гольдберг, С. П. Хелемская. – М. : Академия, 2007. – 512 с. – ISBN: 978-5-7695-2886-6.
12. Загірняк М. В. Електричні машини. 2-ге вид. / М. В. Загірняк, Б. І. Невзлін. – К. : Знання, 2009. – 399 с. – ISBN: 9789663466446
13. Плахтина О. Г. Частотно-керовані асинхронні та синхронні електроприводи : навч. посіб. для студ. електромехан. спец. вищ. навч.

- закл. / Плахтина О. Г., Мазепа С. С., Куцик А. С. – Львів : Львівська політехніка, 2002. – 227 с. – ISBN 966-553-260-X.
14. Электрические машины. Электронный учебник. – каф. Электромеханики МЭИ. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://elmech.mpei.ac.ru/em/EM/EM_cont_0.htm.
 15. Гольдберг О. Д. Испытания электрических машин. Учеб. для вузов по спец. "Электромеханика" / Гольдберг О. Д. – М. : Высш. шк., 1990. – 255 с.
 16. Грабко В. В. Експериментальні дослідження електричних машин. Частина II. Спеціальні електричні машини [Навчальний посібник] / Грабко В. В., Розводюк М. П., Казак М. О. – Вінниця : ВНТУ, 2006. – 155 с.
 17. Методические указания к лабораторно-практическим заданиям по курсу "Электрические машины" для студентов специальностей 10.01, 10.02, 10.03 всех форм обучения. Ч.III. Синхронные машины / Сост. И. Ф. Павлов, С. А. Безверхий, В. И. Нагул, В. П. Головин. – Винница : ВПИ, 1990. – 44 с.

Навчальне видання

**Грабко Володимир Віталійович
Розводюк Михайло Петрович
Левицький Сергій Михайлович
Грабенко Ігор Васильович**

**Експериментальні дослідження електричних машин
Частина V. Синхронні машини
Навчальний посібник**

Редактор В. Дружиніна
Коректор З. Поліщук

Оригінал-макет підготовлено М. Розводюком

Підписано до друку 14.10.2014 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. друк. арк. 8,7.
Наклад 75 прим. Зам. № 2014-080.

Вінницький національний технічний університет,
навчально-методичний відділ ВНТУ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, к. 2201.
Тел. (0432) 59-87-36.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК №3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-87-38.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК №3516 від 01.07.2009 р.