

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій
Кафедра електричної інженерії

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

 (підпис) О. КОЛЛАРОВ
 «___» _____ (ініціали, прізвище) 2022 р.

Кваліфікаційна робота бакалавра

на тему Аналіз основних характеристик синхронного турбогенератора для дослідження його режиму роботи в енергосистемі

Виконав: студент 4 курсу, групи ЕЛКзп-19

(шифр групи)

спеціальності підготовки

141 «Електроенергетика, електротехніка та

(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

електромеханіка»

Андрій БУРЯК

(ім'я та прізвище)

(підпис)

Керівник

ст. викл. каф., Е. НЄМЦЕВ

(посада, науковий ступінь, вчене звання, ініціали, прізвище)

(підпис)

Рецензент

(посада, науковий ступінь, вчене звання, ініціали, прізвище)

(підпис)

Нормоконтроль:

Засвідчую, що у цій випускній кваліфікаційній роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

О. ЛЮБИМЕНКО

Студент

(підпис)

(підпис)

(дата)

(дата)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій

Кафедра електричної інженерії

Освітній ступінь: бакалавр

Спеціальність: (141) електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ (О. КОЛЛАРОВ)

« » _____ 2022 р.

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Андрію БУРЯКУ

(ім'я та прізвище)

1. Тема роботи: Аналіз основних характеристик синхронного турбогенератора для дослідження його режиму роботи в енергосистемі

керівник роботи Едуард НЄМЦЕВ, ст. викл. каф.
 (ім'я та прізвище, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від _____ №

2. Строк подання студентом роботи 02 червня 2022 року

3. Вихідні дані до роботи: Тип синхронного турбогенератора Т-6-2УЗ; синхронна частота обертання ротора $n_{\text{ном}}=3000$ об/хв; повна потужність $S_{\text{ном}}=7,5$ МВА; активна потужність $P_{\text{ном}}=6$ МВт; лінійна напруга обмотки статора $U_{\text{ном}}=6,3$ кВ; коефіцієнт потужності $\cos\varphi_{\text{ном}}=0,8$; струм обмотки статора $I_{\text{ном}}=0,68$ кА; синхронний індуктивний опір у відносних одиницях $x_d^*=1,651$ в.о. коефіцієнт корисної дії $\eta_{\text{ном}}=0,976$. Відсутні параметри обрати із врахуванням вже наданих або вибрати довільно, дотримуючись обмежень, накладених вихідними даними.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналіз конструкції генераторів (турбогенераторів).

2. Основні рівняння і характеристики синхронних генераторів.

3. Розрахунок параметрів синхронного турбогенератора.

4. Розробка заходів з охорони праці.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, якщо передбачається)

Десять слайдів презентаційного матеріалу.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Ініціали, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділи 1 – 3	Е. НЄМЦЕВ		
Розділ 4	О. КОЛЛАРОВ		

7. Дата видачі завдання 05 травня 2022 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розділ 1	05.05.22 – 12.05.22	
2.	Розділ 2	13.05.22 – 23.05.22	
3.	Розділ 3	24.05.22 – 31.05.22	
4.	Розділ 4	01.06.22 – 06.06.22	

Студент _____
(підпис)

Андрій БУРЯК _____
(ім'я та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Едуард НЄМЦЕВ _____
(ім'я та прізвище)

АНОТАЦІЯ

БУРЯК А.М. Аналіз основних характеристик синхронного турбогенератора для дослідження його режиму роботи в енергосистемі / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «бакалавр» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – ДВНЗ ДонНТУ, Луцьк, 2022.

У науковій роботі, а саме в дипломному проекті, проаналізовано загальні відомості та основні характеристики синхронних машин. Велику увагу приділено синхронному турбогенератору, принципу дії та конструкції агрегату машини. Обґрунтовано систему роботи синхронного турбогенератора та наведено його технічні та механічні характеристики у вигляді схем та діаграм, які показують техніко-фізичні властивості.

Наведено основні рівняння для визначення характеристик та параметрів синхронних генераторів (турбогенераторів). Розглянуто відмінність явноплюсної синхронної машини та неявнополюсної, що показано на прикладі графіків та схем. Проаналізовано синхронізуючу здатність таких машин, що мають не тільки синхронні генератори, а й синхронні двигуни.

Проведено розрахунок синхронного турбогенератора Т–6–2У3 та накреслено сімейство векторних діаграм при різних струмах збудження та постійному моменті на валу, а також, U-подібну характеристику.

Ключові слова: турбогенератор, синхронізм, магнітне поле, полюси, ротор, статор, демпферна обмотка, кут крутного моменту.

Список публікацій:

SUMMARY

BURYAK A.N. Analysis of the main characteristics of a synchronous turbogenerator to study its mode of operation in the power system / Final qualification work for the degree of «bachelor» in the specialty 141 «Electric power, electrical engineering and electromechanics».– State Higher Educational Institution Donetsk National Technical University, Luts'k, 2022.

In the scientific work, namely in the diploma project, the general information and the main characteristics of synchronous machines are analyzed. Much attention is paid to the synchronous turbogenerator, the principle of operation and design of the machine unit. The system of operation of the synchronous turbogenerator is substantiated and its technical and mechanical characteristics are given in the form of schemes and diagrams showing technical and physical properties.

The basic equations for determining the characteristics and parameters of synchronous generators (turbogenerators) are given. The difference between explicitly synchronous machine and implicitly polar is considered, which is shown on the example of graphs and schemes. The synchronizing ability of such machines with not only synchronous generators but also synchronous motors is analyzed.

The calculation of the synchronous turbogenerator T–6–2U3 is performed and a family of vector diagrams at different excitation currents and constant moment on the shaft is drawn, as well as the U-shaped characteristic.

Keywords: turbogenerator, synchronism, magnetic field, poles, rotor, stator, damping winding, torque angle.

List of publications:

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЇ СИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ (ТУРБОГЕНЕРАТОРІВ).....	9
1.1 Принцип дії та конструкція синхронного генератора.....	9
1.2 Аналіз роботи синхронного турбогенератора	18
2. ОСНОВНІ РІВНЯННЯ І ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ	27
2.1 Загальні параметри синхронних генераторів (турбогенераторів)	27
3. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ СИНХРОННОГО ТУРБОГЕНЕРАТОРА	39
ВИСНОВКИ	51
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	52
ДОДАТОК А. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЕКСПЛУАТАЦІЇ	53
ДОДАТОК Б. НЕЯВНОПОЛЮСНА СИНХРОННА МАШИНА (ТУРБОГЕНЕРАТОР) З НЕПРЯМИМ ПОВІТРЯНИМ ОХОЛОДЖЕННЯМ.....	61
ДОДАТОК В. ПЕРЕЛІК ЗАУВАЖЕНЬ НОРМОКОНТРАЛЕРА	62

ВСТУП

Синхронна машина (СМ) – це така електрична машина змінного струму, в якій частота обертання ротора дорівнює частоті обертання магнітного поля статора й точно відповідає частоті струму в мережі, до якої приєднана її обмотка статора. Тобто в усталеному режимі роботи відношення частоти обертання ротора до частоти змінного струму в електричній мережі не залежить від навантаження у його допустимих межах.

Джерелом електричної енергії на теплових, атомних та гідравлічних електростанціях, а також на пересувних електростанціях та транспортних установках (тепловозах, літаках, теплоходах та ін.) є, головним чином, синхронні генератори, на долю яких припадає понад 95 % виробництва електричної енергії, яка виробляється в світі. Прагнення до збереження навколишнього середовища та загострення екологічних проблем призвело до того, що у світі все інтенсивніше розвивається електроенергетика, яка використовує нетрадиційні джерела енергії: вітер, сонце, океанські припливи та хвилі та інше. Перетворення енергії цих джерел на електричну енергію здійснюється, також синхронними генераторами. Загалом, синхронні генератори виконуються як на відносно малі (1 кВт і менше), так і на великі потужності – до тисячі МВт.

Синхронні машини широко використовуються і в якості синхронних двигунів, які призводять до руху різноманітні насоси, вентилятори, компресори та інші пристрої, які повинні мати сталу частоту обертання. Технічно і економічно обґрунтована нижня межа номінальних потужностей синхронних двигунів складає 500...600 кВт. Хоча, в принципі, діапазон можливих потужностей синхронних двигунів дуже широкий: від 1 кВт і менше, а зверху практично обмежений через обмежені вимоги механізмів та пристроїв, що наводяться до руху.

В енергетиці часто використовується здатність синхронних машин регулювати реактивну потужність або коефіцієнт потужності мережі. У цьому

У разі СМ стають синхронними компенсаторами, які встановлені на підстанціях електричних мереж поблизу потужних споживачів – міст, підприємств тощо.

У ході виконання дипломної роботи було запропоновано вирішення наступних завдань:

1) розглянути принцип дії та конструкцію синхронного генератора, а також концепцію роботи синхронного турбогенератора;

2) проаналізувати основні рівня та характеристики синхронних машин, окрему увагу приділити теоретичним та методичним даним щодо побудови векторних діаграм;

3) провести загальний розрахунок параметрів синхронного турбогенератора Т-6-2У3 та побудувати на підставі векторних діаграм у відносних одиницях U-подібну характеристику синхронного турбогенератора

Дипломна робота: 62 сторінки, 23 рисунка, 2 таблиці, 3 додатки, 8 джерел.

1 АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЇ СИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ (ТУРБОГЕНЕРАТОРІВ)

1.1 Принцип дії та конструкція синхронного генератора

Синхронний електричний генератор (також званий *генератором змінного струму*) належить до сімейства електричних обертових машин. Іншими членами сімейства є двигун або генератор постійного струму, асинхронний двигун або генератор, а також ряд похідних від усіх цих трьох. Спільним для всіх членів цієї сім'ї є те, що основним фізичним процесом, який бере участь у їх роботі, є перетворення електромагнітної енергії в механічну, і навпаки. Тому, щоб зрозуміти фізичні принципи роботи електричних обертових машин, необхідно зрозуміти деякі зачатки електротехніки та машинобудування.

На цьому етапі були представлені зачатки електромагнетизму разом із чотирма основними законами фізики, що описують притаманні фізичні процеси, що співіснують у будь-якій електричній машині. Тому саме час представити базову конфігурацію синхронної машини, яка, як уже згадувалося раніше, є типом електричної машини, до якої належать усі великі турбогенератори.

Комерційне народження генератора (синхронного генератора) можна віднести до 24 серпня 1891 р. У цей день була проведена перша масштабна демонстрація передачі електроенергії змінного струму. Передача поширювалася від Лауффена, Німеччина, до Франкфурта, приблизно за 110 миль. Демонстрація була проведена під час міжнародної електротехнічної виставки у Франкфурті. Ця демонстрація була настільки переконливою щодо доцільності передачі енергії змінного струму на великі відстані, що місто Франкфурт прийняло її для своєї першої електростанції, введеної в експлуатацію в 1894 році (рис.1.1).

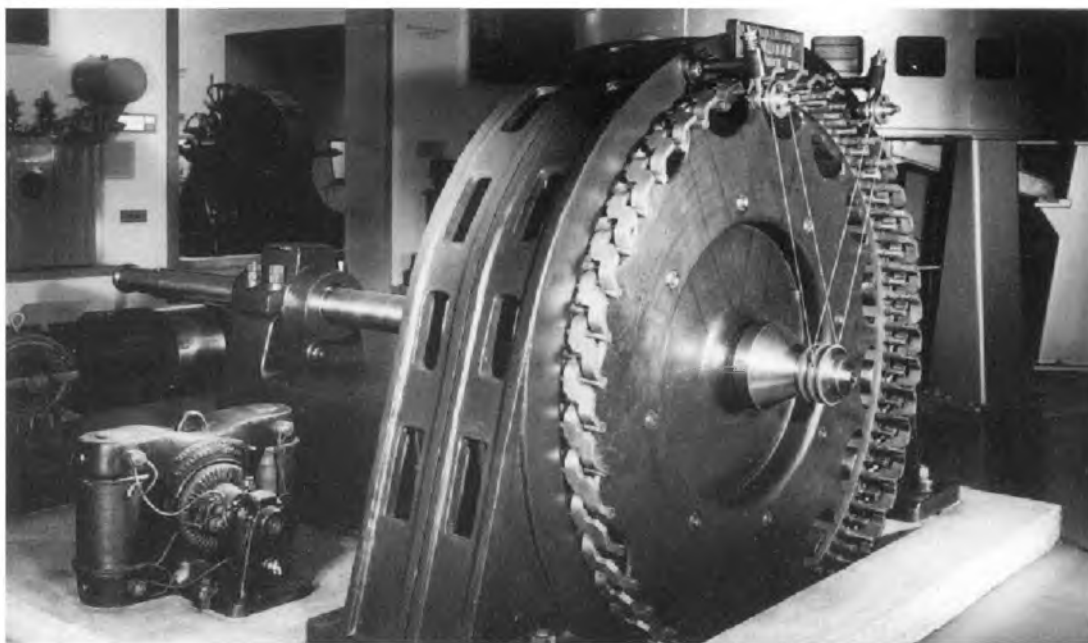


Рисунок 1.1 – Гідроелектрогенератор від Лауффена, який зараз знаходиться в Німецькому музеї, Мюнхен.

Демонстрація в Лауффен-Франкфурті — і, як наслідок, рішення міста Франкфурта використовувати змінну подачу електроенергії — зіграли важливу роль у прийнятті нью-йоркської електростанції Ніагарський водоспад тієї ж технології. Електростанція Ніагарський водоспад почала працювати в 1895 році. З усіх практичних цілей велика дуель постійного і змінного струму була закінчена. У книзі історії Південної Каліфорнії Edison повідомляється, що її гідроелектростанція Мілл-Крік є найстарішою діючою багатофазною (трифазною) станцією в Сполучених Штатах. Розташований в окрузі Сан-Бернардіно, штат Каліфорнія, його перші блоки почали працювати 7 вересня 1893 року, що майже на два роки випередило проект Ніагарського водоспаду. Один з тих попередніх одиниць досі зберігся та виставлений на заводі.

Цікаво відзначити, що, хоча колосальний розвиток машин, ізоляційних компонентів і процедур проектування відбулося вже понад сто років, основні складові машини залишилися практично незмінними.

Концепція про те, що синхронний генератор може використовуватися як двигун, наслідувала його приклад. Хоча асинхронний двигун Tesla замінив синхронний двигун як вибір для переважної більшості застосувань

електродвигунів, синхронні генератори залишалися універсальними машинами для виробництва електроенергії. Сьогодні світ поділений між країнами, які виробляють електроенергію на 50 Гц, та іншими (наприклад, Сполучені Штати) з частотою 60 Гц. Додаткові частоти (наприклад, 25 Гц) все ще можна знайти в деяких місцях, але вони становлять рідкісний виняток.

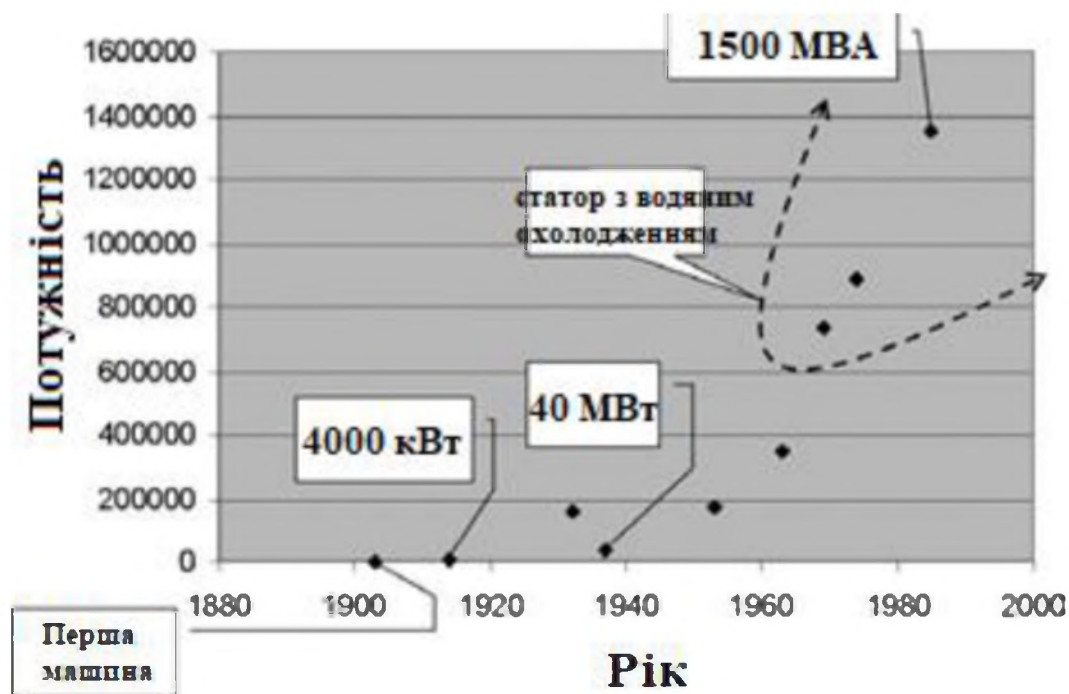


Рисунок 1.2 – Графік «зростання», що відображає загальне збільшення розмірів турбогенераторів за останнє століття.

Синхронні генератори з роками безперервно збільшувалися в розмірах (рис. 1.2). Обґрунтування ґрунтується на простій економії від масштабу: випуску рейтинг машини на одиницю ваги збільшується зі збільшенням розміру агрегату. Таким чином, нерідко можна побачити машини з потужністю до 1500 МВА, причому найбільша зазвичай використовується на атомних електростанціях. Цікаво, що поточний перехід від великих парових турбін як основних двигунів до більш ефективних газових турбін призводить до зворотної тенденції до все більших і більших генераторів, принаймні на даний момент. Стабільність системи передачі також обмежує номінальну потужність одного генератора.

Синхронні машини бувають усіх розмірів і форм, від мініатюрного синхронного двигуна з постійними магнітами в настінних годинниках до найбільших парових турбінних генераторів потужністю приблизно до 1500 МВА. Синхронні машини бувають одного з двох типів: нерухоме поле або обертове магнітне поле постійного струму.

Стаціонарна польова синхронна машина має виступаючі полюси, встановлені на статорі — нерухомому елементі. Полюси намагнічуються або постійними магнітами, або постійним струмом. Якорь, як правило, містить трифазну обмотку, встановлений на валу. Обмотка якоря подається через три пружини (колектори) і набір ковзаючих по них щіток. Таке розташування можна знайти в машинах потужністю приблизно до 5 кВА. Для більших машин — усіх, які розглянуті в цій книзі — типове пристрій, що використовується, — це обертове магнітне поле.

Синхронна машина з обертовим магнітним полем (також відома як обертове поле) має обмотку поля на обертовому елементі (*ротор*) і *якір*, намотаний на нерухомий елемент (*статор*). Постійний струм, створюючи магнітне поле, яке має обертатися з синхронною швидкістю, активує обертову обмотку поля. Напругу на обертову обмотку збудження можна отримати через набір контактних кілець і щіток (зовнішнє збудження) або від діодного моста, встановленого на роторі (самозбудження). Випрямляч-міст живиться від встановленого на валу генератора змінного струму, який сам збуджується пілотним збудником. У полях із зовнішнім живленням джерелом може бути генератор постійного струму з приводом від вала, генератор постійного струму з окремим збудженням або твердотільний випрямляч. Існує кілька варіацій цих домовленостей.

Осердя статора виготовлено з ізольованих сталевих пластин. Товщина — пластин і тип сталі вибираються для мінімізації втрат на вихровий струм і гістерезис, зберігаючи при цьому необхідну ефективну довжину серцевини та мінімізуючи витрати. Сердечник кріпиться безпосередньо на раму або (у великих

двополюсних машинах) за допомогою пружин. Сердечник є щілинним (звичайно відкритими гніздами), а котушки, що утворюють обмотку, розміщені в гніздах. Є кілька типів обмоток якоря, наприклад, концентричні обмотки кількох типів, колінчасті котушки, різні обмотки різних типів, хвильові обмотки та обмотки різних типів. Сучасні великі машини зазвичай намотуються двошаровими обмотками внахлест.

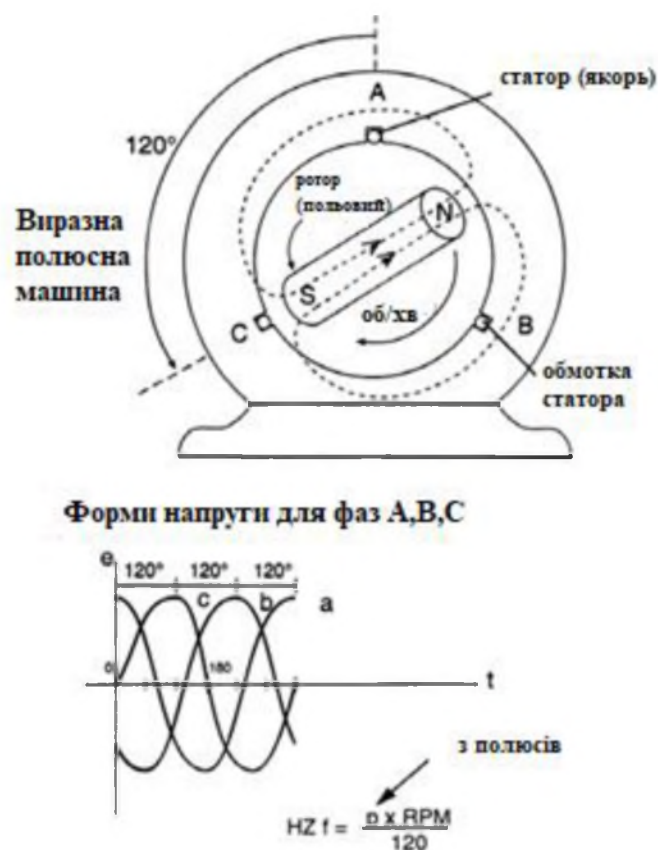


Рисунок 1.3 – Конструкція синхронної машини.

Схематичний переріз синхронної машини з виступом полюса. У великому генераторі ротор намагнічується котушкою, обмотаною навколо нього. На рис. 1.3 зображений двополюсний ротор. Ротори з виступаючими полюсами зазвичай мають набагато більше двох полюсів. Коли вони розроблені як генератор, великі машини з виступаючими полюсами приводяться в рух водяними турбінами. Нижня частина рис. 1.3 показує трифазні напруги, отримані на клеммах генератора, а рівняння пов'язує швидкість машини, її кількість полюсів і частоту результуючого напруги.

Поле ротора має виступаючі полюси (рис. 1.3), або невиразні полюси, також відомі як круглий ротор або циліндричний ротор (рис. 1.4). Невиразні полюсні (циліндричні) ротори використовуються в дво- або чотирьополісних машинах і дуже рідко в шестиполісних машинах. Зазвичай вони приводяться в дію паровими турбінами або турбінами внутрішнього згоряння. Переважна більшість машин із виступаючими полюсами мають шість або більше полюсів. Вони включають всі синхронні гідрогенератори, майже кожен синхронний конденсатор і переважну більшість синхронних двигунів.

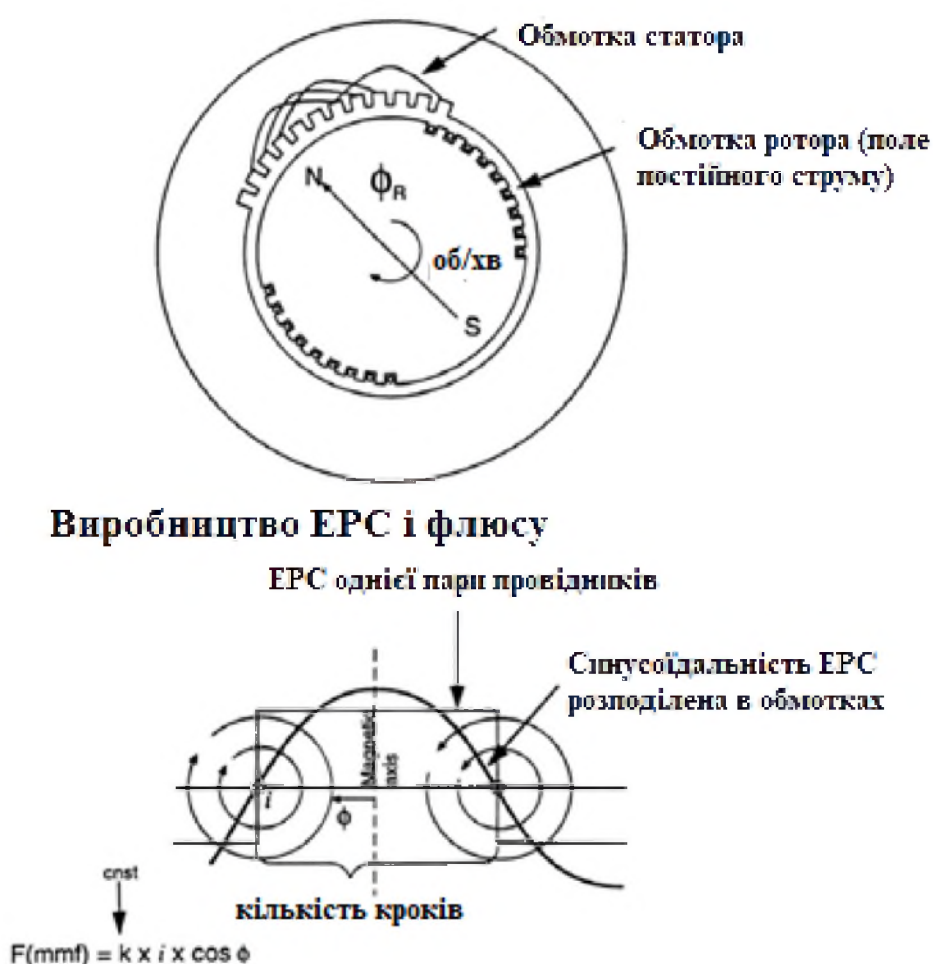


Рисунок 1.4 – Схематичний переріз синхронної машини з циліндричним кругло-ротором (турбогенератором).

Це типова конструкція для всіх великих турбогенераторів (рис.1.4). Тут як обмотки статора, так і ротора встановлені в пазах, розподілених по периферії машини. Нижня частина показує результуючу форму хвилі пари провідників і

розподіленої обмотки. Формула, що дає магніторушійну силу, створену обмотками.

Ротори з невиразними полюсами, як правило, виробляються з міцної сталеві поковки. Обмотка розміщується в пазах, вироблених на корпусі ротора, і утримується проти великих відцентрових сил металевими клинами, зазвичай виготовленими з алюмінію або сталі. Стопорні *кільця* стримують кінцеву частину обмоток (кінцеві обмотки). У великих машинах стопорні кільця виготовляються зі сталі.

Великі ротори з виступаючими полюсами виготовлені з ламінованих полюсів, які утримують обмотку під головкою полюса. Стовпи кріпляться шпонкою на вал або павук і колесо.

Верстати з виступаючими полюсами мають додаткову обмотку в обертовому елементі. Ця обмотка, виготовлена з мідних брусків, закорочених на обох кінцях, вмонтована в головку стовпа, близько до торця стовпа. Призначення цієї обмотки — запустити двигун або конденсатор від власної потужності як асинхронний двигун і вивести його розвантаженим до майже синхронної швидкості, коли ротор «втягується» синхронним моментом. Обмотка також служить для гасіння коливань ротора навколо синхронної швидкості, тому її називають *демпферною обмоткою* (також відома як *амортизатори* або *демпферні обмотки*).

У турбогенераторах обмотка, що створює магнітне поле, складається з кількох одноланцюгових котушок, які живляться постійним струмом, що подається через вал від колекторних кілець, що сидять на валу, і розташованих поза основними підшипниками генератора. У генераторах з *самозбудженням* збудник і випрямляч (діоди) на валу створюють необхідний струм поля. Збудник, встановлений на валу, сам збуджується від нерухомої обмотки. Той факт, що на відміну від статора, поле ротора живиться від ланцюга відносно малої потужності та низької напруги, був головною причиною, чому ці машини мають поле, встановлене на обертовому елементі, а не навпаки. Переміщення високих струмів і високої потужності через колекторні кільця і щітки (з обертовим

якорем) становило б серйозну технічну проблему, що зробило б машину набагато складнішою і дорогою.

Старі генератори мають напругу 125 вольт постійного струму. Пізніші мають напругу 250 вольт і вище. Напруга збудження 500 вольт або вище поширена в нових машинах.

Величина напруги, індукованої в обмотці статора, як показано вище, залежить від напруженості магнітного поля, швидкості обертання ротора та кількості витків в обмотці статора.

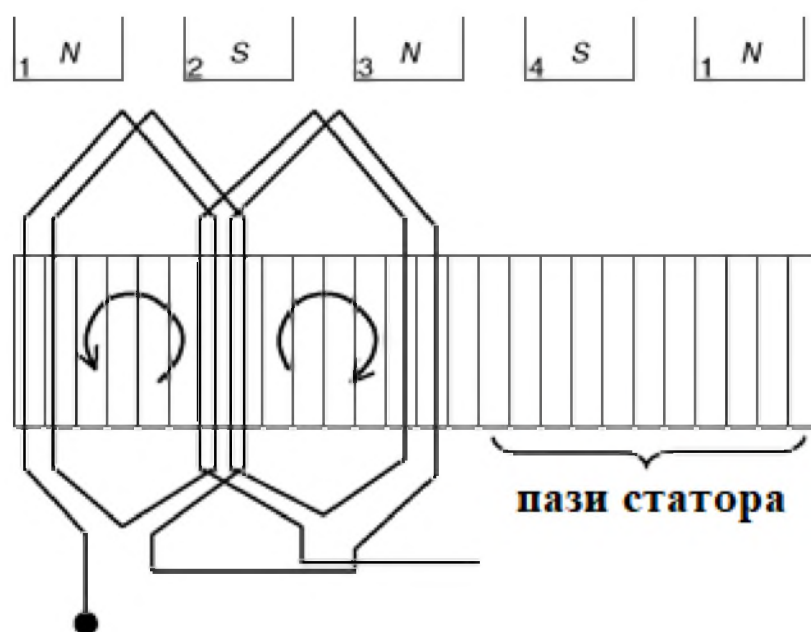


Рисунок 1.5 – «Розроблений» вигляд чотирьохполюсного статора, на якому показані прорізи, полюси та розріз обмотки. Показаний розділ відноситься до однієї з трьох фаз.

Легко помітити, що обмотка проходить за годинниковою стрілкою під північним полюсом і проти годинникової стрілки під південним полюсом (рис.1.5). Ця схема повторюється, поки обмотка не охопить чотири полюси. Подібну схему слідують дві інші фази, але розташовані на відстані 120 електричних градусів один від одного.

Як зазначено вище, котушки розподіляються в статорі в ряді форм. У кожного є свої переваги та недоліки. Основна мета — отримати три збалансовані

та синусоїдальні напруги з дуже малим вмістом гармоній (гармонійні напруги та струми згубні для машини та іншого обладнання різними способами). Щоб досягти бажаної напруги та потужності, конструктор може змінювати кількість гнізд і спосіб підключення окремих котушок, створюючи різні схеми обмотки. Найпоширенішим способом обмотки є обмотка внахлест, і вона показана на рис 1.5.

Схема з'єднання, яка дає велику свободу вибору при проектуванні обмоток для пристосування даної напруги на клеммах, є схемою, яка дозволяє з'єднувати ділянки обмотки паралельно, послідовно та/або комбінувати обидва. На (рис 1.6) показано дві типові схеми обмотки чотирьох полюсного генератора [1,2].

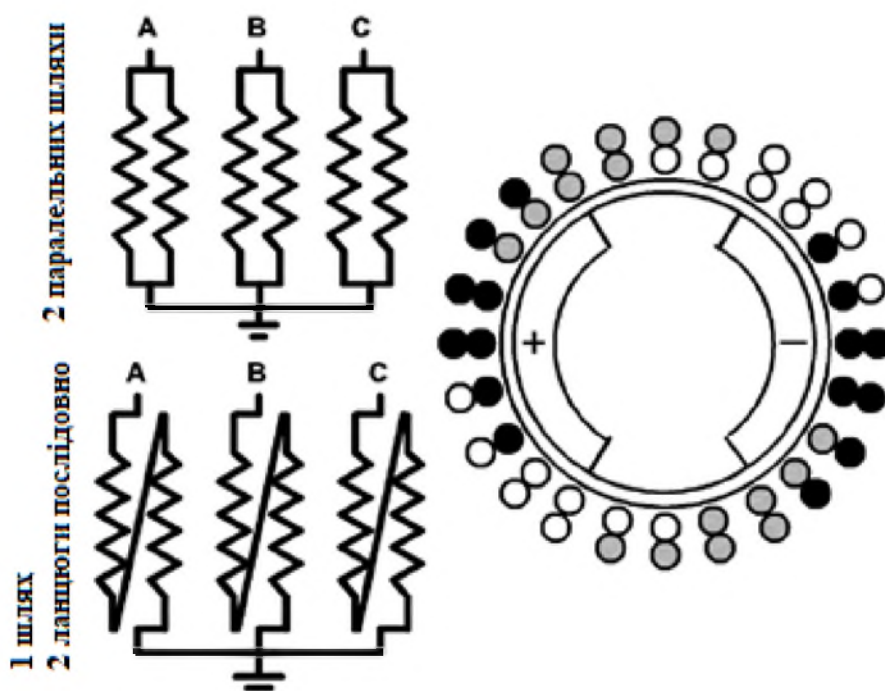


Рисунок 1.6 – Схематичний вигляд двополюсного генератора з двома можливими конфігураціями обмоток : (1) обмотка двох паралельних ланцюгів, (2) два послідовно з'єднаних кола на фазу. Праворуч три фази позначені різними тонами. Зауважте, що в деяких слотах є тільки котушки, що належать до однієї фази, тоді як в інших котушки, що належать двом фазам, спільно використовують цей слот.

1.2 Аналіз роботи синхронного турбогенератора

Надалі розглянемо представлені найелементарніші принципи роботи синхронних машин. Так як це було як згадувалося вище, всі великі турбогенератори є трифазними машинами. Таким чином, найкращим місцем для початку опису роботи трифазної синхронної машини є опис її магнітного поля.

Струм, що протікає через провідник, створює магнітне поле, пов'язане з цим струмом. Також, при намотуванні провідника отримують більше поле без збільшення величини струму. Якщо три фази обмотки розподілити на відстані 120 електричних градусів один від одного, утворюється три збалансовані напруги, створюючи трифазну систему.

За допомогою простого математичного аналізу можна показати, що якщо в збалансованій трифазній обмотці протікають три збалансованих струму (рівних величин і 120 електричних градусів один від одного), то в повітряному зазорі машини створюється магнітне поле постійної величини. Це магнітне поле обертається навколо машини з частотою, що дорівнює частоті струмів, що протікають через обмотку (рис. 1.7).

Важливість трифазної системи, яка створює постійне поле, не може бути достатньо підкреслена. Постійна величина потоку дозволяє трансформувати сотні мегават потужності всередині електричної машини від електричної до механічної, і навпаки, без значних механічних обмежень. Важливо пам'ятати, що потік постійної величини створює обертальний момент постійної величини. Тепер спробуйте уявити, що той самий тип потужності трансформується під впливом пульсуючого потоку (і, отже, пульсуючого моменту), що надзвичайно важко досягти.

Виробництво крутного моменту в синхронній машині є результатом природної тенденції двох магнітних полів вирівнюватися. Магнітне поле, створюване нерухомим якорем, позначається як Φ_s . Магнітне поле, яке створює обертове поле, дорівнює Φ_f . Результирує магнітне поле становить:

$$\Phi_r = \Phi_s + \Phi_f$$

Потік Φ_r встановлюється в повітряному зазорі (або газовому зазорі) машини. (*Жирні символи позначають векторні величини.*)

Коли крутний момент, прикладений до валу, дорівнює нулю, магнітні поля ротора і статора стають ідеально вирівняними. Миттєвий крутний момент подається на вал або в режимі генерації, або в режимі двигуна, між полями статора і ротора створюється невеликий кут. Цей кут (λ) називається *кутом крутного моменту* машини.

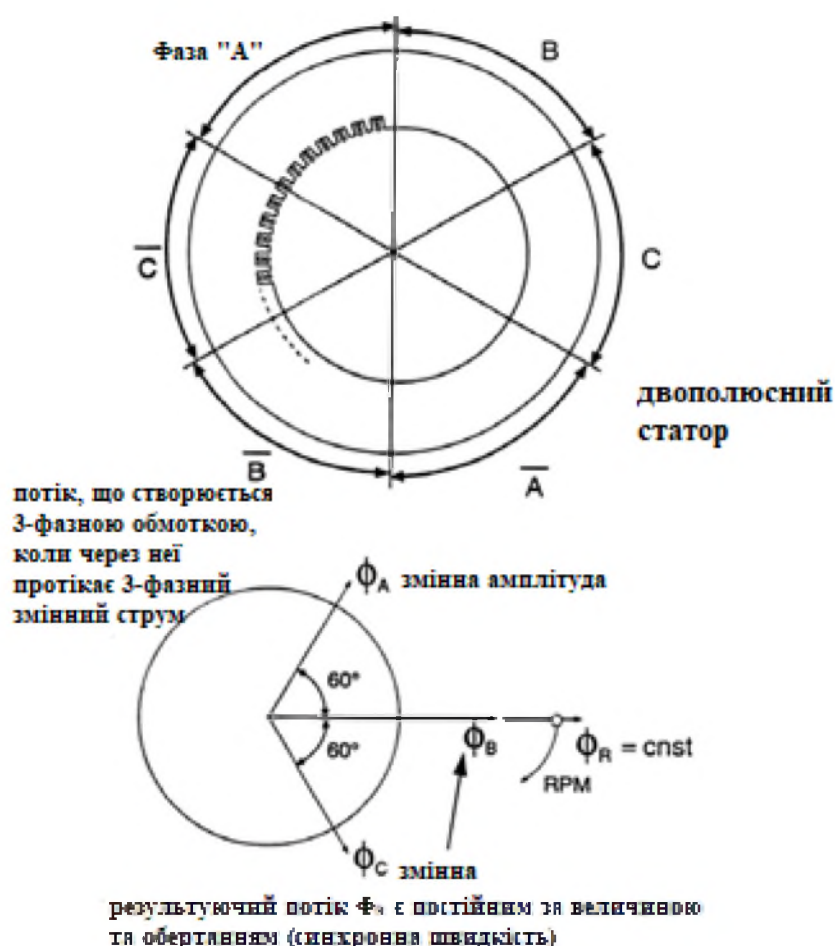


Рисунок 1.7 – Виробництво обертового поля статора. Постійна величина та постійна швидкість обертання магнітного потоку створюється, коли трифазні збалансовані струми протікають через трифазну симетричну обмотку. Однак у двополісній обмотці будь-який той самий результат застосовується для будь-якої кількості пар полюсів.

Коли ідеальна машина підключена до нескінченної шини, до обмотки статора подається трифазна збалансована напруга (V_1) (в контексті цієї роботи припускаються трифазні системи та машини). Як описано вище, можна показати, що трифазна збалансована напруга, прикладена до трифазної обмотки, рівномірно розподіленої навколо осердя якоря, вироблятиме обертову (обертаючу) магніто-рушійну силу постійної величини (F_s). Ця магніто-рушійна сила, діючи на опір, що зустрічається на його шляху, призводить до раніше введеного магнітного потоку (Φ_s). Швидкість, з якою це поле обертається навколо центру машини, пов'язана з частотою живлення та кількістю полюсів за допомогою такого виразу:

$$n_s = 120 \cdot \left(\frac{f}{p}\right)$$

де: f – електрична частота в Гц;

p – кількість полюсів машини;

n_s – швидкість обертового поля в оборотах за хвилину (об/хв).

Якщо струм не подається на обмотку постійного струму, крутний момент не створюється, і результуючий потік (Φ_r), який в даному випадку дорівнює потоку статора (Φ_s), намагнічує осердя тією мірою, в якій прикладена напруга (V_1) точно протистоїть протиелектрорушійній силі (E_1). Якщо збудження ротора трохи збільшено, а крутний момент не подається на вал, ротор забезпечує деяку частину збудження, необхідного для вироблення (E_1), викликаючи еквівалентне зменшення (Φ_s). Ця ситуація являє собою стан недозбудження, показаний у стані відсутності навантаження (а) на рис. 1.8. Кажуть, що під час роботи в таких умовах машина веде себе як конденсатор, що відстає, тобто поглинає реактивну потужність з мережі. Якщо збудження поля збільшується понад значення, необхідне для створення (E_1), струми статора створюють потік, який протидіє потоку, створеному полем.

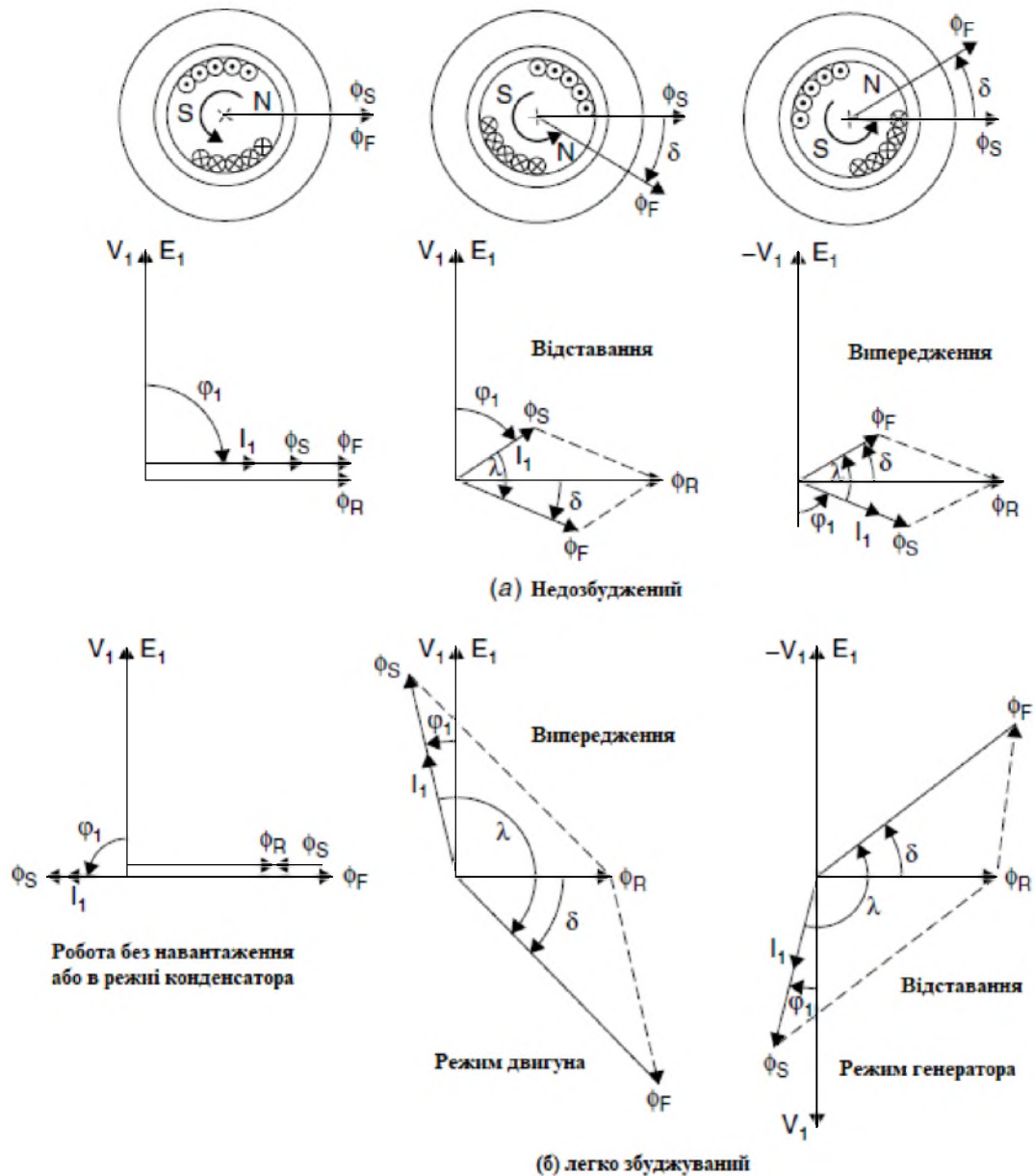


Рисунок 1.8 – Фазні діаграми для ідеальної машини синхронного циліндричного ротора

У цьому стані машина називається перезбудженою, що показано як стан *без навантаження* (б) на рис.1.8. Машина веде себе як провідний конденсатор; тобто подає реактивну потужність до мережі.

За умов холостого ходу як кут крутного моменту (λ), так і кут навантаження (δ) дорівнюють нулю. Кут *навантаження* визначається як кут між ЕРС (E_f) ротора та потоком Φ_f або результуючою ЕРС (E_r) та потоком (Φ_r). Кут навантаження (δ) є найбільш часто використовуваним, оскільки він встановлює

обмеження крутного моменту, яких машина може досягти простим способом. Необхідно пам'ятати, що в багатьох текстах для вказівки кута навантаження використовується назва крутного моменту. Також іноді дається назва *кута* крутного моменту, щоб позначити кут *між напруга на клеммах* (V_1) і напруга збудження (E_1). Це відбувається тому, що реактивний опір витоку, як правило, набагато менший, ніж реактивний опір намагнічування, і тому кут навантаження (δ) і кут між (V_1) і (E_1) дуже подібне. Більш поширена назва *потужності кута* використовується для кута між (V_1) і (E_1). На рис.1.8 кут потужності завжди показаний як нуль, оскільки імпедансом витоку в ідеальній машині потрібно знехтувати.

На цьому етапі важливо розрізняти електричні та механічні кути. При вивченні продуктивності синхронної машини всі електромагнітні розрахунки проводяться на основі електричних величин; тобто всі кути є електричними. Щоб перетворити електричні кути, використані в розрахунках, у фізико-механічні кути, ми спостерігаємо таке співвідношення:

$$\text{Механічний кут} = \left(\frac{2}{p}\right) \cdot \text{Електричний кут}$$

Турбогенератори – агрегати, які рідко працюють як двигун. (Одним із таких прикладів є те, що основний генератор використовується протягом короткого періоду часу як двигун, що живиться від перетворювача зі змінною швидкістю. Метою цієї операції є запуск власної турбіни згорання з первісним двигуном). Однак обговорення синхронної машини, і, таким чином, також висвітлюється режим роботи двигуна. Якщо до валу прикладати розривний момент, ротор починає відставати від магнітної рушійної сили, індукованої обертовим якорем ЕРС (F_s). Для підтримки необхідного намагнічування ЕРС (F_r) змінюється струм якоря. Якщо машина перебуває в режимі недозбудження, стан *двигуна* на (рис. 1.8, а) представляє нову фазограму.

З іншого боку, якщо машина перезбуджена, нова фазорна діаграма представлена *двигуном* на (рис. 1.8, б). Активна потужність, споживана з мережі за цих умов, визначається як:

$$\text{Активна потужність} = V_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi_1 \text{ (на фазу)}$$

Якщо розривний момент збільшується, досягається межа, при якій ротор не може встигати за обертовим полем. Потім машина зупиняється. Це відомо як «випадання з кроку», «виривання з кроку» або «ковзання жердини». Максимальний крутний момент досягається, коли кут δ дорівнює $\pi/2$ електричного. Конвенція полягає в тому, щоб визначити δ як негативне для роботи двигуна і позитивне для роботи генератора. Крутний момент також є функцією величини Φ_r і Φ_f . При перезбудженні значення Φ_f більше, ніж у недозбудженому стані. Тому синхронні двигуни здатні виробляти більшу механічну потужність при перезбудженні. Аналогічно, робота з недостатнім збудженням більш схильна призводити до ситуації «нестабільності».

Припустимо, що машина працює без навантаження і на вал прикладається позитивний крутний момент; тобто кут потоку ротора просувається попереду кута потоку статора. Як і у випадку роботи двигуна, струми статора будуть змінюватися, щоб створити нові умови рівноваги, показані на (рис. 1.8), під *генератором*. Якщо машина спочатку недозбуджена, отримується умова (а) на (рис. 1.8). З іншого боку, якщо машина перезбуджена, виходить умова (б) на (рис. 1.8).

Важливо зазначити, що при «баченні» з клемом, коли машина працює в режимі недозбудження, кут коефіцієнта потужності (φ_1) є провідним (тобто I_1 відводить V_1). Це означає, що машина поглинає реактивну потужність із системи. Протилежне відбувається, коли машина перебуває в режимі перезбудження. Що посилення роботи двигуна, то перезбудження режиму генерації також дозволяє збільшити подачу потужності.

Оскільки генератори зазвичай покликані забезпечувати регулювання реактивної потужності разом із ватами, вони майже завжди працюють у стані перезбудження.

Маючи справу з трифазними симметричними ланцюгами, інженери-електрики використовують *однолінійне* або *однолінійне* представлення. Таке спрощення допускається, оскільки в трифазних симметричних ланцюгах всі струми і напруги, а також елементи схеми симетричні. Таким чином, «показуючи» лише одну фазу, можна уявити трифазну систему, якщо обережно використовувати відповідні коефіцієнти. Наприклад, трифазну збалансовану систему можна зобразити, як показано на (рис 1.9). Надалі при описі трифазного генератора електричною схемою буде застосовуватися однолінійний метод.

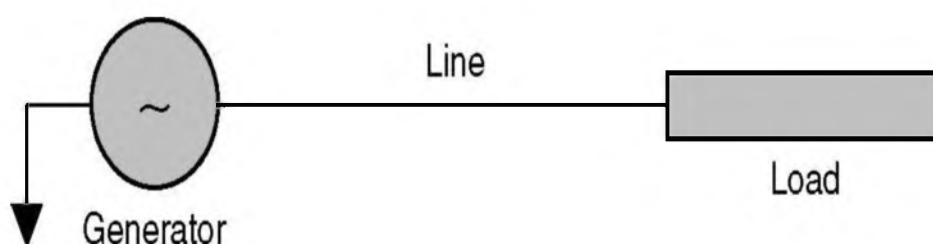


Рисунок 1.9 – Однолінійне зображення схеми

Найзручнішим способом визначення експлуатаційних характеристик – синхронних машин є еквівалентні схеми. В ці еквівалентні схеми вводиться насичення, реакція якоря, гармонічна реактивність та інші нелінійні ефекти. Однак спрощена схема на (рис. 1.10) сприяє отриманню основних характеристик роботи машини в стаціонарних умовах.

На (рис. 1.10) реактивний опір X_a представляє вплив намагнічування або розмагнічування обмоток статора на ротор. Його ще називають *реактивним опором намагнічування*. R_a являє собою ефективний опір статора. Реактивний опір X являє собою реактивний опір витoku статора. Сума X_a і X використовується для представлення загального реактивного опору машини і називається *синхронним реактивним опором* (X_s). Z_s – *синхронний опір* машини. Важливо пам'ятати, що еквівалентна схема, описана на (рис.1.10), представляє машину лише в стаціонарному режимі.

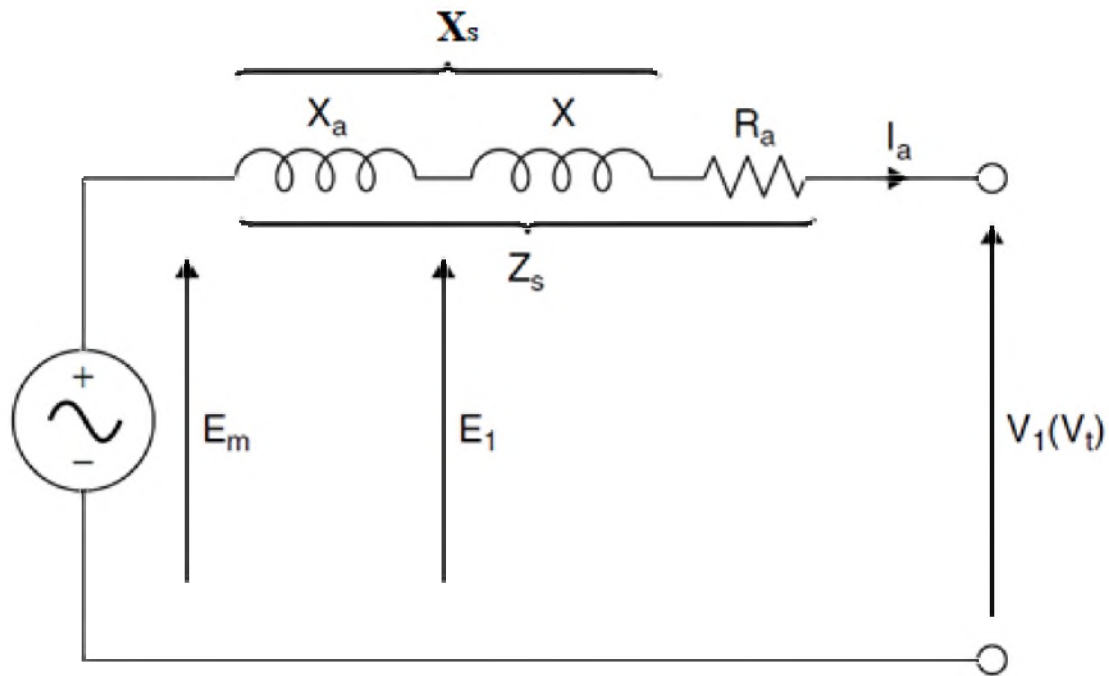


Рисунок 1.10 – Стационарна еквівалентна схема синхронної машини.

X – реакція витoku, X_a – реактивний опір реакції якоря,
 $X_s = X_a + X$ – синхронний реактивний опір, R_a – опір якоря,
 Z_s – синхронний опір, $V_1 (V_t)$ – напруги на клеммах,
 E_m – напруга намагнічування.

Просту еквівалентну схему на (рис. 1.11, а) достатньо для визначення усталених параметрів продуктивності синхронної машини, підключеної до електромережі. Ці параметри включають напруги, струми, коефіцієнт потужності та кут навантаження (рис. 1.11, б). Регулювання машини можна легко знайти з еквівалентної схеми для різних умов навантаження, використовуючи – формулу регулювання:

$$k_{\text{рег}}(\%) = 100\% \cdot V_{\text{без навант.}} - \frac{V_{\text{навант.}}}{V_{\text{навант.}}}$$

Регулювання в генераторі вказує, як змінюється напруга на клеммах машини зі зміною навантаження. Коли генератор підключений до нескінченної шини

(тобто до шини, яка не дозволяє змінювати напругу на клемі), зміна навантаження вплине на продуктивність машини кількома способами [2,3].

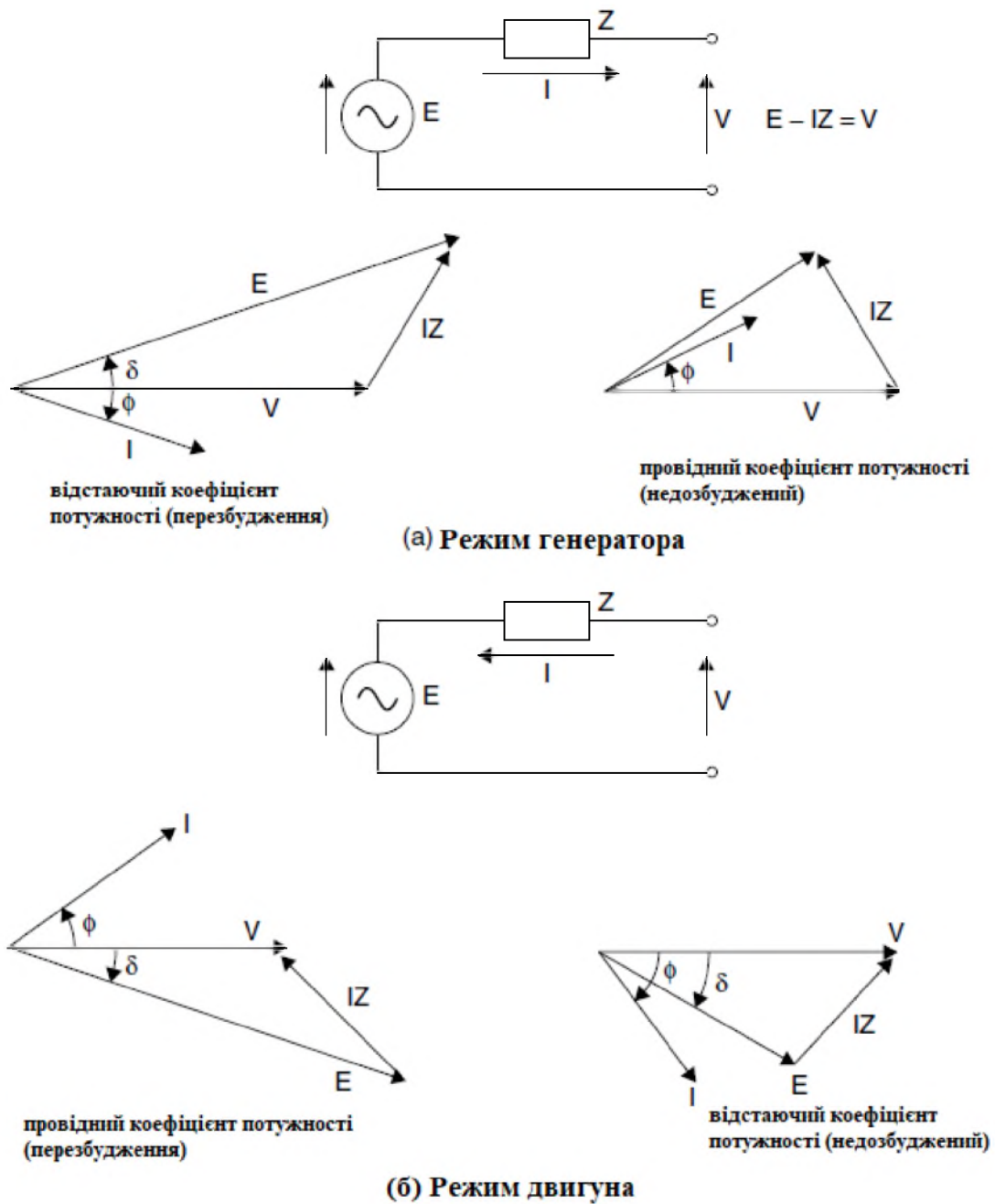


Рисунок 1.11 – Стаціонарна еквівалентна схема та векторна діаграма

2. ОСНОВНІ РІВНЯННЯ І ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ

2.1 Загальні параметри синхронних генераторів (турбогенераторів)

У процесі роботи машин в обмотці статора індукуються ЕРС і протікають струми, що створюють магніторушійну силу (МРС), максимальне значення якої:

$$F_1 = \frac{0,45 \cdot m_1 \cdot I_1 \cdot w_1 \cdot k_{o61}}{p}$$

Ця МРС створює магнітне поле, що обертається, а в повітряному зазорі δ машини створюється магнітна індукція, графік розподілу якої в межах кожного полюсного розподілу τ залежить від конструкції ротора (рис. 2.1).

Для синхронних машин справедливі наступні рівняння напруг:

для явнополюсної машини:

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_0 + \dot{E}_{1d} + \dot{E}_{1q} + \dot{E}_{\sigma 1} - \dot{I}_1 \cdot r_1$$

де: E_0 – основна ЕРС синхронної машини, пропорційна основному магнітному потоку Φ_0 ;

$\dot{E}_{1d}$ – ЕРС реакції якоря синхронної машини по поздовжній осі, пропорційна МРС реакції якоря по поздовжній осі;

$\dot{E}_{1q}$ – ЕРС реакції якоря по поперечній осі $\dot{E}_{1q}$;

$\dot{E}_{\sigma 1}$ – ЕРС розсіювання, обумовлена наявністю магнітного потоку розсіювання Φ_σ , величина цієї ЕРС пропорційна індуктивному опору розсіювання обмотки статора x_1 , $\dot{E}_{\sigma 1} = \dot{I}_1 \cdot r_1$;

$\dot{I}_1 \cdot r_1$ – активне падіння напруги у фазній обмотці статора;

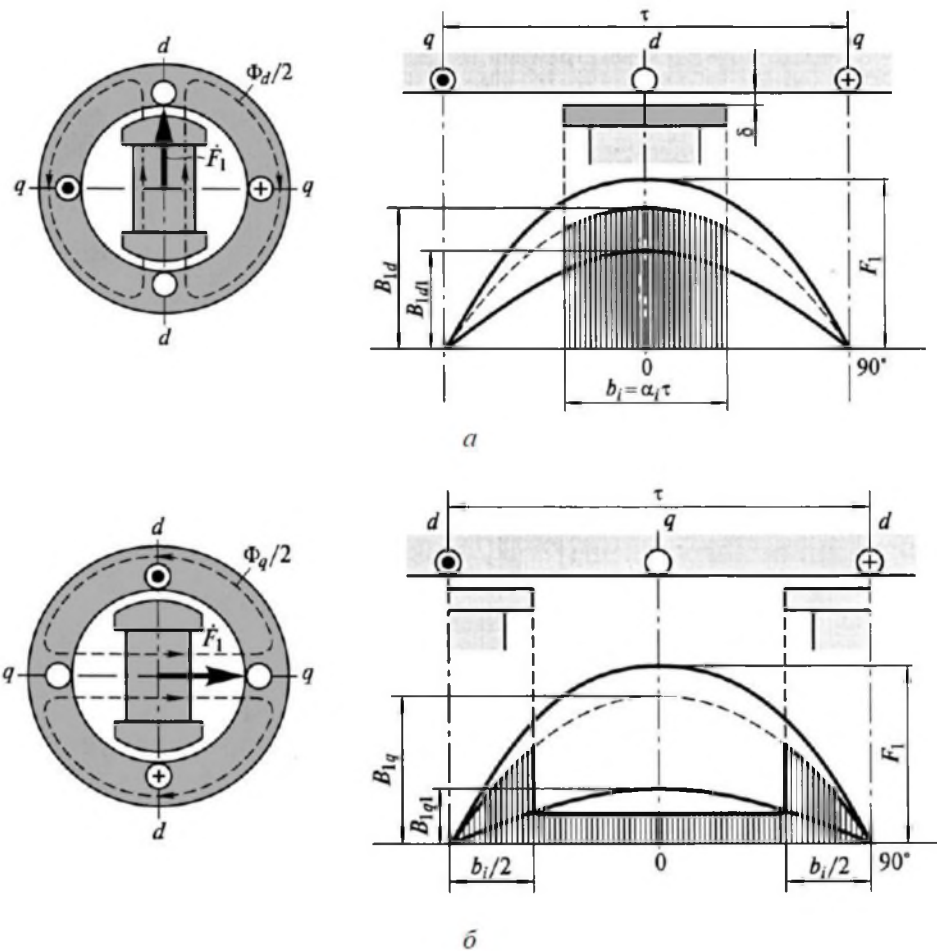


Рисунок 2.1 – Графіки розподілу магнітної індукції поля статора по поздовжній (а) та поперечній (б) осях явнополісної синхронної машини

для неявно полюсної машини:

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_0 + \dot{E}_c - \dot{I}_1 \cdot r_1$$

Тут:

$$\dot{E}_c = \dot{E}_1 + \dot{E}_{\sigma 1}$$

де: $\dot{E}_c$ – синхронна ЕРС неявнополісної синхронної машини;

$\dot{E}_1$ – ЕРС реакції якоря неявно полюсної синхронної машини.

Розглянутим рівнянням напруги відповідають векторні діаграми напруг (рис. 2.2). З цих діаграм видно, що на величину напруги синхронного генератора впливає не лише величина підключеного навантаження, а й її характер: при активно-індуктивному навантаженні напруга на виході синхронного генератора зменшується (рис. 2.2, а, в), а при реактивно-ємнісному – збільшується (рис. 2.2, б, г).

Слід мати на увазі, що рівняння напруги і відповідні їм векторні діаграми не враховують магнітного насичення магнітопроводу синхронної машини, яке, як відомо, впливає величину індуктивних опорів, викликаючи їх зменшення. Облік цього насичення є складним завданням, тому при розрахунках ЕРС та напруг синхронних машин зазвичай користуються практичною діаграмою ЕРС (діаграма Потьє), яка враховує стан насичення магнітної системи, спричинене дією реакції якоря при навантаженні синхронної машини. При побудові практичної діаграми ЕРС намагнічуючу силу реакції якоря не розкладають на поздовжню та поперечну складові, тому ця діаграма може бути застосована як при розрахунках явнополюсних машин, і при розрахунках неявнополюсних машин.

Практичну діаграму ЕРС синхронного генератора будують на підставі характеристик холостого ходу $E^* = f(I_B^*)$ та короткого замикання $I_{1к}^* = f(I_B^*)$. Зазвичай використовують нормальну характеристику стигу холостого ходу, побудовану у відносних одиницях (табл. 2.1).

Таблиця 2.1. – Номінальна напруга трифазних асинхронних електродвигунів

$E^* = E_0 / U_{1 \text{ ном}}$	0,58	1,00	1,21	1,33	1,40	1,46	1,51
$I_B^* = I_B / I_{B0 \text{ ном}}$	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50

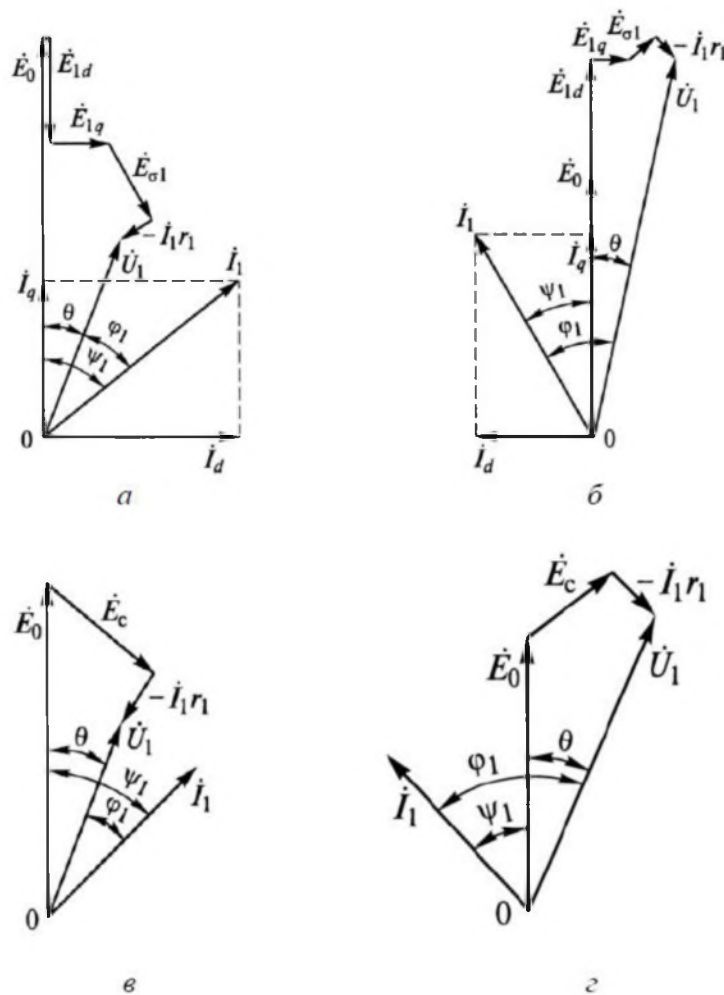


Рисунок 2.2 – Векторні діаграми явнополюсного (а, б) та неявнополюсного (в, г) синхронних генераторів при активно-індуктивній (а, в) та активно-ємнісний (б, г) видах навантаження

Тут $I_{B0\text{ном}}$ – струм збудження в режимі холостого ходу, що відповідає ЕРС холостого ходу $E_0 = U_{1\text{ном}}$.

Характеристику трифазного короткого замикання $I_{1к}^* = f(I_B^*)$ в отримують за результатами досвіду короткого замикання, коли частота обертання ротора дорівнює синхронній, а струм в обмотці збудження поступово збільшують від нуля до значення, при якому струм короткого замикання в обмотці статора не досягне $I_{1к} = 1,25 \cdot I_{1\text{ном}}$. Струм збудження $I_{в.к} = I_{в.к.\text{ном}}$ відповідає номінальному значенню струму статора у режимі короткого замикання. Відношення струму збудження $I_{B0\text{ном}}$ до струму збудження $I_{в.к.\text{ном}}$ становить

величину, звану відношенням короткого замикання ВКЗ, яке є важливим параметром, що визначає властивість синхронних машин:

$$\text{ВКЗ} = \frac{I_{B0\text{ном}}}{I_{\text{в.к.ном}}}$$

Для неявно полюсних синхронних машин ВКЗ 0,4–1,0; для явнополюсних машин ОКЗ 0,8–1,8.

На рис. 2.3 представлена практична діаграма ЕРС синхронного генератора, що дозволяє визначити зміну напруги на виході генератора $\Delta U_{\text{ном}}$ при скиданні навантаження від номінальної $I_1 = I_{1\text{ном}}$ до нульової $I_1 = 0$:

$$\Delta U_{\text{ном}} = \frac{NP - NR}{NR} = \frac{E_0 - U_{1\text{ном}}}{U_{1\text{ном}}}$$

Графічно виражена залежність напруги на виході генератора U_1 від струму навантаження I_1 при постійному струмі збудження представлена зовнішніми характеристиками, побудованими різного виду навантажень (рис. 2.4, а).

Величина $\Delta U_{\text{ном}}$ не повинна перевищувати 50%. Напруга на виході синхронного генератора при коливаннях навантаження підтримується незмінним швидкодіючими автоматичними регуляторами струму в обмотці збудження, що працюють відповідно до регулювальних характеристик генератора (рис. 2.4 б). В цьому разі струм збудження при коливаннях навантаження генератора від нульової до номінальної змінюється таким чином, що напруга на виході зберігається рівним номінальному значенню.

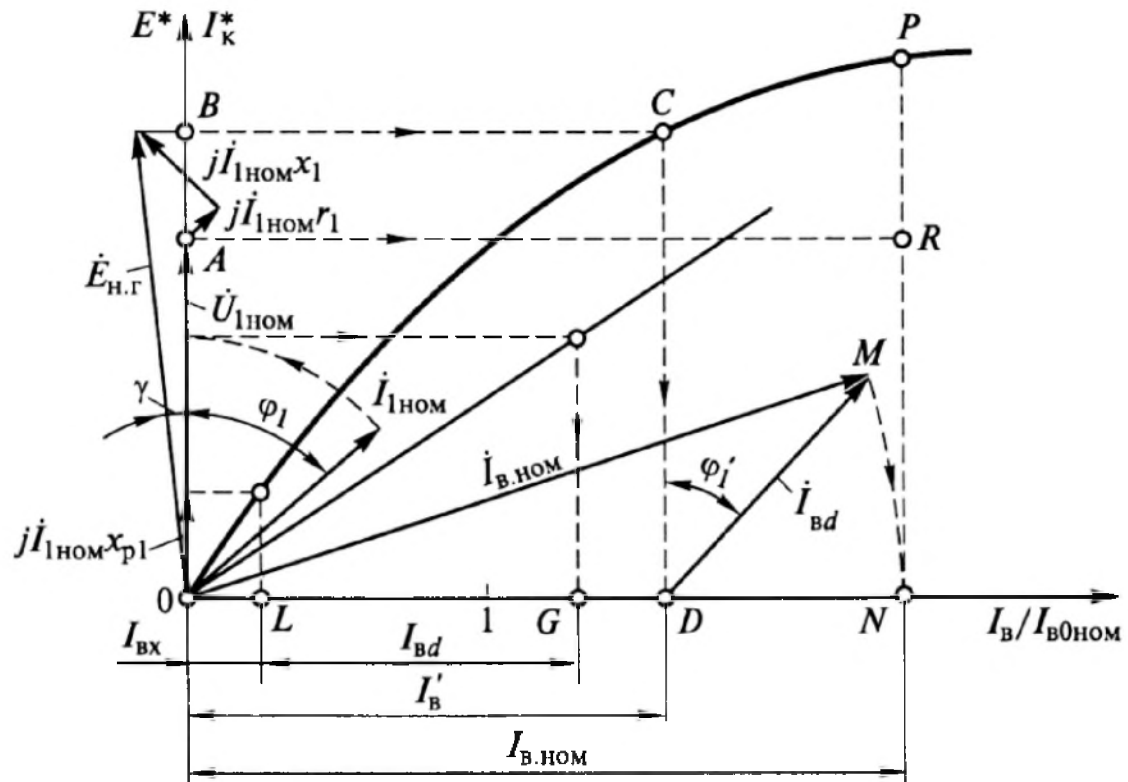


Рисунок 2.3 – Практична діаграма ЕРС синхронного генератора

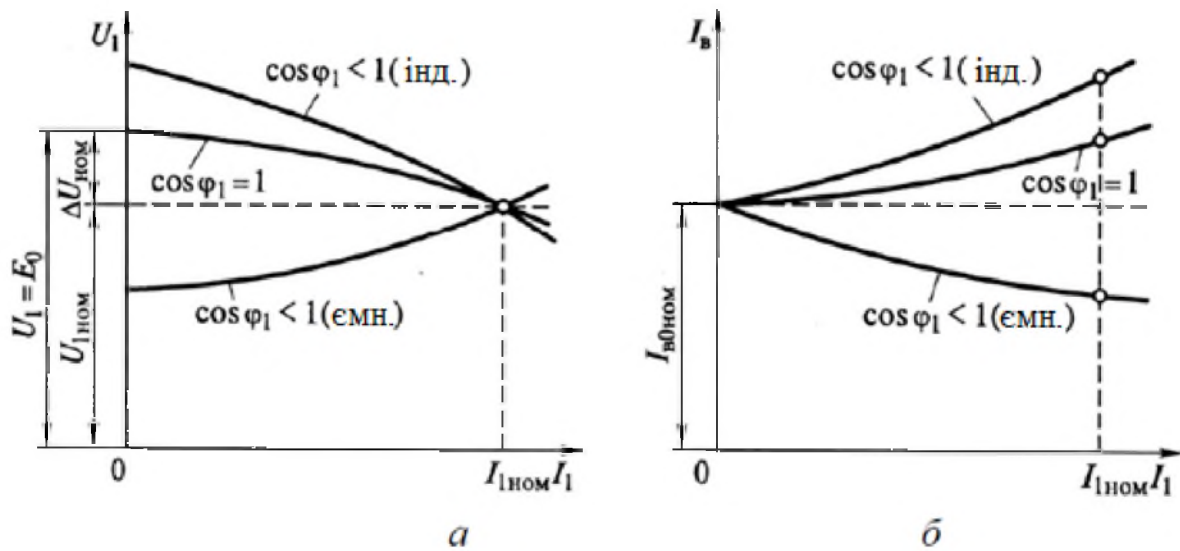


Рисунок 2.4 – Зовнішні (а) та регулювальні (б) характеристики синхронного генератора

Електромагнітні моменти синхронних машин, Н·м:

неявно полюсної:

$$M_H = \frac{P_{em}}{\omega_1} = \frac{m_1 \cdot U_1 \cdot E_0}{\omega_1 \cdot x_c} \cdot \sin\theta$$

Явнополюсної:

$$M_{я} = \frac{P_{em}}{\omega_1} = \frac{m_1 \cdot U_1 \cdot E_0}{\omega_1 \cdot x_d} \cdot \sin\theta + \frac{m_1 \cdot U_1^2}{2 \cdot \omega_1} \cdot \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cdot \sin 2\theta$$

де: x_d та x_q – синхронні індуктивні опори явнополюсної синхронної машини по поздовжній та поперечній осях відповідно, Ом;

θ – кут навантаження синхронної машини, град.

Основна складова електромагнітного моменту становить:

$$M_{осн} = \frac{m_1 \cdot U_1 \cdot E_0}{\omega_1 \cdot x_d} \cdot \sin\theta$$

Вона має місце у будь-якій синхронній машині незалежно від конструкції ротора. Неодмінною умовою виникнення цієї складової є наявність збудження машини, оскільки вона пропорційна основній ЕРС машини:

$$E_0 = 4,44 \cdot \Phi \cdot f_1 \cdot \omega_1 \cdot k_{об1}$$

Реактивна складова електромагнітного моменту:

$$M_p = \frac{m_1 \cdot U_1^2}{2 \cdot \omega_1} \cdot \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cdot \sin 2\theta$$

Реактивна складова моменту виникає і в незбудженій машині ($E_0=0$), аби до обмотки статора було підведено напругу U_1 . Але неодмінною умовою

виникнення цього моменту є явнополюсність ротора, тому що тільки в цьому випадку синхронні індуктивні опори по поперечній та поздовжній осях не рівні, тобто $x_q < x_d$. З цього випливає, що у явнополюсній синхронній машині реактивна складова $M_p=0$ і електромагнітний момент M_H визначається лише його основною складовою, тобто основним елементом. $M_H=M_{осн}$.

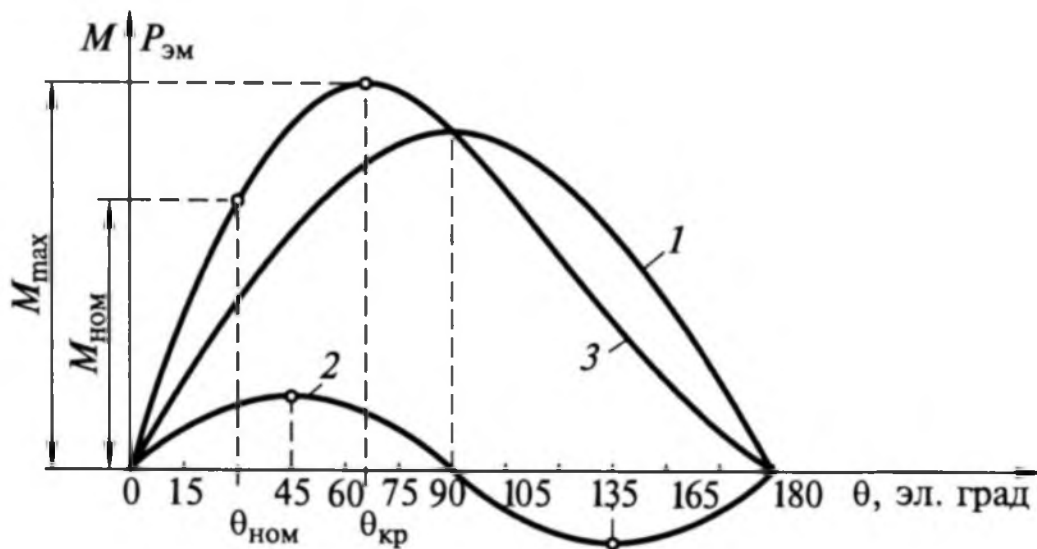


Рисунок 2.5 – Кутові характеристики синхронного генератора

На рис. 2.5 наведено графіки залежності електромагнітного моменту та його складових від навантаження синхронної машини: 1 – графік основної складової $M_{осн}=f(\theta)$, він є графіком моменту M_H неявнополюсної синхронної машини; 2 – графік реактивної складової $M_p=f(\theta)$; 3 – графік результуючого моменту явно полюсної машини $M_я=f(\theta)$.

Кут навантаження $\theta_{ном}$ відповідає номінальному моменту $M_{ном}$. Максимальний момент синхронної машини визначає її перевантажувальну здатність – поняття важливе як синхронних генераторів, що працюють паралельно з мережею, так синхронних двигунів. У неявно полюсних синхронних машинах максимальний момент відповідає куту навантаження $\theta=90^\circ$ ел. град; у явно полюсних машинах максимальний момент відповідає куту навантаження $\theta < 90^\circ$ ел. град і зазвичай становить 60 – 80 ел. град в залежності від співвідношення основного та реактивного електромагнітних моментів цієї

машини. Для розрахунку критичного кута навантаження явно полюсних синхронних машин можна скористатися виразом:

$$\cos \theta_{\text{кр}} = \sqrt{\beta^2 + 0,5} - \beta$$

Тут:

$$\beta = \frac{E_0}{4 \cdot U_1 \cdot \left(\frac{x_d}{x_q} - 1 \right)}$$

Синхронний генератор, включений на паралельну роботу, має синхронізуючу здатність. Це обумовлено тим, що за відхилення кута θ від свого стійкого встановленого значення на деяку величину $\Delta\theta$ виникає різниця $\Delta P_{\text{ем}}$ між підведеною до машини потужністю і потужністю, що віддається нею, під впливом якої стійкий стан роботи відновлюється. Потужність $\Delta P_{\text{ем}}$ тому називається синхронізуючою потужністю. Цією потужності відповідає синхронізуючий момент $\Delta M_{\text{ем}}$.

При $\theta > \theta_{\text{кр}}$ синхронізуючого моменту стає недостатньо для утримання ротора, і машина виходить із синхронізму.

Для кількісної оцінки синхронізуючої здатності синхронної машини вводять поняття питомої синхронізуючої потужності p_c і питомого синхронізуючого моменту m_c . Питома синхронізуюча потужність визначається відношенням збільшення електромагнітної потужності $\Delta P_{\text{ем}}$ до відповідного збільшення кута $\Delta\theta$ (рис. 2.6):

$$p_c = \frac{\Delta P_{\text{ем}}}{\Delta\theta}$$

Питомий синхронізуючий момент:

$$m_c = \frac{\Delta M}{\Delta \theta}$$

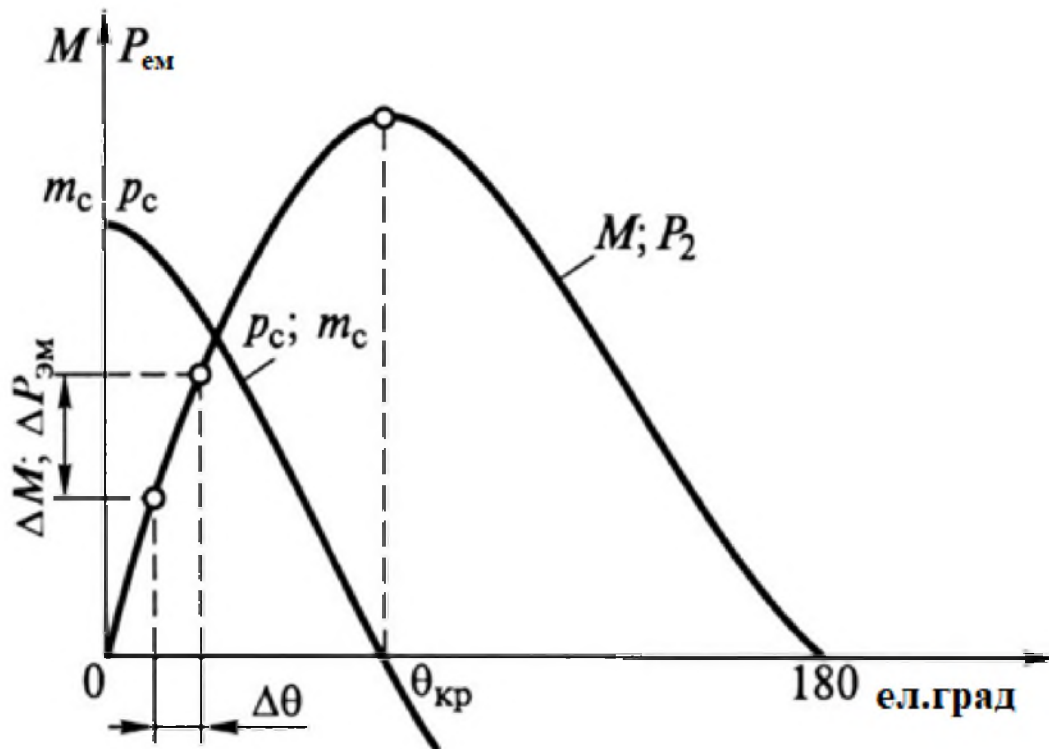


Рисунок 2.6 – До поняття про синхронізуючу здатність синхронної машини

Величини p_c і m_c тим більше, чим крутіше підйом кутової характеристики на ділянці, що відповідає зміні кута навантаження $\Delta\theta$. У нестійкій області кутовий характеристики при $\theta > \theta_{\text{кр}}$ значення p_c та m_c негативні, тобто стійка робота синхронної машини відповідає позитивним значенням p_c і m_c .

При змінах навантаження генератора порушується рівність між потужністю приводного двигуна та потужністю генератора. Небаланс потужностей $\Delta P_{\text{ем}}$, що виникає при цьому, являє собою синхронізуючу потужність $\Delta P_{\text{ем}} = p_c \cdot \Delta\theta$. Синхронізуючій потужності відповідає синхронізуючий момент:

$$\Delta M = \frac{\Delta P_{\text{ем}}}{\omega_1} = m_c \cdot \Delta \theta$$

Цей момент обумовлений різницею електромагнітного моменту генератора та крутного моменту приводного двигуна та надає на ротор генератора дія, що запобігає виходу машини з синхронізму.

Найбільшу синхронізуючу здатність синхронна машина має при $\theta=0$. Зі зростанням кута θ синхронізуюча властивість машини знижується і при $\theta=\theta_{\text{кр}}$ зникає ($p_c=0$, $m_c=0$).

Синхронізуючу здатність мають не тільки синхронні генератори, а й синхронні двигуни.

При визначенні параметрів синхронних машин користуються U-образними характеристиками, що є залежність струму статора I_1 від струму в обмотці збудження I_b при незмінному навантаженні P_2 (рис. 2.7).

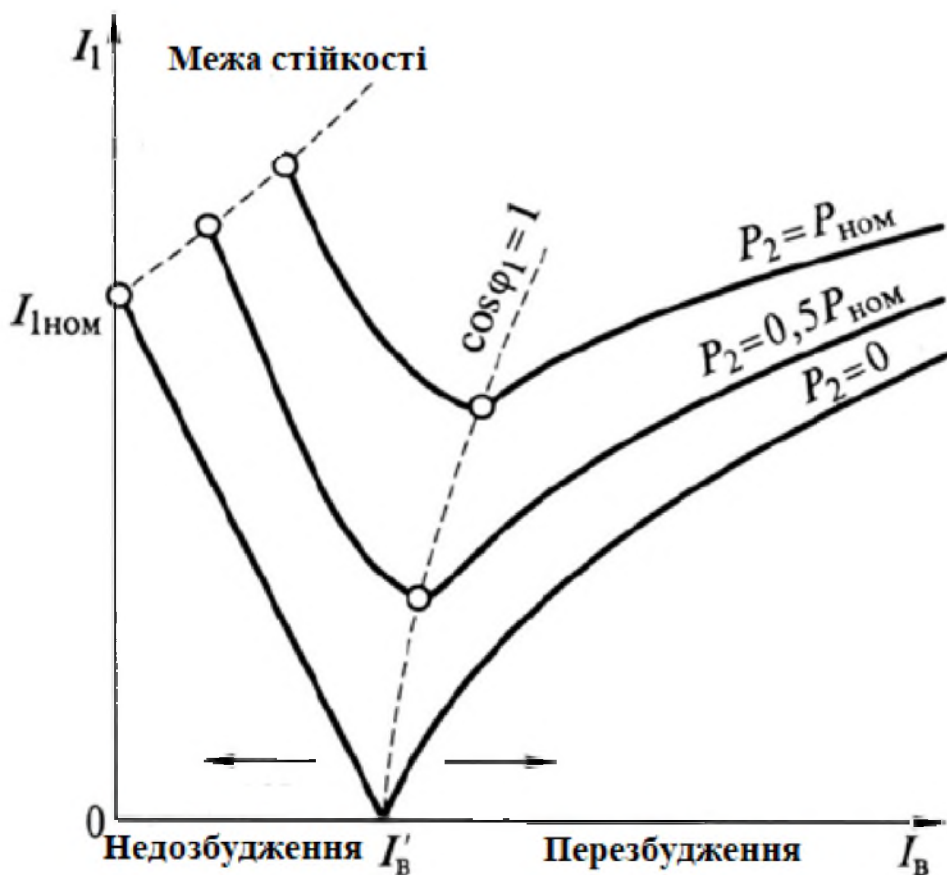


Рисунок 2.7 – U-подібні характеристики синхронного генератора

З цих показників слід, що з зміни величини струму збудження з'являється можливість регулювати коефіцієнт потужності генератора, оскільки зміни струму збудження викликають зміни струму ланцюга статора лише рахунок його реактивної складової. Активна складова струму статора при цьому залишається незмінною. Струм збудження I'_B відповідає роботі генератора з коефіцієнтом потужності $\cos f_1=1$: створюючи режим перезбудження $I_B=I'_B$, викликає випередження по фазі струму мережі I_C щодо напруги U_1 , що сприяє підвищенню коефіцієнта потужності в мережі. Необхідно пам'ятати, що з надмірному зменшенні струму збудження може наступити таке розмагнічування генератора, у якому він випадає із синхронізму, тобто порушиться магнітний зв'язок між намагніченими полюсами ротора і полем статора, що обертається. Зі зростанням навантаження генератора граничне значення струму збудження, що забезпечує стійку роботу, збільшується (рис. 2.7) [4-6].

3. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ СИНХРОННОГО ТУРБОГЕНЕРАТОРА

Синхронною називається електрична машина, частота обертання якої пов'язана постійним співвідношенням з частотою мережі змінного струму, яку ця машина включена.

Синхронна машина складається із двох частин: статора (нерухома) частина) і ротора (частка, що обертається). На роторі машини розташована обмотка збудження, до якої через контактні кільця та щітки підводиться постійна напруга від стороннього джерела чи збудника. Як збудник, як правило, використовуються генератори постійного струму. Обмотка збудження є створення основного магнітного поля в машині. У пазах сердечника статора синхронної машини розташована трифазна обмотка змінного струму, яка також називається обмоткою якоря. Вона може бути з'єднана або зірку, або – у трикутник.

Як і всі електричні машини, синхронні машини оборотні: вони можуть експлуатуватися як у руховому, так і в генераторному режимі.

Особливістю синхронної машини, що працює в енергетичній системі, є можливість регулювання її коефіцієнта потужності за величиною та характером. Режим роботи синхронної машини визначається взаємодією магнітних полів, створюваних струмами в обмотках статора та ротора.

Синхронна машина переходить від режиму генератора до режиму двигуна в залежності від того, чи діє на її вал обертовий (генераторний) або гальмівний (руховий) момент. За відсутності моменту на валу синхронної машини вона працює в режимі холостого ходу.

Синхронні машини в основному застосовуються як перетворювачі механічної енергії обертання в трифазну електричну. В даний час основними джерелами електроенергії залишаються синхронні турбо- та гідрогенератори на теплових, атомних і гідроелектростанціях (ТЕС, АЕС, ГЕС).

Трифазні синхронні генератори – найпотужніші електричні машини. Поодинокі потужності синхронних генераторів, що встановлюються на

гідроелектростанціях, досягла 640 МВт, а на теплових електростанціях – 800÷1200 МВт.

Синхронні двигуни також є найпотужнішими серед всіх електродвигунів. Так, поодинокі потужність синхронних двигунів для великих насосів, компресорів досягає кількох десятків МВт.

Синхронні машини застосовуються як двигуни, особливо у великих установках, що не потребують регулювання частоти обертання.

Для поліпшення коефіцієнта потужності великих електроустановок на електричних підстанціях встановлюють спеціальні синхронні двигуни, що працюють у режимі холостого ходу з випереджаючим по фазі струмом. Їх називають компенсаторами реактивної потужності. Потужність великих синхронних компенсаторів становить 50, 100, 160 МВт.

Залежно від типу приводної турбіни синхронні генератори поділяються за конструкцією на турбогенератори та гідрогенератори. Синхронні турбогенератори - це високошвидкісні машини з числом пар полюсів $p = 1 \div 2$, а гідрогенератори – відносно тихохідні з великим числом пар полюсів.

Потужність, що підводиться до валу турбогенератора, може бути визначена за його коефіцієнтом корисної дії та його номінальною електричної потужності:

$$P_{\text{мех}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\eta_{\text{ном}}}$$

Механічний момент, що розвивається приводною турбіною, визначається таким виразом:

$$M_{\text{мех}} = \frac{P_{\text{мех}}}{\Omega}$$

$$\text{де: } \Omega = \frac{\pi \cdot n}{30}, (\text{рад/с}).$$

Рівняння електричного стану якірної обмотки синхронного генератора визначається за формулою:

$$\dot{U}_{\text{ном}} = \dot{E}_0 - jx_d \dot{I}_{\text{ном}}$$

де: $\dot{E}_{\text{ном}}$ – електрорушійна сила, що наводиться в обмотці статора полем збудження;

x_d – синхронний індуктивний опір генератора.

Схему заміщення фази синхронного турбогенератора показано на рисунку 3.1.

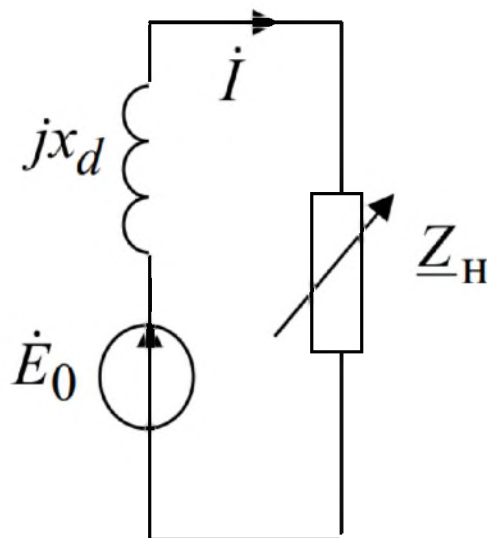


Рисунок 3.1 – Схема заміщення синхронного турбогенератора

Стандартна векторна діаграма фази синхронного турбогенератора представлена на рисунку 3.2.

мережі живлення $U_{\text{ном}}$ і постійному моменті на валу турбогенератора $M=\text{const}$, де: I – струм обмотки статора; I_z – струм обмотки збудження.

До вихідних даних синхронної машини належать такі величини:

- тип синхронного турбогенератора;
- номінальна частота обертання ротора синхронного турбогенератора $n_{\text{ном}}$;
- номінальна повна потужність синхронного турбогенератора $S_{\text{ном}}$;
- номінальна активна потужність синхронного турбогенератора $P_{\text{ном}}$;
- номінальна лінійна напруга обмотки статора турбогенератора $U_{\text{ном}}$;
- номінальний коефіцієнт потужності синхронного турбогенератора $\cos\varphi_{\text{ном}}$;
- номінальний струм статора $I_{\text{ном}}$;
- спосіб з'єднання обмоток статора;
- номінальний коефіцієнт корисної дії синхронної турбогенератора $\eta_{\text{ном}}$;
- синхронний індуктивний опір x_d у відносних одиницях.

Відповідно до вихідних даних дипломного проекту необхідно виконати наступні завдання:

1. Розрахувати механічну потужність та момент, що розвивається приводною турбіною.
2. Визначити кількість пар полюсів синхронного турбогенератора, вважаючи, що він виробляє електрорушійну силу промислової частоти $f=50$ Гц.
3. Вважаючи, що характеристика холостого ходу синхронного турбогенератора лінійна, розрахувати та побудувати сімейство кутових характеристик $M=f(\theta)$ при різних струмах збудження.
4. Побудувати сімейство векторних діаграм синхронного турбогенератора при постійному номінальному моменті приводної турбіни та різних струмах збудження.
5. На підставі векторних діаграм побудувати у відносних одиницях U -подібну характеристику синхронного турбогенератора $I=f(I_B)$. Проаналізувати

можливості регулювання реактивної потужності синхронного турбогенератора, що працює паралельно з потужною мережею.

У типорозмірі синхронного турбогенератора введено такі позначення: «Т» або «ТГ» – синхронний турбогенератор; «В» – водяне охолодження; «ВВ» або «В» – воднево-водяне охолодження обмоток; «ВФ» – водневе форсоване охолодження; «ВМ» – водомасляне охолодження; «ЗВ» – тричі водяне охолодження (ротор, статор, сердечник); «С» – синхронний турбогенератор спеціального виконання. Число після першого дефісу – номінальна активна потужність синхронного турбогенератора, МВт; число після другого дефісу – кількість полюсів машини; «Е» – приналежність синхронного турбогенератора до єдиної уніфікованої серії; «М» – модифікація; літери «У» або «Т» – кліматичне виконання синхронного турбогенератора («У» – для роботи синхронного турбогенератора в районах з помірним кліматом; «Т» – з тропічним кліматом); цифра 3 – для роботи турбогенератора у закритих приміщеннях з природною вентиляцією.

Літерою «В» позначено водневе охолодження; «М» – масляне охолодження; «Н» – безпосереднє охолодження; «К» – непряме охолодження; «Повітря» – Повітряне охолодження; «Водою» – водяне охолодження [7-8].

Відповідно завдання для розрахунку приймаємо наступний турбогенератор з такими параметрами:

- тип синхронного турбогенератора: Т-6-2У3;
- номінальна синхронна частота обертання ротора турбогенератора $n_{\text{НОМ}}=3000$ об/хв;
- номінальна повна потужність синхронного турбогенератора $S_{\text{НОМ}}=7,5$ МВА;
- номінальна активна потужність синхронного турбогенератора $P_{\text{НОМ}}=6$ МВт;
- номінальна лінійна напруга обмотки статора турбогенератора $U_{\text{НОМ}}=6,3$ кВ;

– номінальний коефіцієнт потужності (навантаження – активноіндуктивне)

$$\cos\varphi_{\text{ном}}=0,8;$$

– номінальний струм обмотки статора $I_{\text{ном}} = 0,68 \text{ кА};$

– номінальний коефіцієнт корисної дії синхронного турбогенератора $\eta_{\text{ном}}=0,976;$

– синхронний індуктивний опір у відносних одиницях $x_d^*=1,651 \text{ в.о.}$

Механічна потужність, що підводиться до валу турбогенератора, визначається таким виразом:

$$P_{\text{мех}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\eta_{\text{ном}}} = \frac{6 \cdot 10^6}{0,976} = 6,148 \cdot 10^6 \text{ Вт}$$

Тоді момент, що розвивається турбіною,

$$M_{\text{мех}} = \frac{P_{\text{мех}}}{\Omega} = \frac{6,148 \cdot 10^6}{314} = 1,958 \cdot 10^4 \text{ Нм}$$

де: Ω – синхронна частота обертання ротора синхронного турбогенератора, виражена в рад/с.:

$$\Omega = \frac{\pi \cdot n}{30} = \frac{3,14 \cdot 3000}{30} = 314 \text{ рад/с}$$

При стандартній частоті напруги мережі дорівнює $f= 50 \text{ Гц}$ число пар полюсів синхронного турбогенератора при заданій частоті обертання ротора визначиться за такою формулою:

$$p = \frac{60 \cdot f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{3000} = 1$$

Абсолютне значення синхронного індуктивного опору визначимо через базовий опір турбогенератора та синхронне індуктивний опір у відносних одиницях:

$$x_d = x_d^* \cdot Z_6 = 1,651 \cdot 5,355 = 8,842 \text{ Ом}$$

де базовий опір:

$$Z_6 = \frac{U_{\text{фном}}}{I_{\text{фном}}} = \frac{6,3 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 0,68 \cdot 10^3} = 5,355 \text{ Ом}$$

За другим законом Кірхгофа з рівняння рівноваги напруг статорного контуру визначимо електрорушійну силу синхронного турбогенератора, що наводиться в обмотці статорної обмоткою збудження:

$$\dot{U}_{\text{ном}} = \dot{E}_0 - jx_d \dot{I}_{\text{ном}}$$

$$\dot{E}_0 = \dot{U}_{\text{ном}} + jx_d \dot{I}_{\text{ном}}$$

У розрахунках приймаємо початкову фазу номінальної фазної напруги $\Psi_u = 90^\circ$. Тоді електрорушійна сила, що наводиться в обмотці статора синхронного турбогенератора, визначиться так:

$$\begin{aligned} \dot{E}_0 = \dot{U}_{\text{ном}} + jx_d \dot{I}_{\text{ном}} &= \frac{6,3 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \cdot e^{j90^\circ} + 8,842 \cdot e^{j90^\circ} \cdot 0,68 \cdot 10^3 \cdot e^{j(90^\circ - \varphi_{\text{ном}})} = \\ &= 8690 \cdot e^{j114^\circ} \text{ В} \end{aligned}$$

де: $\varphi_{\text{ном}} = \arccos 0,8 = 36,5^\circ$

Кутова характеристика синхронного турбогенератора $M(\theta)$ запишеться наступним виразом:

$$\begin{aligned} M &= \frac{3 \cdot U_{\text{фном}} \cdot E_0}{\Omega \cdot x_d} \cdot \sin\theta = \\ &= \frac{3 \cdot 3,642 \cdot 10^3 \cdot 8960 \cdot 10^3}{314 \cdot 8,842} \cdot \sin\theta = \\ &= 34,15 \cdot \sin\theta \end{aligned}$$

Максимальний електромагнітний момент, що характеризує межу статичної стійкості синхронного генератора, виражається амплітудним значенням кутової характеристики:

$$M_{\text{max}} = \frac{3 \cdot U_{\text{фном}} \cdot E_0}{\Omega \cdot x_d} = \frac{3 \cdot 3,642 \cdot 10^3 \cdot 8960 \cdot 10^3}{314 \cdot 8,842} = 34,15 \cdot 10^3 \text{ Нм}$$

Номінальний момент при номінальному куті навантаження:

$$\theta_{\text{ном}} = \psi_{E_0} - \psi_{U_{\text{ном}}} = 114^\circ - 90^\circ = 24^\circ$$

визначається таким чином:

$$M_{\text{ном}} = M_{\text{max}} \cdot \sin\theta_{\text{ном}} = 34,15 \cdot 10^3 \cdot \sin 24^\circ = 13,89 \cdot 10^3 \text{ Нм}$$

У припущенні, що у ненасиченому режимі характеристика холостого ходу синхронного турбогенератора лінійна ($E_0 = kI_b$), Побудуємо сімейство кутових характеристик для різних струмів збудження при постійному номінальному моменті на валу.

Кутові характеристики синхронного турбогенератора при різних струмах збудження наведені в таблиці 3.1 та на рисунку 3.3.

Таблиця 3.1. – Кутові характеристики синхронного турбогенератора при різних струмах збудження

θ	град.	$I_B^* = \frac{I_B}{I_{B\text{НОМ}}}$	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
$M \cdot 10^3$	Нм	$I_B^* = 1,0$	0	17,08	29,57	34,15	29,57	17,08	0
		$I_B^* = 0,54$	0	9,22	15,97	18,44	15,97	9,22	0
		$I_B^* = 0,43$	0	7,34	12,72	14,68	12,72	7,34	0

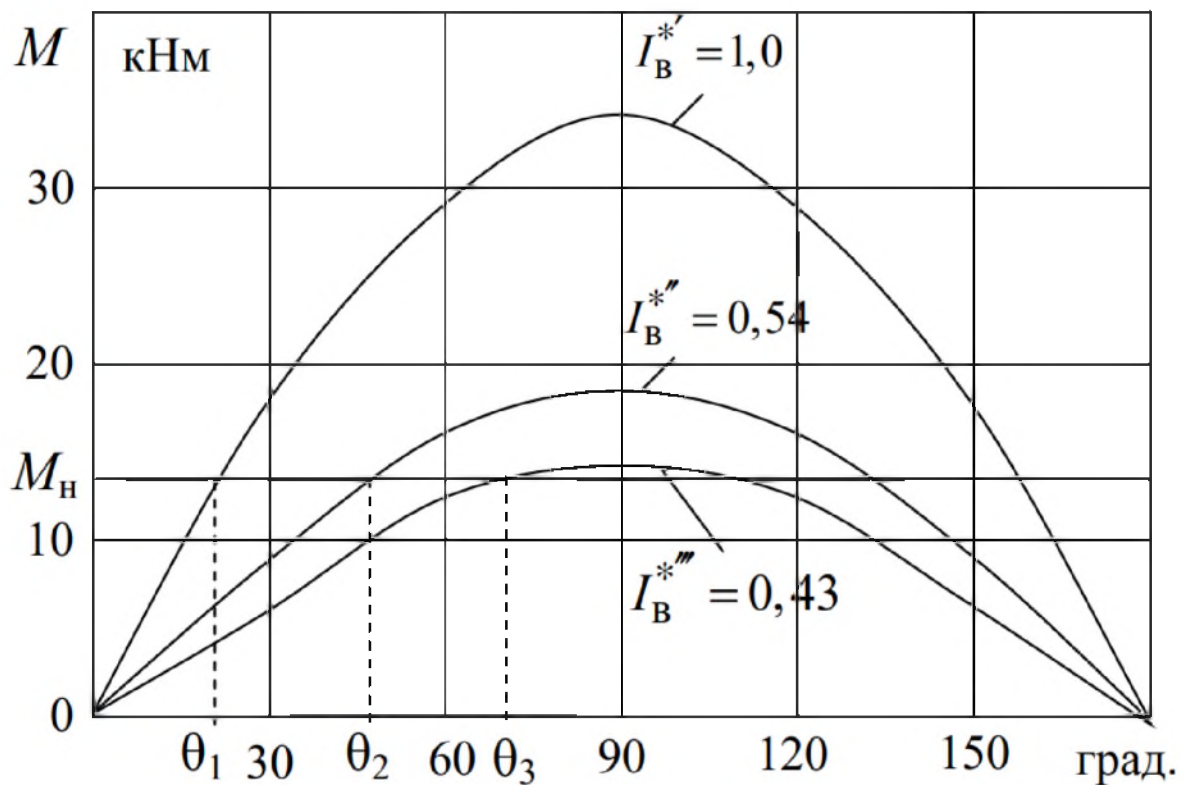


Рисунок 3.3 – Кутові характеристики синхронного турбогенератора

Регулює реактивну потужність синхронного турбогенератора при роботі його паралельно з потужною мережею шляхом зміни струму обмотки збудження при постійному моменті на валу турбогенератора здійснюється за такими умовами:

$$I \cdot \cos\varphi = \text{const};$$

$$E_0 \cdot \sin\theta = \text{const}.$$

Побудуємо на комплексній площині сімейство векторних діаграм синхронного турбогенератора, що відповідають цим умовам. (Сімейство векторних діаграм синхронного турбогенератора при різних струмах збудження та постійному моменті на валу представлено рисунку 3.4.).

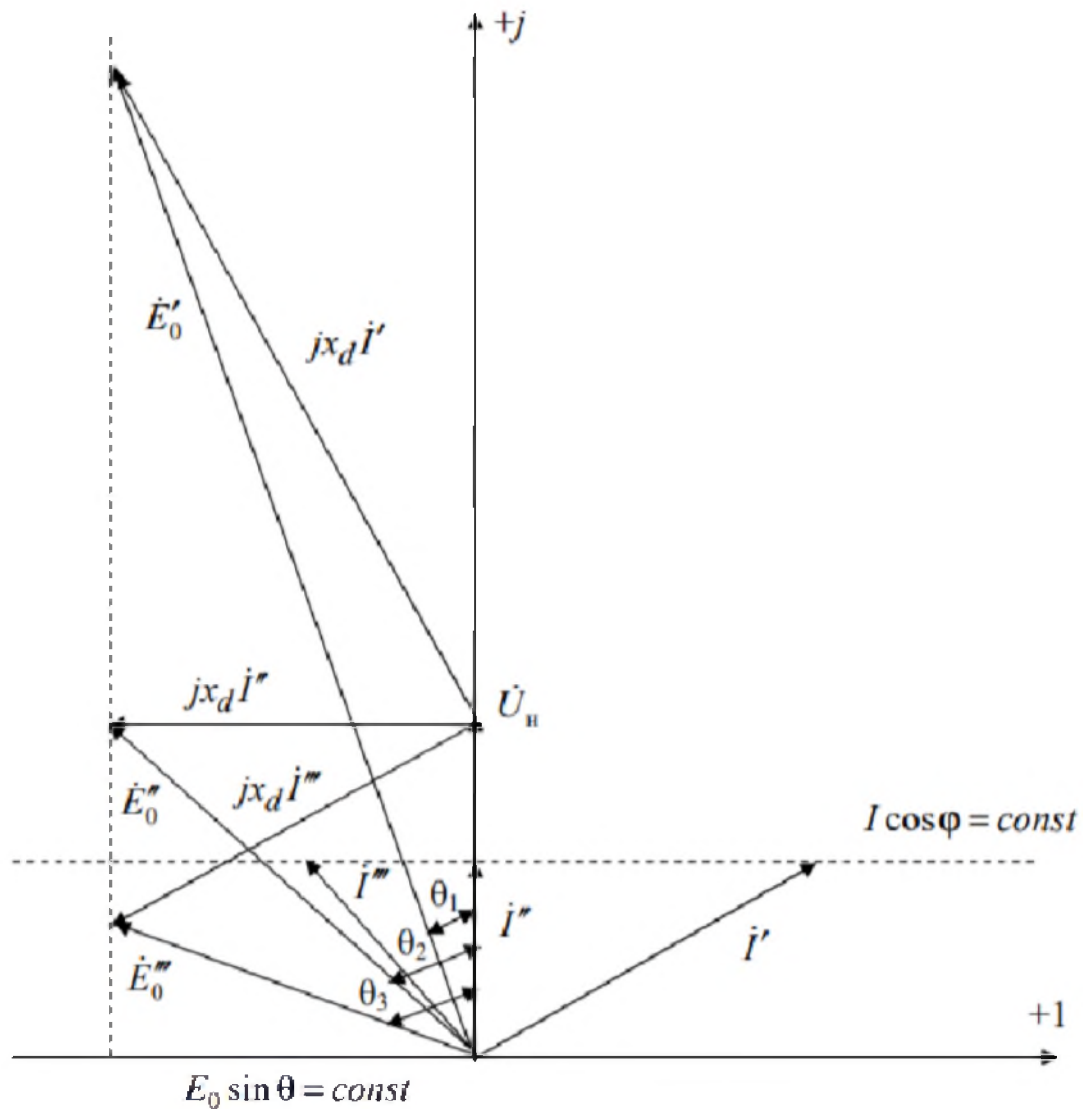


Рисунок 3.4 – Сімейство векторних діаграм синхронного турбогенератора при різних струмах збудження

Приймаючи струм обмотки статора I' і струм обмотки збудження I' за одиницю, побудуємо виходячи з векторних діаграм U – образну характеристику синхронного турбогенератора. Вид U – образної характеристики представлений рисунку 3.5.

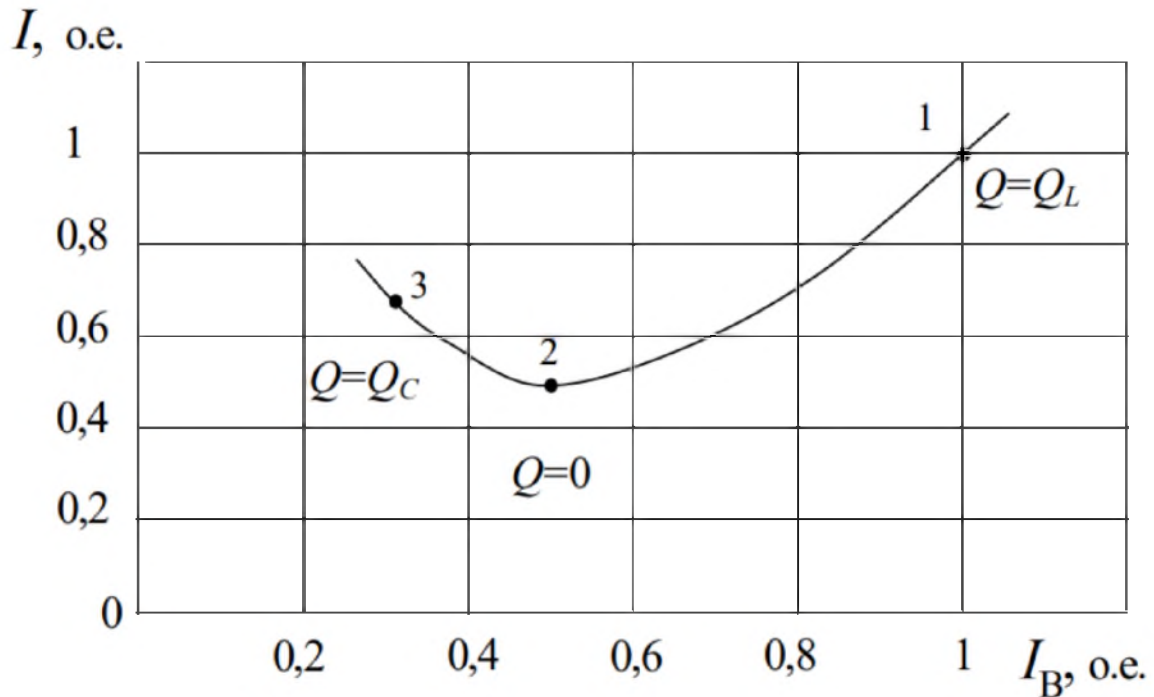


Рисунок 3.5 – U – подібна характеристика синхронного турбогенератора

На U – образній характеристиці мінімум свідчить про коефіцієнт потужності рівний одиниці. У цьому режимі синхронний турбогенератор віддає до мережі лише активну потужність ($\varphi = 0^\circ$). Ліва гілка характеристики відповідає виробленню синхронним генератором активно-ємнісної потужності ($\varphi < 0^\circ$), права гілка – активноіндуктивна ($\varphi > 0^\circ$).

ВИСНОВКИ

Загалом при написанні дипломної роботи було:

1. Розраховано механічну потужність та момент, що розвивається приводною турбіною.
2. Визначено кількість пар полюсів синхронного турбогенератора, вважаючи, що він виробляє електрорушійну силу промислової частоти $f=50$ Гц.
3. Вважаючи, що характеристика холостого ходу синхронного турбогенератора лінійна, розраховано та побудувати сімейство кутових характеристик $M=f(\theta)$ при різних струмах збудження.
4. Побудовано сімейство векторних діаграм синхронного турбогенератора при постійному номінальному моменті приводної турбіни та різних струмах збудження.
5. На підставі векторних діаграм побудовано у відносних одиницях U-подібну характеристику синхронного турбогенератора $I=f(I_B)$. Проаналізовано можливості регулювання реактивної потужності синхронного турбогенератора, що працює паралельно з потужною мережею.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. К 33 Кевшин А. Г., Федосов С. А, Галян В. В. Електричні машини: конспект лекцій. Луцьк, 2020. 62 с.
2. Мілих В.І. та ін. Д70 Дослідження синхронних машин: лаб. практикум / В.І. Мілих, Б.О. Єгоров, Г.Г. Єгорова, А.Г. Мірошніченко, В.Д. Юхимчук; за ред. В.І. Мілих. – Харків: НТУ «ХПІ», 2010.– 117 с.
3. Operation and Maintenance of Large Turbo Generators, by Geoff Klempner and Isidor Kerszenbaum. ISBN 0-471-61447-5 Copyright 2004 John Wiley & Sons, Inc.
4. Макаричев Ю.А. М15 Синхронные машины: учеб. пособ./Ю.А. Макаричев, В.Н. Овсянников. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2011. – 152 с.: ил.
5. Яцун, М.А. Електричні машини : підручник / М.А. Яцун . — Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2011 . — 464 с. — ISBN 978-617-607-048-1.
6. Титаренко, М.В. Електротехніка : навч. посіб. / М.В. Титаренко . — К. : Кондор, 2021 . — 240 с. — ISBN 966-7982-32-7.7.
7. Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни “Електричні машини”. Розділ “Синхронні машини” для студентів освітньо-кваліфікаційного рівня “бакалавр” напряму підготовки 6.050702 "Електромеханіка" / Уклад.: Ю.М. Васьківський, О.А. Гераскін. - К.: НТУУ "КПІ", 2014. - 45 с.
8. Текст лекцій з дисципліни «Електричні машини» Частина 2 Машини змінного струму (для студентів усіх форм навчання напряму підготовки 6.050701 – Електротехніка та електротехнології, 6.050702 – Електромеханіка) / М. Л. Глебова, О. В. Дорохов, В. Б. Фінкельштейн, Я. Б. Форкун; Вінниця. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. - Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2016 — 86 с.

ДОДАТОК А.

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЕКСПЛУАТАЦІЇ

1. Загальні положення

1.1. Інструкція з охорони праці для електрика при виконанні робіт з ремонту та обслуговування електроустаткування розроблена відповідно до Закону України «Про охорону праці» (Постанова ВР України від 14.10.1992 № 2694-XII) в редакції від 20.01.2018 р, на основі «Положення про розробку інструкцій з охорони праці», затвердженого Наказом Комітету з нагляду за охороною праці Міністерства праці та соціальної політики України від 29 січня 1998 року № 9 в редакції від 01 вересня 2017 року, з урахуванням «Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів», затвердженими наказом Міністерства па та енергетики 25.07.2006 р. № 258 (у редакції наказу Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 13.02.2012 р. №91, «Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів»), затверджених наказом Держнаглядохоронпраці України від 09.01.1998 р. № 4.

1.2. Усі положення даної інструкції з охорони праці поширюються на електриків освітньої установи, які виконують роботи з ремонту та обслуговування електроустаткування.

1.3. До самостійного виконання робіт з ремонту та обслуговування електричного обладнання допускаються особи не молодші 18 років, які пройшли навчання за фахом, а також:

- 1) медичний огляд і не мають протипоказань за станом здоров'я до виконання даної роботи;
- 2) вступний та первинний на робочому місці інструктажі з охорони праці;
- 3) навчання безпечним методам та прийомам праці;
- 4) перевірку знань правил улаштування електроустановок, правил безпеки при експлуатації електроустановок, вимог охорони праці;

5) при ремонті та обслуговуванні електрообладнання напругою до 1000В мають групу з електробезпеки не нижче III, а понад 1000В - не нижче IV.

1.4. Електрику необхідно знати та виконувати вимоги інструкції з охорони праці під час виконання робіт з ремонту та обслуговування електроустаткування, інструкцій з роботи з ручним інструментом, електричним інструментом та стрем'янками.

1.5. Електрику при виконанні робіт з ремонту та обслуговування електроустаткування слід дотримуватися вимог Правил безпечної експлуатації електричних установок споживачів та Правил технічної експлуатації електричних установок споживачів, і мати відповідну групу з електробезпеки згідно з вимогами цих Правил.

1.6. Виконуючи роботи з ремонту та обслуговування електричного обладнання, може спостерігатися вплив нижчеперелічених шкідливих та небезпечних виробничих факторів:

- 1) падіння з висоти;
- 2) ураження електричним струмом;
- 3) підвищена напруженість електричного поля;
- 4) підвищена запиленість повітря робочої зони;
- 5) підвищений рівень вібрації;
- 6) недостатня освітленість робочої зони;
- 7) фізичні перевантаження;
- 8) нервно-психічні перевантаження.

1.7. Електрику при виконанні ремонту та обслуговування електроустаткування необхідно використовувати наведені нижче ЗІЗ:

- 1) напівкомбінезон бавовняний – на 12 місяців;
- 2) рукавички на – 3 місяці;
- 3) черевики шкіряні на - 24 місяці;
- 4) калоші діелектричні - чергові;
- 5) рукавиці діелектричні - чергові;
- 6) коврики діелектричні - чергові.

1.8. Електрик при ремонті та обслуговуванні електрообладнання зобов'язань:

- 1) тримати в чистоті та порядку своє робоче місце;
- 2) дотримуватися Правил внутрішнього трудового розпорядку;
- 3) вміти застосовувати засоби індивідуального, колективного захисту, засоби пожежогасіння;
- 4) вміти надавати першу допомогу потерпілим від нещасних випадків;
- 5) знати та виконувати всі вимоги нормативних актів з охорони праці, правил протипожежної захисту та виробничої санітарії.
- 6) негайно повідомляти свого безпосереднього керівника про будь-який нещасний випадок, що трапився на виробництві, про ознаки професійного захворювання, а також про ситуацію, яка створює загрозу життю та здоров'ю людей;
- 7) знати терміни випробування захисних засобів та пристосувань, правила експлуатації, догляду та користування ними. Не дозволяється використовувати захисні засоби та пристосування з простроченим терміном перевірки;
- 8) виконувати лише доручену роботу;
- 9) дотримуватися вимог інструкцій з експлуатації обладнання;
- 10) знати, де знаходяться засоби надання допомоги, первинні засоби пожежогасіння, головні та запасні виходи, шляхи евакуації у разі аварії або пожежі;
- 11) знати номери телефонів медичної установи (103) та пожежної охорони (101).

1.9. Електрик може відмовитися від виконання дорученої йому роботи, якщо виникла виробнича ситуація, яка становить загрозу для його життя і здоров'я оточуючих, або для довкілля, і доповісти про це своєму прямому керівнику.

1.10. На робочому місці заборонено курити, вживати алкогольні напитки та інші речовини, що надають наркотичну дію на організм людини.

1.11. З метою запобігання отримання травм і виникнення травмонебезпечних ситуацій слід дотримуватися нижчеперелічених вимог:

- 1) не можна залучати до роботи сторонніх осіб;
- 2) не починати роботу у разі відсутності умов для її безпечного виконання;
- 3) виконувати роботу тільки на справному обладнанні, зі справними пристроями та інструментом;
- 4) виявивши несправність терміново доповісти безпосередньому керівнику або усунути їх власними силами, якщо це не відноситься до посадових обов'язків;
- 5) не торкатися неізольованих чи пошкоджених проводів;
- 6) не виконувати роботу, яка не входить до професійних обов'язків.

1.12. Вміти надавати першу допомогу при кровотечах, переломах, опіках, ураженнях електричним струмом, раптовому захворюванні чи відруєнні.

1.13. Дотримуватися правил особистої гігієни:

- 1) верхній одяг, головний убір та інші особисті речі слід залишати у гардеробі;
- 2) працювати в чистій спецодязі;
- 3) приймати їжу у призначеному для цього місці.

1.14. Вміти правильно користуватися ЗІЗ та засобами колективної захисту, первичними засобами пожежогасіння, протипожежним інвентарем, знати, де вони знаходяться.

1.15. Особи, які порушили цю інструкцію з охорони праці для електрика при виконанні робіт з ремонту та обслуговування електроустаткування, несуть дисциплінарну, адміністративну, матеріальну та кримінальну відповідальність відповідно до чинного законодавства України.

2. Вимоги безпеки перед початком роботи

2.1. Одягнути спецодяг, провести огляд та підготовку робочого місця, прибрати лишні предмети.

2.2. Видалити із зони проведення робіт сторонніх осіб та звільнити робоче місце від сторонніх матеріалів та інших предметів, обгородити робочу зону та встановити знаки безпеки.

2.3. Переконатися у достатньому освітленні робочого місця, відсутність електричної напруги на відремонтованому обладнанні.

2.4. Оглянути на справність вимикачі, розетки електричної мережі, електровілок, електричних проводів, з'єднувальних кабелів, переконатися в наявності та справності ЗІЗ (засобів індивідуальної захисту) та попереджувальних пристроїв (рукавичок діелектричних, окулярів захисних, калош, ковриків тощо).

2.5. Виконуючи роботи з інструментом необхідно упевнитися в його справності, у відсутності механічних пошкоджень ізоляційного покриття та у своєчасності проходження випробувань інструменту.

2.6. Провести перевірку робочого місця на відповідність вимогам пожежної безпеки, на достатність освітлення робочого місця.

2.7. Виявивши недоліки та порушення з питань електричної та пожежної безпеки, негайно доповісти своєму безпосередньому керівнику.

3. Вимоги безпеки під час виконання робіт

3.1. Виконуючи посадові обов'язки, електрик зобов'язаний мати при собі посвідчення перевірки знань з питань охорони праці. За відсутності посвідчення або наявності посвідчення зі строком перевірки, працівник не отримує допуску до роботи.

3.2. Роботи в електричних установках щодо заходів безпеки поділяються на 3 категорії:

- 1) зі зняттям напруги;
- 2) без зняття напруги на струмопровідних частинах або біля них;
- 3) без зняття напруги віддалік від струмопровідних частин, що перебувають під напругою.

3.3. Працівники, які виконують спеціальні види робіт, до яких висуваються додаткові вимоги безпеки, повинні бути навчені безпечному проведенню таких робіт і мати на це відповідний запис у посвідченні про перевірку знань.

3.4. Працівникові, який обслуговує закріплені за ним електричні установки напругою до 1000 В одноособово, необхідно мати III групу з електробезпеки.

3.5. Виконуючи роботи в електричних установках потрібно проводити організаційні заходи, що забезпечують безпеку робіт:

- 1) оформляти роботи нарядом-допуском, розпорядженням відповідно до переліку робіт, що виконуються у порядку поточної експлуатації;
- 2) проводити підготовку робочих місць;
- 3) допуск на роботу;
- 4) здійснювати контроль за виконанням робіт;
- 5) переводити на інше робоче місце;
- 6) установлювати перерви у роботі та її закінчення.

3.6. Для підготовки робочого місця до роботи, що вимагає зняття напруги, необхідно застосувати, у певному порядку, наведені нижче технічні заходи:

- 1) виконати необхідні відключення та вжити всіх заходів, що виключають хибне або самовільне включення комутаційної апаратури;
- 2) розвісити заборонні плакати на приводах ручного та на ключах дистанційного керування комутаційною апаратурою;
- 3) провести перевірку на відсутність напруги на струмопровідних частинах, які повинні бути заземлені для захисту людей від ураження електричним струмом;
- 4) встановити заземлення (включити заземлюючі ножі, застосувати переносні заземлення);
- 5) встановити огорожі, якщо необхідно, близько робочих місць або струмоведучих частин, що залишилися під напругою, а також вивісити на цих огорожах плакати безпеки;
- 6) в залежності від місцевих умов, струмовідні частини обгородити до чи після їх заземлення.

3.7. Працювати без зняття напруги на струмопровідних частинах або поблизу них слід як мінімум двом працівникам, одному з них, керівнику робіт, необхідно мати групу IV; іншим групу III з обов'язковим оформленням роботи нарядом-допуском або розпорядженням.

3.8. При знятті та встановленні запобіжників під напругою в електроустановках напругою до 1000 В слід заздалегідь відключити всі навантаження, які підключені до зазначених запобіжників; використовувати при цьому ізолюючі кліщі або діелектричні перчатки, а якщо є відкриті плавкі вставки, то і захисні окуляри.

3.9. Роботу з використанням стремінок потрібно проводити вдвох, один із працівників повинен перебувати знизу. Стояти на ящиках чи інших предметах забороняється. При установці приставних стремінок на балках, елементах металевих конструкцій і т. п. слід надійно закріпити верхню та нижню частину стреміанки на конструкціях.

3.10. Під час обслуговування та ремонту електричних установок користуватися металевими стреміанками забороняється.

4. Вимоги безпеки після закінчення робіт з ремонту та обслуговування електроустаткування

4.1. Відключити (від'єднати) необхідне електрообладнання, електроінструмент від мережі.

4.2. Навести порядок на робочому місці, прибрати у спеціальні місця деталі, матеріал, сміття та відходи.

4.3. Прибрати у відведене місце весь інструмент та пристосування.

4.4. Зняти і прибрати спецодяг, ЗІЗ, тщательно помити руки.

4.5. Провести огляд робочого місця на відповідність його всім вимогам протипожежної захисту.

4.6. Повідомити свого безпосереднього керівника про недоліки і несправності, які були під час виконання роботи. Зафіксувати це у оперативному журналі.

5. Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях

5.1. У разі пожежі:

1) виключити електричне обладнання, припливно-витяжну вентиляцію, якщо вона є;

2) повідомити в пожежну частину за телефоном 101 і доповісти про це своєму керівнику, а за його відсутності іншій посадовій особі;

3) приступити до ліквідації осередку загоряння, застосовуючи передбачені для цього засоби пожежогасіння. Виконувати гасіння електричного обладнання, що знаходиться під напругою, можна тільки вуглекислотними вогнегасниками типу ОУ або піском. Гасити їх водою або пінним вогнегасником забороняється.

5.2. Електрик повинен пам'ятати, що при раптовому відключенні напруги, вона може бути подана знову без попередження.

5.3. Слід швидко відключити механізми та пристрої:

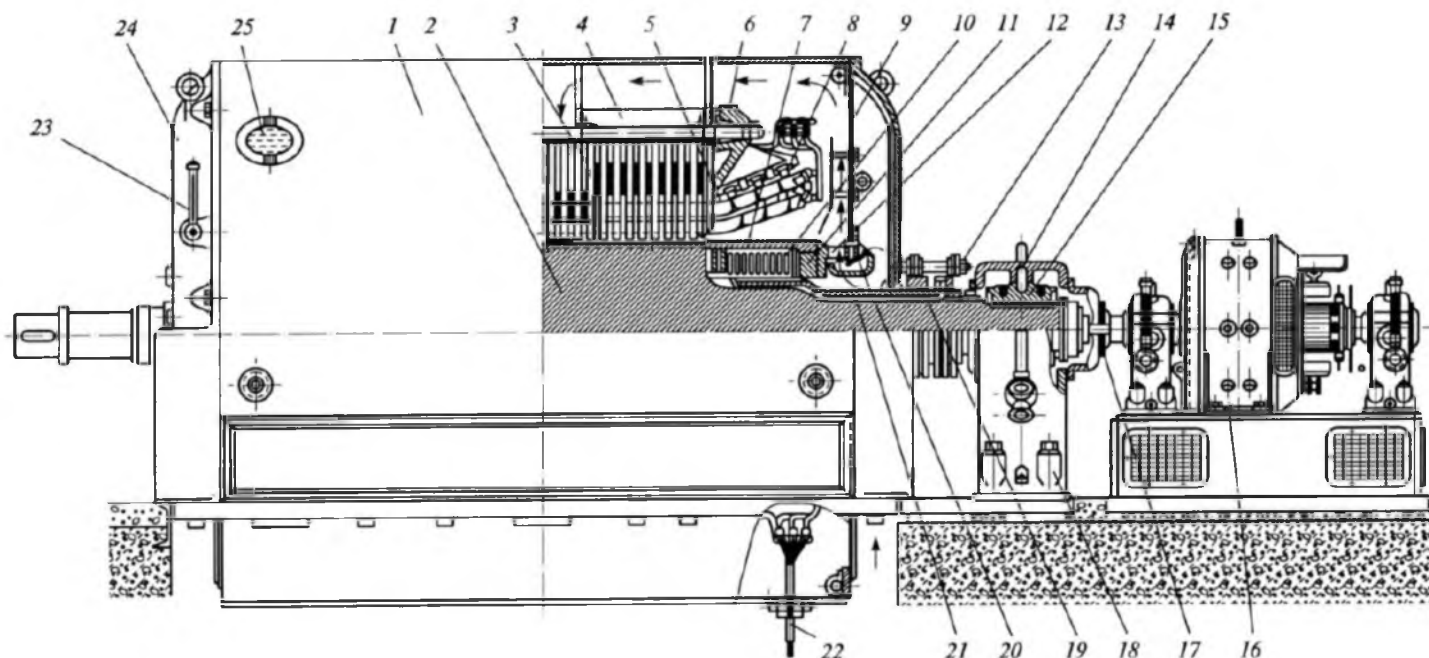
- 1) у разі раптового відключення електроенергії;
- 2) якщо подальша їх робота загрожує безпеці працівників;
- 3) у разі відчуття дії електричного струму при торканні металевих частин пускової апаратури;
- 4) у разі іскріння;
- 5) при найменших ознаках загоряння, появі диму, запаху гару;
- 6) якщо з'явився незнайомий шум.

5.4. У разі короткого замикання в мережі електроживлення необхідно знеструмити обладнання та повідомити свого прямого керівника.

5.5. Якщо сталося ураження електричним струмом, слід звільнити потерпілого від дії електричного струму, для чого відключити електричну мережу або від'єднати потерпілого від струмопровідних частин за допомогою діелектричних захисних засобів та інших ізолюючих речей та предметів (сухий одяг, суха жердина, прогумований матеріал тощо). п.), або перерізати (перерубати) провід будь-яким інструментом із ізолюючою рукояткою, обережно, без додаткового нанесення травм потерпілому. До прибуття медпрацівника необхідно надати потерпілому першу допомогу.

5.6. При нещасних випадках (травмуванні людини) негайно повідомити про це безпосереднього керівника.

ДОДАТОК Б.

НЕЯВНОПОЛЮСНА СИНХРОННА МАШИНА (ТУРБОГЕНЕРАТОР) З НЕПРЯМИМ
ПОВІТРЯНИМ ОХОЛОДЖЕННЯМ

1 – корпус статора; 2 – магнітопровід ротора; 3 – пакет магнітопроводу статора; 4 – стяжна шпилька; 5 – стрижень обмотки статора; 6 – натискне кільце; 7 – бандажне кільце ротора; 8 – кронштейн для кріплення лобових частин статора обмотки; 9 - повітророзподільна перегородка з дифузором; 10 - котушка обмотки збудження; 11 – центруюче кільце;

12 – відцентровий вентилятор; 13 – траверса із щітковим пристроєм; 14 – кришка підшипника; 15 - вкладиш підшипника; 16 – електромашинний збудник; 17 – гнучка сполучна муфта; 18 – стояк підшипника; 19 – контактне кільце;

20 – напрямний вузол вентилятора; 21 – з'єднання між контактними кільцями та обмоткою збудження;

22 – висновки обмотки статора; 23 – термометр охолодженого повітря; 24 – торцевий щит; 25 – оглядовий люк

ДОДАТОК В.
ПЕРЕЛІК ЗАУВАЖЕНЬ НОРМОКОНТРАЛЕРА
до дипломної роботи студента групи ЕЛКзп-19
БУРЯКА Андрія Миколайовича

Позначення документа	Документ	Умовне позначення	Зміст зауваження

Дата _____