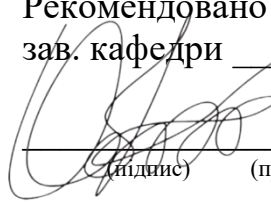




МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки
кафедра суднових електроенергетичних систем

Рекомендовано до захисту
зав. кафедри СЕЕС


Обрубов А.В.
(прізвище та ініціали)

« » 20 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»

на тему « Пристрій автоматичного включення
резервного джерела живлення »

Виконав: студент IV курсу, групи 4361
спеціальності

141. Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка

освітня програма
Електромеханіка та електроенергетика


Ісаков Д.А.
(прізвище та ініціали)

Керівник Новогрецький С.М.
(прізвище та ініціали)

Рецензент Клочков А.П.
(прізвище та ініціали)



Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Інститут _____ *ННІАЕ*
Кафедра _____ *СЕЕС*
Ступінь вищої освіти _____ *бакалавр*
Спеціальність _____ *141. Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка*
Освітня програма _____ *Електромеханіка та електроенергетика*
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Гарант освітньої програми _____
д.т.н., проф. Волянська Я.Б.

“ _____ ” _____ 20__ року

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Ісакова Дмитра Артемовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____ *Пристрій автоматичного включення резервного джерела живлення*

керівник роботи _____ *к.т.н., доцент каф. СЕЕС Новогрецький С.М.*
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “ 22 ” 04 2026 року № 1286

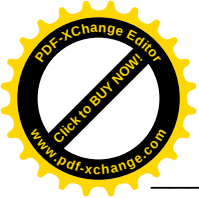
2. Строк подання студентом роботи _____ *28.05.2026*

3. Вихідні дані до роботи _____ *Синхронний явноплюсний генератор потужністю 160 кВт і частотою обертання 1000 об/хв*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) _____ *1. Проектування суднового синхронного генератора 2. Автоматичне ввімкнення резерву 3. Охорона праці*

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

_____ *1. Загальний вигляд синхронного генератора 2. Характеристики синхронного генератора 3. Принципи здійснення АВР при різних схемах живлення споживачів 4. Первинна схема АВР трансформаторів власних потреб блокових теплових електростанцій 5. Кола оперативного струму АВР трансформаторів власних потреб блокових теплових електростанцій*

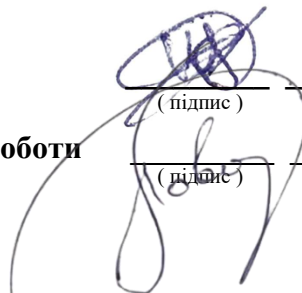
**6. Консультанти розділів роботи**

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

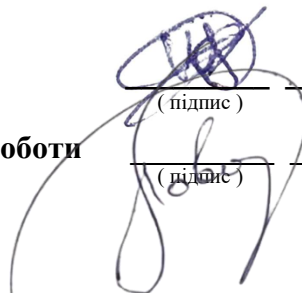
7. Дата видачі завдання _____ 02.02.2026

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Розрахунок синхронного генератора</i>	<i>09.03.2026</i>	Виконано
2	<i>Автоматичне ввімкнення резерву</i>	<i>13.04.2026</i>	Виконано
3	<i>Виконання розділу з охорони праці</i>	<i>11.05.2026</i>	Виконано
4	<i>Оформлення кваліфікаційної роботи</i>	<i>25.05.2026</i>	Виконано

Студент
(підпис)Ісаков Д.А.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи
(підпис)Новогрецький С.М.

(прізвище та ініціали)



Анотація

В даній дипломній роботі запроектований явнополюсний синхронний генератор потужністю 160 кВт та частотою обертання 1000 об/хв та розглянуто питання реалізації систем автоматичного ввімкнення резерву.

До плану роботи належать:

- 1) розрахунок явнополюсного синхронного генератора;
- 2) аналіз основних вимог до схем автоматичного ввімкнення резерву;
- 3) особливості розрахунку уставок автоматичного ввімкнення резерву;
- 4) аналіз схеми автоматичного ввімкнення резервних трансформаторів на

теплових електростанціях.

В процесі проектування синхронного генератора були розраховані його основні геометричні, масогабаритні та електромагнітні параметри. Проаналізовані питання автоматичного ввімкнення резерву. Описані заходи по опрацюванню вимог по охороні праці, що є злободенною проблемою на сьогоднішній день.

Ключові слова: резервних трансформаторів на теплових електростанціях; явнополюсний синхронний генератор

Abstract

This diploma project presents the design of a salient-pole synchronous generator with a rated power of 160 kW and a rotational speed of 1000 rpm, and considers the implementation of an Automatic Transfer Switch (ATS) system.

The scope of the project includes:

1. Design calculation of a salient-pole synchronous generator;
2. Analysis of the main requirements for Automatic Transfer Switch

					141. 4361. КРБ. ПЗ.	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		4



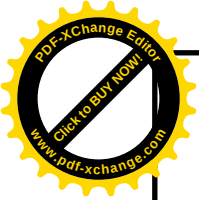
Зміст

Анотація	4
Зміст	5
Вступ	7
Розділ 1. Проектування синхронного генератора	10
1.1. Вихідні дані для розрахунку синхронного генератора.....	10
1.2. Магнітне коло машини.....	10
1.3. Сердечник статора синхронної машини	13
1.4. Розрахунок параметрів обмотки статора	14
1.5. Демпферна обмотка.....	22
1.6. Сердечник статора	23
1.7. Розрахунок магнітного кола при холостому русі.....	26
1.8. Активний і індуктивний опори розсіювання обмотки статора.....	36
1.9. Розрахунок магнітного кола при навантаженні	38
1.10. Система збудження	42
1.11. Параметри обмоток і постійні часу	46
1.12. Втрати й ККД.....	53
1.13. Тепловий розрахунок	55
1.14. Характеристики генератора.....	60
Розділ 2. Автоматичне ввімкнення резерву	68
2.1. Призначення АВР	68
2.2. Основні вимоги до схем АВР	71
2.3. Автоматичне включення резервних трансформаторів на теплових електростанціях.....	72
2.4. Розрахунок уставок АВР. Реле однократності ввімкнення	76
2.5. Пусковий орган мінімальної напруги.....	77
2.6. Пусковий орган мінімального струму і напруги.....	80

					141. 4361. КРБ. ПЗ.	Лист
						5
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



2.7. Реле контролю наявності напруги на резервному джерелі живлення	81
Розділ 3. Охорона праці.....	83
3.1 Вступ.....	83
3.2 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів, впливаючих на людину при експлуатації суднової електростанції	84
3.3 Розрахунок освітлення машинного відділення	86
3.4 Розробка заходів для забезпечення безпеки на судні	88
Висновки.....	93
Література.....	94



Вступ

Синхронна машина - це електрична машина змінного струму, частота обертання ротора якої дорівнює частоті обертання магнітного поля в повітряному зазорі.

Синхронний генератор – машина змінного струму, що перетворює механічну енергію в електричну. Принцип дії синхронного генератора заснований на явищі електромагнітної індукції. Ротор з магнітними полюсами створює обертове магнітне поле, яке, перетинаючи обмотку статора, наводить в ній ЕРС. При підключенні до генератора навантаження генератор буде джерелом змінного струму.

Синхронні машини можуть працювати як генераторами, так і двигунами.

Високий рівень надійності електропостачання споживачів забезпечують схеми живлення одночасно від двох і більше джерел (ліній, трансформаторів), оскільки аварійне відключення одного з них не призводить до зникнення напруги на виводах електроприймачів. Незважаючи на ці очевидні переваги багатостороннього живлення споживачів велику кількість підстанцій, які мають два і більше джерел живлення, працюють за схемою одностороннього живлення.

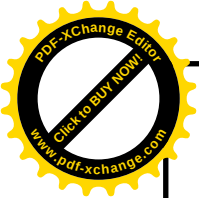
Одностороннє живлення мають також секції власних потреб електростанцій. Недоліком одностороннього живлення є те, що аварійне відключення робочого джерела призводить до припинення живлення споживачів. Цей недолік можна усунути швидким автоматичним включенням резервного джерела або включенням вимикача, на якому здійснено поділ мережі. Для виконання цієї операції широко використовуються спеціальні пристрої, що отримали назву пристроїв автоматичного включення резерву (АВР).

					141. 4361. КРБ. ПЗ.	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		7



У кваліфікаційній роботі проведений розрахунок параметрів явнопольсного синхронного генератора потужністю 160 кВт та частотою обертання 1000 об/хв. Разом з тим, розглянуті питання основних вимог до схем АВР та автоматичного включення резервних трансформаторів на теплових електростанціях, розрахунку уставок АВР.

					141. 4361. КРБ. ПЗ.	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		8



					141.4361.КРБ.ПЗ.Р01			
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Проектування синхронного генератора	Лім.	Лист	Листів
Розроб.		Ісаков Д.А.						
Керівник		Новозрецький С.М.						
Консульт.						ННІАЕ НУК		
Н. контр.								
Зав. каф.		Обрубов А.В.						



Розділ 1. Проектування синхронного генератора

1.1. Вихідні дані для розрахунку синхронного генератора

Для проектування синхронного генератора задані наступні вихідні дані:

Номінальна потужність	160000 Вт
Кількість фаз	$m_1 = 3$
Частота напруги	$f_1 = 50$ Гц
Номінальна напруга	$U_1 = 400$ В
Частота обертання	$n_1 = 1000$ об/хв.
Ступінь захисту від навколишніх впливів	IP23
Спосіб охолодження	IC01
Кількість пар полюсів	$p = 3$
Клас нагрівостійкості ізоляції	F

1.2. Магнітне коло машини

Проектування починають із визначення головних розмірів: внутрішнього діаметра D_1 і довжини сердечника статора l_1 . Головні розміри залежать від споживаної потужності, частоти обертання, а також від електромагнітних навантажень (лінійного навантаження й магнітної індукції в повітряному зазорі).

З [додатка 3, табл.9-1] обираємо значення осі обертання залежно від заданої номінальної потужності й від частоти обертання.

Висота осі обертання: $h = 355$ мм.

З [додатка 3 табл.9-2] обираємо значення зовнішнього діаметра сердечника статора:

$$D_{H1} = 660 \text{ мм.}$$

Для визначення одного з головних розмірів – внутрішнього діаметра сердечника статора D_1 можна використати залежності $D_1 = f(D_{H1})$:

$$D_1 = 0.72 \cdot D_{H1} + 43 = 0.72 \cdot 660 + 43 = 518.2 \text{ мм.}$$

					141.4361.КРБ.ПЗ.Р01	Лист
						10
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



Опір розсіювання обмотки статора обирається з [додатка 3, рис. 11-1]:

$$x'_{\sigma^*} = 0.118 \text{ в. о.}$$

Значення коефіцієнту $k_H = E_\delta / U_1$ (яка залежить головним образом від індуктивного опору розсіювання обмотки статора x'_{σ^*} (в. о.) і коефіцієнту потужності навантаження) попередньо може бути визначено по формулі:

$$k_H \approx \sqrt{\cos^2 \varphi + (\sin \varphi + x'_{\sigma^*})^2} \approx \sqrt{0.8^2 + (0.6 + 0.118)^2} \approx 1.075.$$

Попереднє значення ККД:

$$\eta' = 0.93 \text{ в. о.}$$

Розрахункова потужність:

$$P' = \frac{k_H \cdot P_2}{\cos \varphi} = \frac{1.075 \cdot 160000}{0.8} = 214991 \text{ Вт.}$$

З [додатка 3, рис. 11-3, рис. 11-3] обираємо значення:

Лінійне навантаження: $A_1 = 440 \text{ А/см.}$

Індукція в повітряному зазорі: $B'_\delta = 0.8 \text{ Тл.}$

Попереднє значення максимальної магнітної індукції в повітряному зазорі машини при х. х.:

$$B_{\delta 0} = \frac{B'_\delta}{k_H} = \frac{0.8}{1.075} = 0.744 \text{ Тл.}$$

Поліусний розподіл сердечника статора:

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_1}{2 \cdot p} = \frac{3.14 \cdot 518.2}{2 \cdot 3} = 271.329 \text{ мм.}$$

Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

141.4361.КРБ.ПЗ.Р01

Лист

11



Орієнтовно значення індуктивного опору по вздовжній вісі можна визначити з [додатка 3, рис. 11-5]:

$$x_{d*} = 2.48 \text{ в. о.}$$

Індуктивний опір реакції якоря по вздовжній осі в. о.:

$$x_{ad*} = x_{d*} - x_{\sigma} = 2.48 - 0.118 = 2.362 \text{ в. о.}$$

Коефіцієнт, що враховує наявність зазору в стику полюса й сердечника ротора або полюсного наконечника й полюса: $k = 1.06$.

Розрахункова величина повітряного зазору між полюсним наконечником і сердечником статора:

$$\delta = \frac{36 \cdot 10^{-6} \cdot \tau \cdot A_1}{x_{ad*} \cdot B_{\delta 0} \cdot k} = \frac{36 \cdot 10^{-6} \cdot 271.329 \cdot 440}{2.362 \cdot 0.744 \cdot 1.06} = 2.3 \text{ мм.}$$

У машинах з $h=355$ мм застосовують ексцентричний повітряний зазор.

Відношення максимальної величини зазору до мінімального: $\frac{\delta''}{\delta'} = 1.5$.

Повітряний зазор по осі полюса:

$$\delta' = \frac{\delta}{1.125} = \frac{2.3}{1.125} = 2.044 \text{ мм.}$$

Повітряний зазор під краєм полюсного наконечника:

$$\delta'' = \frac{\delta}{0.75} = \frac{2.3}{0.75} = 3.067 \text{ мм.}$$

Дійсний коефіцієнт полюсної дуги:

$$\alpha = 0.73 - 3.33 \cdot 10^{-5} \cdot D_{H1} = 0.73 - 3.33 \cdot 10^{-5} \cdot 660 = 0.708.$$

					141.4361.КРБ.ПЗ.Р01	Лист
						12
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



Розрахунковий коефіцієнт полюсної дуги з [3, рис.11-9]: $\alpha' = 0.68$.

1.3. Сердечник статора синхронної машини

Сердечник збирають із окремих от штампованих листів електротехнічної сталі товщиною 0,5 мм, що мають ізоляційні покриття для зменшення втрат у сталі від вихрових струмів. Виходячи зі значення висоти осі обертання вибираю марку сталі 2312, для неї використовують ізолювання листів лакуванням.

Коефіцієнт заповнення сталі: $k_c = 0.95$.

Коефіцієнт форми поля збудження: $k_B = 1.16$.

Обмотувальний коефіцієнт: $k_{об1} = 0.91$.

Розрахункова довжина сердечника статора:

$$l_1' = \frac{6.1 \cdot 10^7 \cdot P}{D_1^2 \cdot n_1 \cdot A_1 \cdot B_\delta \cdot \alpha' \cdot k_B \cdot k_{об1}} =$$
$$= \frac{6.1 \cdot 10^7 \cdot 214991}{518.2^2 \cdot 1000 \cdot 440 \cdot 0.8 \cdot 0.68 \cdot 1.16 \cdot 0.91} = 193.287 \text{ мм.}$$

Обираємо $l_1' = 230$ мм. з урахуванням перерахунків.

Відношення конструктивної довжини до внутрішнього діаметру сердечника статора:

$$\lambda = \frac{l_1}{D_1} = \frac{230}{518.2} = 0.444.$$

Доцільно щоб це відношення було меншим за $\lambda_{\max} = 1.07$ з [3, рис 11-10].

Кількість пазів на полюс і фазу обираємо $q_1 = 4$ з [3, § 11-3].

Кількість пазів сердечника статора залежить від обраної кількості на полюс і фазу.

Кількість пазів сердечника статора:

$$z_1 = 2 \cdot p \cdot m_1 \cdot q_1 = 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 3 = 72.$$

					141.4361.КРБ.ПЗ.Р01	Лист
						13
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



1.4. Розрахунок параметрів обмотки статора

Статорні обмотки синхронних машин звичайно виконують шестизонними петльовими двошаровими з м'яких секцій або із твердих катушок. При виборі типу обмоток і форми паза статора синхронної машини з різними висотами обігу варто керуватися рекомендаціями [3, табл. 9-4].

Тому обираємо двошарову обмотку у прямокутних напіввідкритих пазах.

Звичайно обмотку статора виконують шестизонній: кожна зона дорівнює 60 ел. градусів.

При шестизонній обмотці коефіцієнт розподілу дорівнює:

$$k_{p1} = \frac{0.5}{q_1 \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} = \frac{0.5}{4 \cdot \sin\left(\frac{15}{2}\right)} = 0.958,$$

$$\text{де } \alpha = \frac{60}{q_1} = 15^\circ.$$

Укорочення обмотки статора по пазах $\beta_1 = 0.8$ з [3, § 11-4].

Двошарову обмотку виконують із укороченим кроком.

Діаметральний крок:

$$y_{\text{пл}} = \frac{\beta_1 \cdot z_1}{2 \cdot p} = \frac{0.8 \cdot 72}{2 \cdot 3} = 10.$$

Коефіцієнт укорочення:

$$k_{y1} = \sin(\beta_1 \cdot 90^\circ) = \sin(0.833 \cdot 90^\circ) = 0.966.$$

Обмотувальний коефіцієнт:

$$k_{o\phi 1} = k_{p1} \cdot k_{y1} = 0.958 \cdot 0.966 = 0.925.$$

					141.4361.КРБ.ПЗ.Р01	Лист
						14
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



Попереднє значення магнітного потоку:

$$\Phi' = \frac{B_{\delta} \cdot D_1 \cdot l_1 \cdot 10^{-6}}{p} = \frac{0.8 \cdot 518.2 \cdot 230 \cdot 10^{-6}}{3} = 0.032 \text{ Вб.}$$

Попередня кількість витків в обмотці фази:

$$\omega_1' = \frac{k_H \cdot U_1}{222 \cdot k_{об1} \cdot \frac{f_1}{50} \cdot \Phi'} = \frac{1.075 \cdot 400}{222 \cdot 0.925 \cdot \frac{50}{50} \cdot 0.032 \cdot \sqrt{3}} = 38.035.$$

Виберемо число паралельних гілок обмотки статора, що повинне бути одним з дільників числа полюсів: $a_1=3$.

Попередня кількість ефективних провідників у пазу:

$$N_{п1}' = \frac{\omega_1' \cdot a_1}{p \cdot q_1} = \frac{38.035 \cdot 3}{3 \cdot 4} = 9.509.$$

Приймаємо з урахуванням округлення: $N_{п1} = 10$.

Кількість витків в обмотці фази:

$$\omega_1 = \frac{N_{п1} \cdot p \cdot q_1}{a_1} = \frac{10 \cdot 3 \cdot 4}{3} = 40.$$

Уточнене значення магнітного потоку:

$$\Phi = \Phi' \cdot \frac{\omega_1'}{\omega_1} = 0.032 \cdot \frac{38.035}{40} = 0.03 \text{ Вб.}$$

Паралельні гілки обмотки повинні містити однакова кількість витків, а сторони котушок - перебувати в магнітному полі в однакових умовах. Вибравши ціле число $N_{п1}$, уточнимо попередньо встановлені параметри

					141.4361.КРБ.ПЗ.Р01	Лист
						15
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



Уточнене значення індукції в повітряному зазорі:

$$B_{\delta} = B_{\delta}^{\cdot} \cdot \frac{\omega_1^{\cdot}}{\omega_1} = 0.8 \cdot \frac{38.035}{40} = 0.761 \text{ Тл.}$$

Попереднє значення номінального фазного струму:

$$I_1 = \frac{P_2}{\sqrt{3} \cdot U_1 \cdot \cos \varphi} = \frac{160000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0.8} = 288.675 \text{ А.}$$

Уточнене лінійне навантаження статора:

$$A_1 = \frac{10 \cdot N_{\text{пл}} \cdot z_1 \cdot I_1}{\pi \cdot D_1 \cdot a_1} = \frac{10 \cdot 10 \cdot 72 \cdot 288.675}{3.14 \cdot 518.2 \cdot 3} = 425.572 \text{ А/см.}$$

Отримане значення A_1 в даному випадку відрізняється від раніше прийнятого $A_1^{\cdot}$ не більш ніж на 15% у від'ємному напрямку, тому все відповідає нормі.

$$\left| \frac{A_1 - A_1^{\cdot}}{A_1} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{425.572 - 440}{425.572} \right| \cdot 100\% = 3.4\%.$$

Зубцевий розподіл по внутрішньому діаметрі статора:

$$t_1 = \frac{\pi \cdot D_1}{z_1} = \frac{3.14 \cdot 518.2}{72} = 22.611.$$

Обмотка статора із прямокутними напіввідкритими пазами.

Попереднє значення магнітної індукції в найбільш вузькому місці зубця вибираємо з [3, табл.9-16]: $B_{31\text{max}} = 1.8 \text{ Тл.}$

					141.4361.КРБ.ПЗ.Р01	Лист
						16
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



Зубцевий розподіл статора в найбільш вузькому місці:

$$t_{1\min} = \frac{\pi \cdot (D_1 + 2 \cdot h_{\text{ш1}} + 2 \cdot h_k)}{z_1} = \frac{3.14 \cdot (518.2 + 2 \cdot 1 + 2 \cdot 3)}{72} = 22.96 \text{ мм.}$$

де $h_{\text{ш1}} = 1 \text{ мм}$ – висота шліца, $h_k = 3 \text{ мм}$ – висота клина з [3, § 9-4].

Попередня ширина зубця в найбільш вузькому місці:

$$b_{31\min} = \frac{t_{1\min} \cdot B_\delta}{k_c \cdot B_{31\max}} = \frac{22.96 \cdot 0.761}{0.95 \cdot 1.8} = 10.2 \text{ мм.}$$

Попередня ширина відчиненого пазу в штампі:

$$b_{\text{п1}}' = t_{1\min} - b_{31\min} = 22.96 - 10.2 = 12.746 \text{ мм.}$$

Ширина шліца відчиненого паза:

$$b_{\text{ш1}} = 0.6 \cdot b_{\text{п1}}' = 0.6 \cdot 12.746 = 7.648 \text{ мм.}$$

Кількість ефективних провідників по ширині паза $N_{\text{ш}}=2$.

Загальна товщина ізоляції по висоті $h_{\text{ш1}}=4.5 \text{ мм}$ з [3, табл. 9-17].

Припуск на зборку сердечника по ширині $b_c=0.3 \text{ мм}$ з [3, § 9-4].

Загальна товщина ізоляції по ширині $b_{\text{ш1}}=1.1 \text{ мм}$ з [3, табл. 9-17].

Припустима ширина ефективного провідника по висоті паза:

$$b_{\text{еф}}' = \frac{b_{\text{п1}}' - 2 \cdot b_{\text{ш1}} - b_c}{N_{\text{ш}}} = \frac{12.746 - 2 \cdot 1.1 - 0.3}{2} = 5.123 \text{ мм.}$$

					141.4361.КРБ.ПЗ.Р01	Лист
						17
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



Кількість ефективних провідників по висоті паза:

$$N_B = \frac{N_{п1}}{N_{ш}} = \frac{10}{2} = 5 .$$

Середнє значення магнітної індукції у спинці статора $B_{c1}=1.55$ Тл з [3, § 9-4].

Попередня висота спинки статора:

$$h_{c1} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{2 \cdot k_c \cdot l_1 \cdot B_{c1}} = \frac{0.03 \cdot 10^6}{2 \cdot 0.95 \cdot 230 \cdot 1.55} = 44.618 \text{ мм.}$$

Попередня висота пазу:

$$h_{п1} = \frac{D_{H1} - D_1}{2} - h_{c1} = \frac{660 - 518.2}{2} - 44.618 = 26.282 \text{ мм.}$$

Припустима висота ефективного провідника з витковою ізоляцією:

$$a_{ef} = \frac{h_{п1} - h_{и1} - h_k - h_{ш1} - h_c}{N_B} = \frac{26.282 - 4.5 - 3 - 1 - 0.3}{5} = 3.496 \text{ мм.}$$

Площа ефективного провідника:

$$S_{ef} = a_{ef} \cdot b_{ef} = 3.496 \cdot 5.123 = 17.912 \text{ мм}^2.$$

Площа елементарного провідника й ширина елементарного провідника $S_{доп}=10 \text{ мм}^2$, $b_{доп}=4.7 \text{ мм}$ з [3, § 9-4].

					141.4361.КРБ.ПЗ.Р01	Лист
						18
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



Попередня кількість елементарних провідників:

$$c' = \frac{S'_{\text{еф}}}{S_{\text{доп}}} = \frac{17.912}{10} = 1.791 \text{ мм}^2.$$

Обираємо $c'=4$ з міркувань отримання необхідної площі елементарного провідника.

Кількість елементарних провідників в одному ефективному по ширині:

$$c_b = \frac{b'_{\text{еф}}}{b_{\text{доп}}} = \frac{5.123}{4.7} = 1.09.$$

Обираємо $c_b=4$ з міркувань отримання необхідної площі елементарного провідника.

Кількість елементарних провідників в одному ефективному по висоті паза:

$$c_a = \frac{c'}{c_b} = \frac{4}{4} = 1.$$

Загальна кількість провідників:

$$c = c_a \cdot c_b = 1 \cdot 4 = 4.$$

Двостороння товщина ізоляції $\Delta_{\text{и}} = 0.15$ мм з [3, додаток 3].

Розміри неізольованого елементарного провідника:

$$a' = \left(\frac{a'_{\text{еф}}}{c_a} \right) - \Delta_{\text{и}} = \left(\frac{3.496}{1} \right) - 0.15 = 3.346 \text{ мм};$$

					141.4361.КРБ.ПЗ.Р01	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		19



$$b = \left(\frac{b_{\text{эф}}}{c_b} \right) - \Delta_{\text{и}} = \left(\frac{5.123}{4} \right) - 0.15 = 1.131 \text{ мм.}$$

Обираємо провід з [3], $a = 3.35 \text{ мм}$, $b = 1.12 \text{ мм}$, $S = 3.537 \text{ мм}^2$.

Розмір по ширині паза в штампі:

$$b_{\text{п1}} = N_{\text{ш}} \cdot c_b \cdot (b + \Delta_{\text{и}}) + 2b_{\text{и1}} + b_c = 2 \cdot 4 \cdot (1.12 + 0.15) + 2 \cdot 1.1 + 0.3 = 12.66 \text{ мм.}$$

Уточнена ширина зубця в найбільш вузькій частині:

$$b_{31\text{min}} = t_{1\text{min}} - b_{\text{п1}} = 22.96 - 12.66 = 10.3 \text{ мм.}$$

Уточнена магнітна індукція в найбільш вузькій частині зубця статора:

$$B_{31\text{max}} = \frac{t_{1\text{min}} \cdot B_{\delta}}{b_{31\text{min}} \cdot k_c} = \frac{22.96 \cdot 0.761}{10.3 \cdot 0.95} = 1.8 \text{ Тл.}$$

Розмір основної обмотки статора по висоті паза:

$$h_{\text{п.о}} = N_{\text{В}} \cdot c_a \cdot (a + \Delta_{\text{и}}) + h_{\text{и1}} = 5 \cdot 1 \cdot (3.35 + 0.15) + 4.5 = 22 \text{ мм.}$$

Перевірка можливості розміщення обмотки й уточнена висота паза статора в штампі:

$$h_{\text{п1}} = h_{\text{п.о}} + h_k + h_{\text{ш1}} + h_c = 22 + 3 + 1 + 0.3 = 26.3 \text{ мм.}$$

Середній зубцевий розподіл статора:

$$t_{\text{ср1}} = \frac{\pi \cdot (D_1 + h_{\text{п1}})}{z_1} = \frac{3.14 \cdot (518.2 + 26.3)}{72} = 23.758 \text{ мм.}$$

					141.4361.КРБ.ПЗ.Р01	Лист
						20
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



Середня ширина котушки обмотки статора:

$$b_{cp1} = t_{cp1} \cdot y_{п1} = 23.758 \cdot 10 = 237.58 \text{ мм.}$$

Середня довжина однієї лобової частини обмотки:

$$l_{л1} = 1.3 \cdot b_{cp1} + h_{п1} + 50 = 1.3 \cdot 237.58 + 26.3 + 50 = 385.13 \text{ мм.}$$

Середня довжина обмотки:

$$l_{cp1} = 2 \cdot (l_1 + l_{л1}) = 2 \cdot (230 + 385) = 1230 \text{ мм.}$$

Довжина вильоту лобової частини обмотки:

$$l_{B1} = 0.4 \cdot b_{cp1} + \frac{h_{п1}}{2} + 25 = 0.4 \cdot 237.58 + \frac{26.3}{2} + 25 = 133.171 \text{ мм.}$$

Щільність струму в обмотці статора:

$$J_1 = \frac{I_1}{c \cdot S \cdot a_1} = \frac{288.675}{4 \cdot 3.537 \cdot 3} = 6.801 \text{ А/мм}^2.$$

Показником, що характеризує питоме теплове навантаження статора, служить добуток лінійного навантаження A_1 на щільність струму в обмотці J_1 :

$$A_1 \cdot J_1 = 425.572 \cdot 6.801 = 2894 \text{ А}^2/(\text{см} \cdot \text{мм}^2).$$

Припустимі значення $A_1 J_1$ для синхронних машин у захисному виконанні із само вентиляцією, виконаних з ізоляцією класу F , наведені в [3, рис. 11-12]. Розраховане значення задовольняє знайденому з [3, рис. 11-12].

					141.4361.КРБ.ПЗ.Р01	Лист
						21
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



1.5. Демпферна обмотка

Сумарна площа поперечного перерізу стрижнів демпферної обмотки на один полюс:

$$S_{2\Sigma} = \frac{(0.015 \cdot \tau \cdot A_1)}{J_1} = \frac{(0.015 \cdot 271.329 \cdot 425.572)}{6.801} = 254.664 \text{ мм}^2.$$

Зубцевий поділ полюсного наконечника ротора:

$$t_{2'} = 0.85 \cdot t_1 = 0.8 \cdot 22.96 = 18.368 \text{ мм}.$$

Попередня кількість стрижнів демпферної обмотки:

$$N_{2'} = 1 + \frac{b_{\text{п.н}} - 20}{t_{2'}} = 1 + \frac{192.107 - 20}{18.368} = 10.37,$$

$$N_2 = 11.$$

Попередній діаметр стрижня демпферної обмотки:

$$d_{c'} = 1.13 \cdot \sqrt{\frac{S_{2\Sigma}}{N_2}} = 1.13 \cdot \sqrt{\frac{254.664}{11}} = 5.437 \text{ мм}.$$

Площа поперечного перерізу стрижня:

$$S = \frac{\pi}{4} \cdot d_c^2 = \frac{\pi}{4} \cdot 5.437^2 = 23.274 \text{ мм}^2.$$

Уточнене значення зубцевого поділу полюсного наконечника:

$$t_2 = \frac{b_{\text{п.н}} - d_c - 2 \cdot b_{32\text{min}}}{N_2 - 1} = \frac{192.107 - 5.437 - 2 \cdot 6}{11 - 1} = 17.411 \text{ мм}.$$

					141.4361.КРБ.ПЗ.Р01	Лист
						22
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



Діаметр круглої частини паза полюсного наконечника:

$$d_{п2} = d_c + 0.1 = 5.437 + 0.1 = 6.1 \text{ мм}.$$

Висота короткозамкненого сегмента:

$$h_c = 2 \cdot d_c = 2 \cdot 5.437 = 12 \text{ мм}.$$

Довжина короткозамкненого сегмента:

$$l_c = 0.7 \cdot d_c = 0.7 \cdot 5.437 = 4.2 \text{ мм}.$$

Обираємо $h_c = 12.5 \text{ мм}$, $l_c = 4.25 \text{ мм}$, $S_c = 52.27 \text{ мм}^2$ з [3, додаток 2].

1.6. Сердечник ротора

Марка сталі для сердечника ротора приймається Ст3, без ізоляції. Товщина листів – 1,5 мм.

У синхронних машинах з $h = 315 - 450 \text{ мм}$, виконуваних з ексцентричним повітряним зазором під полюсними наконечниками, полюса виконуються з листів сталі марки Ст3 товщиною 1 – 2 мм без ізоляційного покриття й кріплять до кістяка за допомогою виступів Т – образної форми.

Сердечники роторів збирають зі штампованих багатограних сталевих листів тієї ж марки товщиною 1 – 2 мм без ізоляційного покриття (число граней сердечника відповідає числу полюсів). У цьому випадку приймають $k_c=0.98$.

Довжина сердечника ротора:

$$l_2 = l_1 + 10 = 230 + 10 = 240 \text{ мм}.$$

Довжина шихтованого сердечника полюса:

$$l_{п} = l_1 + 10 = 230 + 10 = 240 \text{ мм}.$$

					141.4361.КРБ.ПЗ.Р01	Лист
						23
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



Попереднє значення магнітного потоку в номінальному режимі:

$$\Phi = \frac{B_{\delta} \cdot D_1 \cdot l_1 \cdot 10^{-6}}{p} = \frac{0.8 \cdot 518.2 \cdot 230 \cdot 10^{-6}}{3} = 0.032 \text{ Вб.}$$

Ширина дуги полюсного наконечника:

$$b_{\text{н.п}} = \alpha \cdot \tau = 0.708 \cdot 271.329 = 192.107 \text{ мм.}$$

Радіус обрису повітряного зазору при ексцентричному повітряному зазорі:

$$R_{\text{п.н}} = \frac{D_1}{2 + \frac{8 \cdot D_1 \cdot (\delta'' - \delta')}{b_{\text{н.п}}^2}} = \frac{518.2}{2 + \frac{8 \cdot 518.2 \cdot (3.067 - 2.044)}{192.1^2}} = 245.032 \text{ мм.}$$

Ширина полюсного наконечника обумовлена хордою:

$$b'_{\text{н.п}} = 2 \cdot R_{\text{п.н}} \cdot \sin\left(\frac{0.5 \cdot b_{\text{н.п}}}{R_{\text{п.н}}}\right) = 2 \cdot 245.032 \cdot \sin\left(\frac{0.5 \cdot 192.1}{245.032}\right) = 187.224 \text{ мм.}$$

Вибираємо висоту полюсного наконечника $h'_{\text{н.п}} = 10$ мм з конструкторських міркувань.

Висота полюсного наконечника по осі полюса:

$$\begin{aligned} h_{\text{н.п}} &= h'_{\text{н.п}} + R_{\text{п.н}} - \sqrt{R_{\text{п.н}}^2 - (0.5 \cdot b'_{\text{н.п}})^2} = \\ &= 10 + 245.032 - \sqrt{245.032^2 - (0.5 \cdot 187.224)^2} = 28.587 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Поправочний коефіцієнт:

$$k_{\sigma} = 1.25 \cdot h_{\text{н.п}} + 25 = 1.25 \cdot 28.587 + 25 = 60.734.$$

					141.4361.КРБ.ПЗ.Р01	Лист
						24
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



Попереднє значення коефіцієнта магнітного розсіювання:

$$\sigma' = 1 + \frac{k_{\sigma} \cdot 35 \cdot \delta}{\tau^2} = 1 + \frac{60.734 \cdot 35 \cdot 2.3}{271.329^2} = 1.066.$$

Магнітна індукція в основі сердечника полюса $B'_{\pi} = 1.45$ Тл з [3, § 11-2].

Ширина сердечника полюса:

$$b_{\pi} = \frac{\sigma' \cdot \Phi' \cdot 10^6}{k_c \cdot l_{\pi} \cdot B'_{\pi}} = \frac{1.066 \cdot 0.032 \cdot 10^6}{0.98 \cdot 240 \cdot 1.45} = 99.383 \text{ мм.}$$

Висота виступу в підставі полюсного сердечника:

$$h_B = 0.125 \cdot b_{\pi} + 2 = 0.125 \cdot 99.383 + 2 = 126.229 \text{ мм.}$$

Попередня висота полюсного сердечника:

$$h'_{\pi} = 10.5 \cdot \delta' + 0.18 \cdot D_1 = 10.5 \cdot 2.044 + 0.18 \cdot 518.2 = 114.743 \text{ мм.}$$

Попередньо внутрішній діаметр сердечника ротора:

$$D'_2 = k_B \cdot \sqrt[3]{\frac{P_2}{n_1}} = 23.83 \cdot \sqrt[3]{\frac{160000}{1000}} = 129.369 \text{ мм,}$$

де $k_B = 23.83$ з [3, § 11-2].

Висота спинки ротора:

$$\begin{aligned} h_{c2} &= 0.5 \cdot D_1 - \delta - h'_{\pi} - h_{\pi\pi} - 0.5 \cdot D'_2 = \\ &= 0.5 \cdot 518.2 - 2.3 - 114.743 - 28.587 - 0.5 \cdot 129.369 = 48.786 \text{ мм.} \end{aligned}$$

					141.4361.КРБ.ПЗ.Р01	Лист
						25
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



Розрахункова висота спинки ротора з урахуванням проходження частини магнітного потоку по валу:

$$h_{c2}' = h_{c2} + 0.5 \cdot D_2' = 48.786 + 0.5 \cdot 129.369 = 122.8 \text{ мм.}$$

Магнітна індукція в спинці ротора:

$$B_{c2} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{2 \cdot h_{c2}' \cdot l_1 \cdot k_c} = \frac{0.032 \cdot 10^6}{2 \cdot 113.471 \cdot 230 \cdot 0.98} = 0.621 \text{ Тл.}$$

1.7. Розрахунок магнітного кола при холостому ході

Оскільки магнітне коло синхронного генератора є симетричним, то розрахунок МРС буде проводитися на один полюс. При цьому для кожної ділянки визначаються площа поперечного перетину, магнітна поля, напруженість поля, середня довжина шляху магнітного потоку, МРС ділянки та сумарна МРС.

МРС для повітряного зазору між сердечником статора й полюсним наконечником.

Розрахункова площа поперечного перерізу повітряного зазору:

$$S_{\delta} = \alpha \cdot \tau \cdot (l_1' + 2 \cdot \delta) = 0.68 \cdot 271.329 \cdot (230 + 2 \cdot 2.3) = 43280 \text{ мм}^2.$$

Уточнене значення магнітної індукції в повітряному зазорі:

$$B_{\delta} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{S_{\delta}} = \frac{0.03 \cdot 10^6}{43280} = 0.698 \text{ Тл.}$$

Коефіцієнт, що враховує збільшення магнітного опору повітряного зазору внаслідок зубчастої будови статора:

$$k_{\delta 1} = 1 + \frac{b_{\text{ш1}}}{\left(t_1 - b_{\text{ш1}} + \frac{5 \cdot \delta \cdot t_1}{b_{\text{ш1}}} \right)} = 1 + \frac{7.648}{\left(22.96 - 7.648 + \frac{5 \cdot 1.4 \cdot 22.96}{7.648} \right)} = 1.347.$$

					141.4361.КРБ.ПЗ.Р01	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		26



Загальний коефіцієнт повітряного зазору дорівнює: $k_{\delta} = 1.345$.

МРС для повітряного зазору:

$$F_{\delta} = 0.8 \cdot \delta \cdot k_{\delta} \cdot B_{\delta} \cdot 10^3 = 0.8 \cdot 2.3 \cdot 1.345 \cdot 0.698 \cdot 10^3 = 1728 \text{ А.}$$

МРС для зубців статора.

Зубовій розподіл на $1/3$ висоти зубця:

$$t_{1(1/3)} = \frac{\pi \cdot \left[D_1 + \left(\frac{2}{3} \right) \cdot h_{\text{пл}} \right]}{z_1} = \frac{3.14 \cdot \left[518.2 + \left(\frac{2}{3} \right) \cdot 26.3 \right]}{72} = 23.375 \text{ мм.}$$

Ширина зубця:

$$b_{31(1/3)} = t_{1(1/3)} - b_{\text{пл}} = 23.375 - 12.66 = 10.715 \text{ мм.}$$

Розрахункова площа поперечного перерізу зубців статора:

$$S_{31} = \frac{z_1 \cdot l'_1 \cdot b_{31(1/3)} \cdot k_c \cdot \alpha}{2 \cdot p} = \frac{72 \cdot 230 \cdot 10.715 \cdot 0.95 \cdot 0.68}{2 \cdot 3} = 19100 \text{ мм}^2.$$

Магнітна індукція в у зубці статора на відстані $1/3$ його висоти від окружності, що відповідає діаметру D_1 :

$$B_{31} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{S_{31}} = \frac{0.03 \cdot 10^6}{19100} = 1.582 \text{ Тл.}$$

Напруженість магнітного поля в зубцях статора дорівнює $H_{31} = 13.7 \text{ А/см}$ з [3, додаток 9].

Середня довжина шляху магнітного потоку:

$$L_{31} = h_{\text{пл}} = 26.282 \text{ мм.}$$

					141.4361.КРБ.ПЗ.Р01	Лист
						27
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



МРС для зубців статора:

$$F_{31} = 0.1 \cdot L_{31} \cdot H_{31} = 0.1 \cdot 26.282 \cdot 13.7 = 36.007 \text{ A.}$$

МРС для спинки статора.

Розрахункова площа поперечного перерізу спинки статора:

$$S_{c1} = h_{c1} \cdot l_1 \cdot k_c = 44.618 \cdot 230 \cdot 0.95 = 9749 \text{ мм}^2.$$

Магнітна індукція спинки статора:

$$B_{c1} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{2 \cdot S_{c1}} = \frac{0.03 \cdot 10^6}{2 \cdot 9749} = 1.55 \text{ Тл.}$$

Напруженість магнітного поля в спинці статора дорівнює $H_{c1} = 10.9 \text{ А/см}$ з [3, додаток 12].

Середня довжина шляху магнітного потоку:

$$L_{c1} = \frac{\pi \cdot (D_{н1} - h_{c1})}{4 \cdot p} = \frac{3.14 \cdot (660 - 44.618)}{4 \cdot 3} = 161.107 \text{ мм.}$$

МРС для спинки статора:

$$F_{c1} = 0.1 \cdot L_{c1} \cdot H_{c1} = 0.1 \cdot 161.107 \cdot 10.9 = 175.606 \text{ A.}$$

МРС для полюсів.

Величина виступу полюсного наконечника:

$$b''_{п} = 0.5 \cdot (b_{н.п} - b_{п}) = 0.5 \cdot (187.224 - 99.383) = 43.921 \text{ мм.}$$

					141.4361.КРБ.ПЗ.Р01	Лист
						28
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



Висота полюсного наконечника:

$$h_{\text{н}} = \frac{2 \cdot h_{\text{н.п}} + h'_{\text{н.п}}}{3} = \frac{2 \cdot 28.587 + 10}{3} = 22.391 \text{ мм.}$$

Відстань між бічними поверхнями суміжних полюсних наконечників:

$$a_{\text{н.п}} = \left[\frac{\pi \cdot (D_1 - 2 \cdot \delta'' - h'_{\text{н.п}})}{2 \cdot p} \right] - b'_{\text{н.п}} =$$
$$= \left[\frac{3.14 \cdot (518.2 - 2 \cdot 3.067 - 10)}{2 \cdot 3} \right] - 187.224 = 75.657 \text{ мм.}$$

Коефіцієнт магнітної провідності розсіювання по внутрішніх поверхнях полюсних наконечників:

$$\lambda_{\text{н.п}} = 140 \cdot \left(\frac{h_{\text{н.п}}}{a_{\text{н.п}}} - 0.25 \right) + 55 \cdot \left(\frac{b''_{\text{н.п}}}{a_{\text{н.п}}} + 0.2 \right) - 40 \cdot \left(\frac{b''_{\text{н.п}}}{a_{\text{н.п}}} - 0.5 \right)^2 =$$
$$= 140 \cdot \left(\frac{22.391}{75.657} - 0.25 \right) + 55 \cdot \left(\frac{43.921}{75.657} + 0.2 \right) - 40 \cdot \left(\frac{43.921}{75.657} - 0.5 \right)^2 = 49.103 \text{ мм.}$$

Довжина шляху магнітного потоку в полюсі при наявності демпферної обмотки:

$$L_{\text{н}} = h'_{\text{п}} + 0.5 \cdot h_{\text{н.п}} - L_{32} = 114.743 + 0.5 \cdot 28.587 - 9.1 = 119.936 \text{ мм.}$$

Коефіцієнт магнітної провідності потоку розсіювання: по потоках полюсів:

$$\lambda_{\text{п.с}} = \frac{55 \cdot h'_{\text{п}}}{\tau - b_{\text{п}} - \frac{(h'_{\text{п}} + 2 \cdot h_{\text{н.п}} + 2 \cdot \delta) \cdot \pi}{2 \cdot p}} =$$
$$= \frac{55 \cdot 114.743}{271.329 - 99.383 - \frac{(114.743 + 2 \cdot 28.587 + 2 \cdot 2.3) \cdot 3.14}{2 \cdot 3}} = 79.36.$$

					141.4361.КРБ.ПЗ.Р01	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		29



Те ж, по торцях полюсів:

$$\lambda_{\text{п.в}} = \frac{37 \cdot b_{\text{п}}}{l_{\text{п}}} = \frac{37 \cdot 99.383}{240} = 15.322.$$

Коефіцієнт магнітної провідності потоку розсіювання полюсів:

$$\lambda_{\text{п}} = \lambda_{\text{н.п}} + \lambda_{\text{п.с}} + \lambda_{\text{п.в}} = 49.103 + 79.36 + 15.322 = 143.785.$$

МРС для статора й повітряного зазору:

$$F_{\delta_{\text{зс}}} = F_{\delta} + F_{\text{з1}} + F_{\text{с1}} = 1728 + 36.007 + 175.606 = 1940 \text{ А.}$$

Магнітний потік розсіювання полюсів:

$$\Phi_{\sigma} = 4 \cdot \lambda_{\text{п}} \cdot l_2 \cdot F_{\delta_{\text{зс}}} \cdot 10^{-11} = 4 \cdot 143.785 \cdot 240 \cdot 1940 \cdot 10^{-11} = 0.0026 \text{ Вб.}$$

Коефіцієнт розсіювання магнітного потоку:

$$\sigma = 1 + \frac{\Phi_{\sigma}}{\Phi} = 1 + \frac{0.0026}{0.03} = 1.089.$$

Розрахункова площа поперечного перерізу сердечника полюса:

$$S_{\text{п}} = k_{\text{с}} \cdot l_{\text{п}} \cdot b_{\text{п}} = 0.98 \cdot 240 \cdot 99.383 = 23370 \text{ мм}^2.$$

Магнітний потік у сердечнику полюса:

$$\Phi_{\text{п1}} = \Phi + \Phi_{\sigma} = 0.03 + 0.0026 = 0.033 \text{ Вб.}$$

					141.4361.КРБ.ПЗ.Р01	Лист
						30
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



Магнітна індукція біля основи полюса:

$$B_{п1} = \frac{\Phi_{п1}}{S_{п1} \cdot 10^{-6}} = \frac{0.033}{23370 \cdot 10^{-6}} = 1.407 \text{ Тл.}$$

Магнітний потік у полюсного наконечника:

$$\Phi_{п2} = \Phi + \left(\frac{\lambda_{н.п}}{\lambda_{п}}\right) \cdot \Phi_{\sigma} = 0.03 + \left(\frac{49.103}{143.785}\right) \cdot 0.0026 = 0.031 \text{ Вб.}$$

Магнітна індукція у полюсного наконечника:

$$B_{п2} = \frac{\Phi_{п2}}{S_{п1} \cdot 10^{-6}} = \frac{0.031}{23370 \cdot 10^{-6}} = 1.332 \text{ Тл.}$$

Магнітний потік у середньому перетині полюса:

$$\Phi_{ср} = 0.5 \cdot (\Phi_{п1} + \Phi_{п2}) = 0.5 \cdot (0.033 + 0.031) = 0.032 \text{ Вб.}$$

Магнітна індукція у середньому перетині полюса:

$$B_{ср} = \frac{\Phi_{ср}}{S_{п1} \cdot 10^{-6}} = \frac{0.032}{23370 \cdot 10^{-6}} = 1.37 \text{ Тл.}$$

Напруженість магнітного поля в підстави полюса, у полюсного наконечника й у середньому перетині полюса $H_{п1}=21.6 \text{ А/см}$, $H_{п2}=17.2 \text{ А/см}$, $H_{ср}=19.2 \text{ А/см}$, з [3, додаток 21].

					141.4361.КРБ.ПЗ.Р01	Лист
						31
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



Розрахункова напруженість магнітного поля в сердечнику полюса:

$$H_{\Pi} = \frac{H_{\Pi 1} + 4 \cdot H_{\text{нсп}} + H_{\Pi 2}}{6} = \frac{21.6 + 4 \cdot 19.2 + 17.2}{6} = 9.667 \text{ А/см.}$$

МРС для полюсів:

$$F_{\Pi} = 0.1 \cdot L_{\Pi} \cdot H_{\Pi} = 0.1 \cdot 119.936 \cdot 9.667 = 115.938 \text{ А.}$$

МРС для спинки ротора.

Розрахункова площа поперечного перерізу спинки ротора:

$$S_{c2} = l_2 \cdot h_{c2} \cdot k_c = 240 \cdot 113.471 \cdot 0.98 = 26690 \text{ мм}^2.$$

Середнє значення індукції в спинці ротора:

$$B_{c2} = \frac{\sigma \cdot \Phi \cdot 10^6}{2 \cdot S_{c2}} = \frac{1.089 \cdot 0.03 \cdot 10^6}{2 \cdot 26690} = 0.616 \text{ Тл.}$$

Напруженість магнітного поля в спинці ротора $H_{c2}=5.06 \text{ А/см}$ з [3, додаток 21].

Середня довжина шляху магнітного потоку в спинці ротора:

$$\begin{aligned} L_{c2} &= \left[\frac{\pi \cdot (D_2 + 2 \cdot h_{c2})}{4 \cdot p} \right] + 0.5 \cdot h_{c2} = \\ &= \left[\frac{3.14 \cdot (129.369 + 2 \cdot 48.786)}{4 \cdot 4} \right] + 0.5 \cdot 113.471 = 116.148 \text{ мм.} \end{aligned}$$

МРС для спинки ротора:

$$F_{c2} = 0.1 \cdot L_{c2} \cdot H_{c2} = 0.1 \cdot 116.148 \cdot 5.06 = 58.771 \text{ А.}$$

					141.4361.КРБ.ПЗ.Р01	Лист
						32
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



Повітряний зазор у стику полюса:

$$\delta_{п2} = (2 \cdot l_{п} \cdot 10^{-4}) + 0.1 = (2 \cdot 240 \cdot 10^{-4}) + 0.1 = 0.148 \text{ мм.}$$

МРС для зазору в стику між сердечником полюса й полюсним наконечником:

$$F_{п2} = 0.8 \cdot \delta_{п2} \cdot B_{п} \cdot 10^3 = 0.8 \cdot 0.148 \cdot 1.37 \cdot 10^3 = 162.177 \text{ А.}$$

Загальні параметри магнітного ланцюга.

Сумарна МРС магнітного ланцюга(на полюс):

$$F_{\Sigma} = F_{\delta 33} + F_{п} + F_{с2} + F_{п2} + F_{32} = 1940 + 115.938 + 58.771 + 162.177 + 9.282 = 2286 \text{ А.}$$

Коефіцієнт насичення магнітного ланцюга:

$$k_{\text{нас}} = \frac{F_{\Sigma}}{(F_{\delta} + F_{п2})} = \frac{2286}{(1728 + 162.177)} = 1.209.$$

Характеристики намагнічування й холостого ходу.

Розрахунок характеристик $\Phi = f(F_2)$ і холостого ходу $E = f(F_2)$ може бути виконаний у фізичних або відносних одиницях. Звичайно розрахунок ведеться у відносних одиницях для декількох значень магнітного потоку в зазорі Φ^* або ЕРС E^* у межах від 0,5 до 1,3 в. о. При цьому як базове значення магнітного потоку приймають його величину $\Phi_{(1)}$ при номінальній фазній напрузі, а базове значення МРС обмотки збудження $F_{\Sigma(1)}$ при х. х. і номінальній фазній напрузі U_1 . У такому випадку характеристики вироджуються однією й тією ж кривою.

Характеристики х. х. розраховані за методикою, наведеною нижче, а результати оформлені у вигляді таблиці 1.1.

					141.4361.КРБ.ПЗ.Р01	Лист
						33
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



Магнітний потік у повітряному зазорі (Вб): $\Phi = \Phi_* \cdot \Phi_{(1)}$.

ЕРС обмотки статора (В): $E = E_* \cdot U_1$.

Магнітна індукція в повітряному зазорі (Тл): $B_\delta = \Phi_* \cdot B_{\delta(1)}$.

Сумарна МРС для спинки статора (А): $F_{c2} = F_{c2(1)} \cdot E_*$.

МРС для статора й повітряного зазору (в. о.): $F_{\delta 3c*} = \frac{F_{\delta 3c}}{F_{\Sigma(1)}}$.

Магнітний потік розсіювання полюсів (Вб): $\Phi_\sigma = 4 \cdot \lambda_\Pi \cdot l_{\Pi\Pi} \cdot F_{\delta 3c} \cdot 10^{-11}$.

Магнітний потік розсіювання полюсів (в. о.): $\Phi_{\sigma*} = \frac{\Phi_\sigma}{\Phi_{(1)}}$.

Магнітний потік у сердечнику полюса (Вб): $\Phi_{\Pi 1} = \Phi + \Phi_\sigma$.

Магнітний потік у сердечнику полюса (в. о.): $\Phi_{\Pi 1*} = \frac{\Phi_{\Pi 1}}{\Phi_{(1)}}$.

Сумарна МРС для полюса та спинки ротора (А):

$$F_{\Pi.c.} = F_\Pi + F_{c2} + F_{\Pi 2} + F_{32}.$$

Сумарна МРС для полюса та спинки ротора (в. о.): $F_{\Pi c*} = \frac{F_{\Pi c}}{F_{\Sigma(1)}}$.

Сумарна МРС магнітного ланцюга (на полюс)(А):

$$F_\Sigma = F_{\delta 3c} + F_\Pi + F_{c2} + F_{\Pi 2} + F_{32}.$$

Сумарна МРС магнітного ланцюга (на полюс) (в. о.): $F_{\Sigma*} = \frac{F_\Sigma}{F_{\Sigma(1)}}$.

Розрахункову характеристику х. х. рекомендують зрівняти з нормальною, яку будують по наступній даним:

$E_* = E / U_1$	0	0,5	1,0	1,1	1,2	1,3
$F_* = F_\Sigma / F_{\Sigma(1)}$	0	0,47	1,0	1,17	1,4	2,0

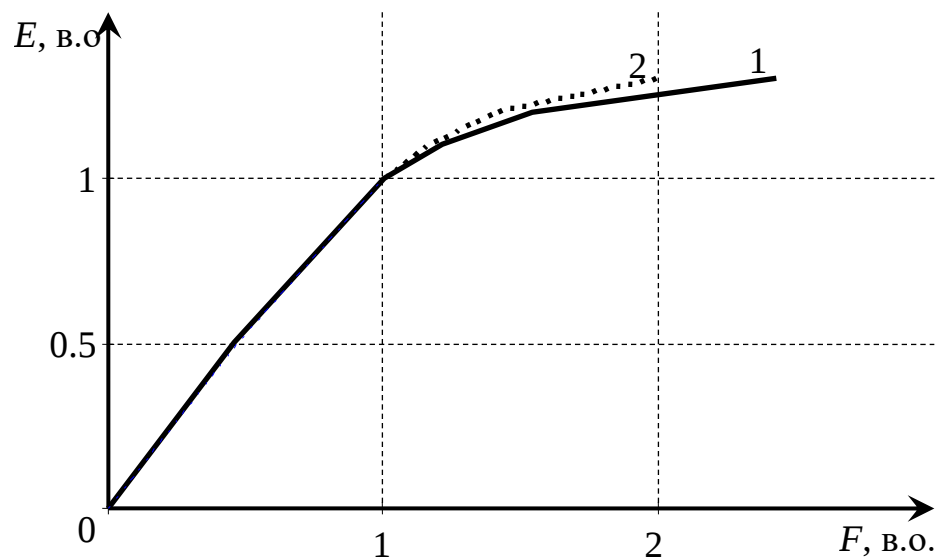
Розбіжності розрахунковою й нормальною характеристикою в робочій зоні не повинне перевищувати 15 %.

					141.4361.КРБ.ПЗ.Р01	Лист
						34
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.1

$\Phi (E), \text{В.О.}$	0,5	1,0	1,1	1,2	1,3
$\Phi, \text{Вб}$	0,015	0,03	0,033	0,036	0,039
$B_{\delta}, \text{Тл}$	0,349	0,698	0,768	0,838	0,908
$F_{\delta 3c*}, \text{В.О.}$	0,394	0,849	1,019	1,253	1,858
$\Phi_{\sigma}, \text{Вб}$	0,00092	0,0019	0,0024	0,0029	0,0043
$\Phi_{\sigma*}, \text{В.О.}$	0,03	0,065	0,079	0,097	0,143
$\Phi_{\Pi 1}, \text{Вб}$	0,016	0,032	0,036	0,039	0,044
$\Phi_{\Pi 1*}, \text{В.О.}$	0,53	1,065	1,179	1,297	1,443
$F_{\Pi c}, \text{А}$	147,741	346,168	439,315	654,169	1301
$F_{\Pi c*}, \text{В.О.}$	0,065	0,151	0,192	0,286	0,569
$F_{\Sigma}, \text{А}$	1049	2286	2768	3518	5548
$F_{\Sigma*}, \text{В.О.}$	0,459	1	1,211	1,539	2,427

Згідно даних таблиці будемо характеристику холостого ходу, зображену на рисунку 1.1.



1 – розрахункова, 2 – нормалізована

Рисунок 1.1 – Характеристика холостого ходу синхронного генератору

Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

141.4361.КРБ.ПЗ.Р01

Лист

35



1.8. Активний і індуктивний опори розсіювання обмотки статора

Визначення активних і індуктивних опорів обмотки статора необхідно для розрахунку режиму х. х., номінальних параметрів і робочих характеристик синхронної машини.

Активний опір обмотки фази при 20 °С:

$$r_1 = \frac{\omega_1 \cdot l_{cp1}}{\rho_{m20} \cdot a_1 \cdot c \cdot S \cdot 10^3} = \frac{40 \cdot 1230}{57 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 3.537 \cdot 10^3} = 0.02 \text{ Ом},$$

де $\rho_{m20} = 57 \text{ см/мкм}$ – питома електрична провідність міді при 20°С.

Те ж (в. о.):

$$r_{1*} = \frac{r_1 \cdot I_1 \cdot \sqrt{3}}{U_1} = \frac{0.02 \cdot 288.675 \cdot \sqrt{3}}{400} = 0.025 \text{ в. о.}$$

Перевірка правильності визначення r_{1*} :

$$r_{1*} = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot (A_1 \cdot J_1) \cdot l_{cp1} \cdot \sqrt{3}}{114 \cdot 10^4 \cdot m_1 \cdot U_1 \cdot I_1} = \frac{3.14 \cdot 518.2 \cdot 425.572 \cdot 6.8 \cdot 1230 \cdot \sqrt{3}}{114 \cdot 10^4 \cdot 3 \cdot 400 \cdot 288.675} = 0.025 \text{ в. о.}$$

Розміри частин обмоток і паза визначаються по [3, табл. 9-21.]: $h_{k1}=3 \text{ мм}$, $h_2=1.9 \text{ мм}$, $h_3=1 \text{ мм}$, $h_4=h_3$.

Коефіцієнти, які враховують вкорочення кроку:

$$k_{\beta 1} = 0.4 + 0.6 \cdot \beta_1 = 0.4 + 0.6 \cdot 0.833 = 0.9;$$

$$k'_{\beta 1} = 0.2 + 0.8 \cdot \beta_1 = 0.2 + 0.8 \cdot 0.833 = 0.867.$$

					141.4361.КРБ.ПЗ.Р01	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		36



Коефіцієнт провідності розсіювання:

$$\lambda_{\pi 1} = \frac{h_3}{4 \cdot b_{\pi 1}} + \frac{h_1 - h_3}{3 \cdot b_{\pi 1}} \cdot k_{\beta 1} + \left(\frac{3 \cdot h_{k1}}{b_{\pi 1} + 2 \cdot b_{\pi 1}} + \frac{h_{\pi 1}}{b_{\pi 1}} + \frac{h_2}{b_{\pi 1}} \right) \cdot k_{\beta 1} =$$
$$= \frac{1}{4 \cdot 12.66} + \frac{10 - 1}{3 \cdot 12.66} \cdot 0.9 + \left(\frac{3 \cdot 3}{12.66 + 2 \cdot 7.648} + \frac{1}{7.648} + \frac{1.9}{12.66} \right) \cdot 0.867 = 0.755.$$

Коефіцієнт провідності диференціального розсіювання:

$$\lambda_{\Delta 1} = \frac{0.03 \cdot \tau \cdot \alpha \cdot C_{\Delta}}{\delta \cdot k_{\delta} \cdot q_1} = \frac{0.03 \cdot 271.329 \cdot 0.68 \cdot 0.85}{2.3 \cdot 1.345 \cdot 4} = 0.38,$$

де $C_{\Delta}=0,85$ – коефіцієнт, що враховує вплив форми повітряного зазору.

Коефіцієнт провідності розсіювання лобових частин обмотки:

$$\lambda_{\pi 1} = 0.34 \cdot \frac{q_1}{l_1} \cdot (l_{\pi 1} - 0.64 \cdot \beta_1 \cdot \tau) =$$
$$= 0.34 \cdot \frac{4}{230} \cdot (385.13 - 0.64 \cdot 0.833 \cdot 271.329) = 1.422.$$

Коефіцієнт зубової зони статора:

$$k_{B\delta} = \frac{b_{\pi 1}}{\delta \cdot k_{\delta}} = \frac{7.648}{2.3 \cdot 1.345} = 2.472.$$

Коефіцієнт, що враховує вплив відкриття пазів статора на магнітну провідність розсіювання між коронками зубців $k_k = 0.16$.

Коефіцієнт провідності розсіювання між коронками зубців статора:

$$\lambda_k = 0.04 + k_k + 0.07 \cdot \sqrt{\frac{t_1 - b_{\pi 1}}{b_{\pi 1}}} = 0.04 + 0.16 + 0.07 \cdot \sqrt{\frac{22.96 - 7.648}{7.648}} = 0.299.$$

					141.4361.КРБ.ПЗ.Р01	Лист
						37
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



Сумарний коефіцієнт магнітної провідності потоку розсіювання обмотки статора:

$$\lambda_1 = \lambda_{\text{пл}} + \lambda_{\text{дл}} + \lambda_{\text{пл}} + \lambda_k = 0.755 + 0.38 + 1.422 + 0.299 = 2.856.$$

Індуктивний опір обмотки фази статора:

$$x_\sigma = \frac{1.58 \cdot f_1 \cdot l_1 \cdot \omega_1^2 \cdot \lambda_1}{p \cdot q_1 \cdot 10^8} = \frac{1.58 \cdot 50 \cdot 230 \cdot 40^2 \cdot 2.856}{3 \cdot 4 \cdot 10^8} = 0.069 \text{ Ом.}$$

Індуктивний опір обмотки фази статора (в. о.):

$$x_{\sigma^*} = \frac{x_\sigma \cdot I_1}{U_1} = \frac{0.069 \cdot 288.675}{230} = 0.086 \text{ в. о.}$$

Перевірка правильності розрахунку x_{σ^*} :

$$\begin{aligned} x_{\sigma^*} &= \frac{0.39 \cdot (D_1 \cdot A_1)^2 \cdot l_1 \cdot \lambda_1 \cdot 10^{-7}}{m_1 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot z_1} = \\ &= \frac{0.39 \cdot (518.2 \cdot 425.572)^2 \cdot 230 \cdot 2.856 \cdot 10^{-7}}{3 \cdot 230 \cdot 288.675 \cdot 72} = 0.087 \text{ в.о.} \end{aligned}$$

1.9. Розрахунок магнітного кола при навантаженні

При навантаженні обмотка статора створює поле реакції якоря. Через нерівномірність повітряного зазору й відповідно магнітного опору уздовж окружності розточення статора явноплюсної машини виникає необхідність розглядати дію реакції якоря F_a по поздовжній осі d і поперечної осі q окремо. При цьому $F_d = F_a \cdot \sin \psi$, $F_q = F_a \cdot \cos \psi$. Тут ψ – кут зрушення між струмом якоря I_1 та ЕРС $E_{\delta d}$ наведеної результуючим поздовжнім потоком.

					141.4361.КРБ.ПЗ.Р01	Лист
						38
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



МРС обмотки збудження при навантаженні можна визначити, використовуючи часткові характеристики.

Будуємо часткові характеристики намагнічування $\Phi = f(F_{\delta_{\Sigma}})$, $\Phi_{\sigma} = f(F_{\delta_{\Sigma}})$, $\Phi_{\pi} = f(F_{\pi 2})$ за даними таблиці 1.1, зображені на рисунку 1.2.

ЕРС, яка індуктується магнітним потоком повітряного зазору:

$$E_{\delta^*} = \sqrt{(I_1 \cdot \chi_{\sigma^*} \cdot \cos \varphi)^2 + (U_1 + I_1 \cdot \chi_{\sigma^*} \cdot \sin \varphi)^2} = \\ = \sqrt{(1 \cdot 0.086 \cdot 0.8)^2 + (1 + 1 \cdot 0.086 \cdot 0.6)^2} = 1.054 \text{ в. о.}$$

МРС для магнітного ланцюга повітряного зазору й статора (з часткових характеристик): $F_{\delta_{\Sigma}^*} = 0.941$ в. о.

МРС для повітряного зазору (з часткових характеристик): $F_{\delta^*} = 0.8$ в. о.

Попереднє коефіцієнт насичення магнітного ланцюга статора:

$$k'_{\text{нас}} = \frac{F_{\delta_{\Sigma}^*}}{F_{\delta^*}} = \frac{0.941}{0.8} = 1.176.$$

Поправочні коефіцієнти, що враховують насичення магнітного ланцюга: $\chi_d = 0.95$, $\chi_q = 0.7$, $k_{qd} = 0.003$ з [3, рис.11-17].

Коефіцієнти реакції якоря: $k_{ad} = 0.86$, $k_{aq} = 0.4$ з [3, табл. 11-4].

Коефіцієнт форми поля реакції якоря: $k_{\Phi a} = 1$ з [3, § 11-8].

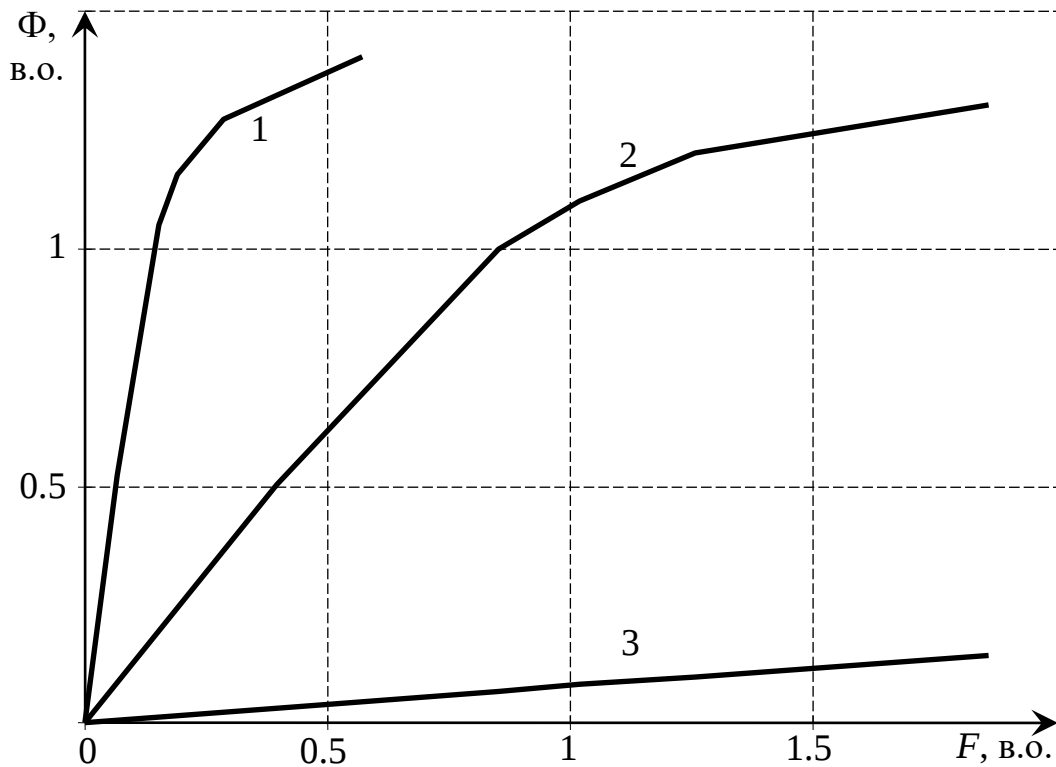
Амплітуда МРС обмотки статора:

$$F_a = \frac{0.45 \cdot m_1 \cdot \omega_1 \cdot k_{o61} \cdot I_1' \cdot k_{\Phi a}}{p} = \frac{0.45 \cdot 3 \cdot 40 \cdot 0.925 \cdot 288.675 \cdot 1}{3} = 4807 \text{ А.}$$

Те ж, у відносних одиницях:

$$F_{a^*} = \frac{F_a}{F_{\Sigma}} = \frac{4807}{2286} = 2.103 \text{ в. о.}$$

					141.4361.КРБ.ПЗ.Р01	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		39



$$1 - \Phi_{\Pi} = f(F_{\Pi c}), 2 - \Phi = f(F_{\delta зс}), 3 - \Phi_{\sigma} = f(F_{\delta зс})$$

Рисунок 1.2 – Часткові характеристики намагнічування для генератора

Поперечна складова МРС реакції якоря, з урахуванням насичення, віднесе-
на до обмотки збудження:

$$\frac{F_{aq*}}{\cos \psi} = \chi_q \cdot k_{aq} \cdot F_{a*} = 0.7 \cdot 0.4 \cdot 2.103 = 0.589 \text{ в. о.}$$

ЕРС обмотки статора обумовлена дією МРС $\frac{F_{aq*}}{\cos \psi}$ (з частотних характери-
стик.):

$$\frac{E'_{aq*}}{\cos \psi} = 0.714 \text{ в. о.}$$



Кут між струмом якоря I_1 та ЕРС E_δ :

$$\psi = \arctg \left(\frac{\left(\frac{E_{aq}^*}{\cos \psi} + I_1 \cdot x_{\sigma^*} \right) \cdot \cos \varphi}{U_1 + \left(\frac{E_{aq}^*}{\cos \psi} + I_1 \cdot x_{\sigma^*} \right) \cdot \sin \varphi} \right) + \varphi =$$
$$= \arctg \left(\frac{(0.714 + 1 \cdot 0.086) \cdot 0.8}{1 + (0.714 + 1 \cdot 0.086) \cdot 0.6} \right) + 36.87^\circ = 60.265^\circ.$$

Знаходимо: $\cos \psi = \cos(60.265^\circ) = 0.496$, $\sin \psi = \sin(60.265^\circ) = 0.868$.

Поздовжня МРС реакції якоря з урахуванням впливу поперечного поля:

$$F_{ad}^* = \chi_d \cdot k_{ad} \cdot F_{a^*} \cdot \sin \psi + \frac{k_{qd} \cdot F_{a^*} \cdot \cos \psi \cdot \tau}{\delta} =$$
$$= 0.95 \cdot 0.86 \cdot 2.103 \cdot 0.868 + \frac{0.003 \cdot 2.103 \cdot 0.496 \cdot 271.329}{2.3} = 1.861 \text{ в.о.}$$

Поздовжня складова ЕРС, що наводиться в обмотці статора результирующим потоком по поздовжній осі $\Phi_{\delta d^*}$:

$$E_{\delta d^*} = \Phi_{\delta d^*} = E_\delta \cdot \cos(\theta - \Delta) = 1.054 \cdot \cos(23.395^\circ - 3.764^\circ) = 0.993,$$

де

$$\theta = \arctg \left(\frac{\left(\left(\frac{E_{aq}^*}{\cos \psi} \right) + I_1 \cdot x_{\sigma^*} \right) \cdot \cos \varphi}{U_1 + \left(\left(\frac{E_{aq}^*}{\cos \psi} \right) + I_1 \cdot x_{\sigma^*} \right) \cdot \sin \varphi} \right) = \arctg \left(\frac{(0.714 + 1 \cdot 0.086) \cdot 0.8}{1 + (0.714 + 1 \cdot 0.086) \cdot 0.6} \right) = 23.39^\circ,$$

$$\Delta = \arcsin \left(I_1 \cdot x_{\sigma^*} \cdot \frac{\cos \varphi}{E_\delta} \right) = \arcsin \left(1 \cdot 0.086 \cdot \frac{0.8}{1.054} \right) = 3.764^\circ.$$

МРС по поздовжній осі, необхідна для створення ЕРС $F_{\delta d} = 0.842$ в. о. з частотних характеристик.

					141.4361.КРБ.ПЗ.Р01	Лист
						41
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



Результуюча МРС по поздовжній осі:

$$F_{\delta a^*} = F_{\delta d} + F_{ad^*} = 0.842 + 1.861 = 2.703 \text{ в. о.}$$

Магнітний потік розсіювання при дії МРС $F_{\delta a}$:

$$\Phi_{\sigma^*} = \frac{\Phi_{\sigma(1)} \cdot F_{\delta a^*}}{F_{\delta_{3c}(1)}} = \frac{0.03 \cdot 2.703}{0.394} = 0.209 \text{ в. о.}$$

Результуючий магнітний потік:

$$\Phi_{\Pi^*} = \Phi_{\delta d^*} + \Phi_{\sigma^*} = 0.993 + 0.209 = 1.201 \text{ в. о.}$$

МРС, необхідна для створення магнітного потоку по з частотних характеристик: $F_{\Pi.c} = 0.229 \text{ в. о.}$

МРС обмотки збудження при навантаженні:

$$F_{\Pi.\Pi^*} = F_{\delta a^*} + F_{\Pi.c} = 2.703 + 0.229 = 2.932 \text{ в. о.}$$

Тє ж:

$$F_{\Pi.\Pi} = F_{\Pi.\Pi^*} \cdot F_{\Sigma} = 2.932 \cdot 2286 = 6701 \text{ А.}$$

1.10. Система збудження

У синхронних машинах великої потужності (при $h > 315 \text{ мм}$) обмотки збудження виготовляють у вигляді одношарових котушок з неізольованого мідного провідника, намотаного на ребро. Але в даному випадку, застосовується багат шарова котушка ступінчатої форми.

Напруга додаткової обмотки статора: $U_d = 110 \text{ В}$ з [3, § 11-9].

Попередня середня довжина витка обмотки збудження:

$$l_{\text{ср.д}} = 2.5 \cdot (l_{\Pi} + b_{\Pi}) = 2.5 \cdot (240 + 99.383) = 848.458 \text{ мм.}$$

					141.4361.КРБ.ПЗ.Р01	Лист
						42
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



Попередня площа поперечного перерізу провідника обмотки збудження:

$$S = \frac{1.38 \cdot 2 \cdot p \cdot F_{п.н} \cdot l'_{ср.д}}{57 \cdot U_d \cdot 10^3} = \frac{1.38 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 6701 \cdot 848.458}{57 \cdot 110 \cdot 10^3} = 7.647 \text{ мм}^2.$$

Попередня щільність струму в обмотці збудження: $J'_п = 3.5 \text{ А/мм}^2$ з [3, рис. 11-21].

Попередня кількість витків однієї полюсної котушки:

$$\omega'_п = 1.15 \cdot \frac{F_{п.н}}{S \cdot J'_п} = 1.15 \cdot \frac{6.701}{7.647 \cdot 3.5} \approx 288.$$

Відстань між котушками суміжних полюсів:

$$a_k = \frac{l'_п \cdot \tau}{h'_п \cdot 10^3} + a_{доп} = \frac{240 \cdot 271.329}{114.743 \cdot 10^3} + 7 = 7.568 \text{ мм}.$$

Попередній розмір провідника обмотки з неізолюваної смугової міді, що навивається на ребро, по ширині:

$$\begin{aligned} b' &= (D_1 - 2 \cdot \delta' - 2 \cdot h_{н.п} - 2 \cdot h'_п) \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4 \cdot p}\right) - 0.5 \cdot [b'_п + 2 \cdot (b_3 + b_{и}) + a_k] = \\ &= (518.2 - 2 \cdot 2.044 - 2 \cdot 28.587 - 2 \cdot 114.743) \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{3.14}{4 \cdot 3}\right) - \\ &\quad - 0.5 \cdot [99.383 + 7 + 7.568] = 3.97 \text{ мм}. \end{aligned}$$

де $2 \cdot (b_3 + b_{и}) = 7 \text{ мм}$ – з [3, § 11-9].

Розміри провідника без ізоляції $a \times b = 1.25 \times 6.30 \text{ мм}$, $S = 7.660 \text{ мм}^2$.

Максимальна кількість шарів обмотки:

$$N_{\max} = \frac{(b'_{н.п} - (b_3 + b_{и}) - b'_п) / 2}{a} = \frac{(187.224 - 3.5 - 99.383) / 2}{1.25} = 33.736.$$

					141.4361.КРБ.ПЗ.Р01	Лист
						43
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



Максимальна кількість витків в одному шарі обмотки:

$$N_B = \frac{h_{\Pi} - 2 \cdot (b_3 + b_{\Pi})}{b} = \frac{114.743 - 7}{6.30} = 17.$$

Обираємо всього 27 шарів:

3 шари по 17 витків;

3 шари по 15 витків;

3 шари по 14 витків;

3 шари по 12 витків;

3 шари по 11 витків;

3 шари по 9 витків;

3 шари по 8 витків.

Розмір полюсної котушки по ширині:

$$b_{\text{к.п}} = 1.05 \cdot N_{\text{ш}} \cdot a = 1.05 \cdot 27 \cdot 1.25 = 35.438 \text{ мм.}$$

Розмір полюсної котушки по висоті:

$$h_{\text{к.п}} = 1.05 \cdot N_B \cdot b = 1.05 \cdot 17 \cdot 6.30 = 112.455 \text{ мм.}$$

Середня довжина витка котушки:

$$\begin{aligned} l_{\text{ср.п}} &= 2 \cdot (l_{\Pi} + b_{\Pi}) + \pi \cdot (2 \cdot (b_3 + b_{\Pi}) + b_{\text{к.п}}) = \\ &= 2 \cdot (240 + 99.383) + 3.14 \cdot (7 + 35.438) = 812.088 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Струм збудження при номінальному навантаженні:

$$I_{\text{п.н}} = \frac{F_{\text{п.н}}}{w_{\Pi}} = \frac{6701}{288} = 23.268 \text{ А.}$$

					141.4361.КРБ.ПЗ.Р01	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		44



Уточнена щільність струму в обмотці збудження:

$$J_{\Pi} = \frac{I_{\Pi.н}}{a_{\Pi} \cdot S} = \frac{23.268}{1 \cdot 7.66} = 3.038 \text{ А/мм}^2,$$

де $a_{\Pi} = 1$ – кількість паралельних гілок ланцюгу збудження.

Загальна довжина всіх витків обмотки збудження:

$$L_{\Pi} = 2 \cdot p \cdot w_{\Pi} \cdot l_{\text{ср.}\Pi} \cdot 10^{-3} = 2 \cdot 3 \cdot 288 \cdot 812.088 \cdot 10^{-3} = 1403 \text{ мм.}$$

Маса міді обмотки збудження:

$$m_{\text{м.}\Pi} = 8.9 \cdot L_{\Pi} \cdot S \cdot 10^{-3} = 8.9 \cdot 1403 \cdot 7.66 \cdot 10^{-3} = 95.668 \text{ кг.}$$

Опір обмотки збудження при температурі 20 °С:

$$r_{\Pi} = \frac{L_{\Pi}}{\rho_{\text{м}20} \cdot a_{\Pi} \cdot S} = \frac{1403}{57 \cdot 1 \cdot 7.66} = 3.214 \text{ Ом,}$$

де $\rho_{\text{м}20} = 57 \text{ см/мкм}$ – питома електрична провідність міді при 20 °С.

Максимальний струм збудження:

$$I_{\Pi.\text{max}} = \frac{U_{\text{д}} - 2}{r_{\Pi} \cdot m_{\text{Т}}} = \frac{110 - 2}{3.214 \cdot 1.48} = 24.35 \text{ А.}$$

Коефіцієнт запасу збудження:

$$\frac{I_{\Pi.\text{max}}}{I_{\Pi.н}} = \frac{24.35}{23.268} = 1.047.$$

					141.4361.КРБ.ПЗ.Р01	Лист
						45
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



Номінальна потужність збудження:

$$P_{\Pi} = (U_{\text{д}} - 2) \cdot I_{\Pi, \text{max}} = (110 - 2) \cdot 24.35 = 2630 \text{ Вт.}$$

1.11. Параметри обмоток і постійні часу

Під параметрами обмоток синхронних машин звичайно розуміють їх активні й індуктивні опори, виражені у фізичних або відносних величинах.

Коефіцієнт поздовжньої реакції якоря: $k_{ad} = 0.86$ з [3, табл. 11-4].

Коефіцієнт насичення при $E=0,5$:

$$k_{\text{нас}(0,5)} = \frac{F_{\Sigma}}{(F_{\delta} + F_{\Pi 2})} = \frac{1049}{(863.967 + 80.768)} = 1.11.$$

МРС для повітряного зазору при $E = 1,0$ (в. о.) по таблиці 1.1. $F_{\delta(1)} = 1728$.

Індуктивний опір поздовжньої реакції якоря:

$$x_{ad*} = \frac{k_{ad} \cdot F_{a*}}{k_{\text{нас}(0,5)} \cdot F_{\delta(1)}} = \frac{0.86 \cdot 4807}{1.11 \cdot 1728} = 2.155 \text{ в. о.}$$

Індуктивний опір поперечної реакції якоря:

$$x_{aq*} = \frac{0.5 \cdot k_{aq} \cdot (1 + k_{\delta}) \cdot F_{a*}}{k_{\text{нас}(0,5)} \cdot F_{\delta(1)}} = \frac{0.5 \cdot 0.4 \cdot (1 + 1.345) \cdot 4807}{1.11 \cdot 1728} = 1.175 \text{ в. о.}$$

Синхронний індуктивний опір по поздовжній осі:

$$x_{d*} = x_{ad*} + x_{\sigma*} = 2.155 + 0.086 = 2.241 \text{ в. о.}$$

Синхронний індуктивний опір по поперечній осі:

$$x_{q*} = x_{aq*} + x_{\sigma*} = 1.175 + 0.086 = 1.262 \text{ в. о.}$$

					141.4361.КРБ.ПЗ.Р01	Лист
						46
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



Опір обмотки збудження.

Активний опір обмотки збудження, приведене до обмотки статора, при робочій температурі, що відповідає прийнятому класу нагрівостійкості ізоляції:

$$r_{\Pi*} = \frac{3.6 \cdot m_T \cdot F_a \cdot k_{ad}^2 \cdot l_{cp.\Pi}}{\Phi \cdot w_{\Pi} \cdot S \cdot f_1 \cdot 10^6} = \frac{3.6 \cdot 1.48 \cdot 4807 \cdot 0.86^2 \cdot 812.088}{0.03 \cdot 288 \cdot 7.66 \cdot 50 \cdot 10^6} = 0.004302 \text{ в. о.}$$

Коефіцієнт магнітної провідності потоку розсіювання обмотки збудження:

$$\lambda_{\Pi\Sigma} = \lambda_{\Pi\Pi} + 0.65 \cdot \lambda_{\Pi c} + 0.38 \cdot \lambda_{\Pi B} = 49.103 + 0.65 \cdot 79.36 + 0.38 \cdot 15.32 = 106.509.$$

Індуктивний опір обмотки збудження:

$$\begin{aligned} x_{\Pi*} &= 1.27 \cdot k_{ad} \cdot x_{ad*} \cdot \left(1 + \frac{4 \cdot k_{\text{нас}(0,5)} \cdot F_{\delta} \cdot l_{\Pi} \cdot \lambda_{\Pi\Sigma}}{\Phi \cdot 10^{11}} \right) = \\ &= 1.27 \cdot 0.86 \cdot 2.155 \cdot \left(1 + \frac{4 \cdot 1.11 \cdot 1728 \cdot 240 \cdot 106.509}{0.03 \cdot 10^{11}} \right) = 2.506 \text{ в.о.} \end{aligned}$$

Індуктивний опір розсіювання обмотки збудження:

$$x_{\Pi\sigma*} = x_{\Pi*} - x_{ad*} = 2.506 - 2.155 = 0.351 \text{ в. о.}$$

Опори пускової обмотки.

Відносний зубцевий поділ:

$$t_{2'} = \frac{\pi \cdot t_2}{\tau} = \frac{3.14 \cdot 17.411}{271.329} = 0.202.$$

Коефіцієнт розподілу демпферної обмотки:

$$k_{p2} = \frac{\sin(N_2 \cdot t_{2'})}{N_2 \cdot \sin(t_{2'})} = \frac{\sin(11 \cdot 0.202)}{11 \cdot \sin(0.202)} = 0.362.$$

					141.4361.КРБ.ПЗ.Р01	Лист
						47
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



Коефіцієнт магнітної провідності потоку розсіяння по зубцям полюсних наконечника:

$$\lambda_{\text{дз}} = \frac{t_2}{g_{\text{д}} \cdot \delta} = \frac{17.411}{16.5 \cdot 2.3} = 0.459.$$

Коефіцієнт магнітної провідності пазового розсіяння полюсів:

$$\lambda_{\text{д.п}} = \left(0.785 - \frac{b_{\text{ш2}}}{2 \cdot d_{\text{п2}}} \right) + \frac{h_{\text{ш2}}}{b_{\text{ш2}}} = \left(0.785 - \frac{3}{2 \cdot 6.1} \right) + \frac{3}{3} = 1.539.$$

Коефіцієнт магнітної провідності розсіяння лобових частин по поздовжній осі:

$$\lambda_{\text{длд}} = 0.019 \cdot \tau \cdot \frac{C_d}{N_2} = 0.019 \cdot 271.329 \cdot \frac{2.7}{11} = 1.265.$$

Те ж, по поперечній осі:

$$\lambda_{\text{длq}} = 0.019 \cdot \tau \cdot \frac{C_q}{N_2} = 0.019 \cdot 271.329 \cdot \frac{2.2}{11} = 1.031.$$

Коефіцієнт магнітної провідності розсіяння демпферної обмотки по поздовжній осі:

$$\lambda_{\text{дд}} = \frac{l_{\text{п}}}{10 \cdot N_2} \cdot (\lambda_{\text{д.п}} + \lambda_{\text{дз}}) + \lambda_{\text{длд}} = \frac{240}{10 \cdot 11} \cdot (1.539 + 0.459) + 1.265 = 5.624.$$

Те ж, по поперечній осі:

$$\lambda_{\text{дq}} = \frac{l_{\text{п}}}{10 \cdot N_2} \cdot (\lambda_{\text{д.п}} + \lambda_{\text{дз}}) + \lambda_{\text{длq}} = \frac{240}{10 \cdot 11} \cdot (1.539 + 0.459) + 1.031 = 5.39.$$

					141.4361.КРБ.ПЗ.Р01	Лист
						48
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



Індуктивний опір демпферної обмотки по поздовжній осі:

$$x_{Дd} = \frac{3.9 \cdot F_a \cdot \lambda_{Дd}}{\Phi_1 \cdot 10^8 \cdot (1 - k_{p2})} = \frac{3.9 \cdot 4807 \cdot 5.624}{0.03 \cdot 10^8 \cdot (1 - 0.362)} = 0.055.$$

Те ж, по поперечній осі:

$$x_{Дq} = \frac{3.9 \cdot F_a \cdot \lambda_{Дq}}{\Phi_1 \cdot 10^8 \cdot (1 + k_{p2})} = \frac{3.9 \cdot 4807 \cdot 5.39}{0.03 \cdot 10^8 \cdot (1 + 0.362)} = 0.025.$$

Активний опір стрижнів демпферної обмотки по поздовжній осі :

$$r_{cd} = \frac{1.57 \cdot \rho_2 \cdot l_{ст} \cdot k_{ad} \cdot k_{\delta} \cdot \delta \cdot x_{ad}}{(1 - k_{p2}) \cdot N_2 \cdot S \cdot l_{п} \cdot \mu_0 \cdot k_B \cdot \tau \cdot f} =$$
$$= \frac{1.57 \cdot 0.0242 \cdot 284.266 \cdot 0.86 \cdot 1.345 \cdot 2.3 \cdot 2.155}{(1 - 0.362) \cdot 11 \cdot 28.274 \cdot 240 \cdot 1.257 \cdot 10^{-6} \cdot 1.03 \cdot 271.329 \cdot 50} = 0.074.$$

Те ж, по поперечній осі:

$$r_{cq} = 0.75 \cdot r_{cd} = 0.75 \cdot 0.074 = 0.056.$$

Активний опір короткозамкнених кілець по поздовжній осі:

$$r_{kd} = \frac{0.34 \cdot \rho_k \cdot N_2 \cdot t_2 \cdot k_{ad}}{(1 - k_{p2}) \cdot S_c \cdot l_{п} \cdot \mu_0} \cdot \frac{k_{\delta} \cdot \delta \cdot x_{ad}}{k_B \cdot \tau \cdot f} =$$
$$= \frac{0.34 \cdot 0.0242 \cdot 11 \cdot 17.411 \cdot 0.86}{(1 - 0.362) \cdot 52.27 \cdot 240 \cdot 1.257 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{1.345 \cdot 2.3 \cdot 2.155}{1.03 \cdot 271.329 \cdot 50} = 0.064.$$

Те ж, по поперечній осі:

$$r_{kq} = 1.5 \cdot r_{kd} = 1.5 \cdot 0.064 = 0.096.$$

					141.4361.КРБ.ПЗ.Р01	Лист
						49
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



Активний опір демпферної обмотки по поздовжній осі:

$$r_{Дd} = r_{cd} + r_{kd} = 0.074 + 0.064 = 0.138.$$

Те ж, по поперечній осі:

$$r_{Дq} = r_{cq} + r_{kq} = 0.056 + 0.096 = 0.152.$$

Перехідні й зверхперехідні опори обмотки статора.

Перехідний індуктивний опір обмотки статора по поздовжній осі:

$$x'_{d*} = x_{\sigma*} + \frac{x_{ad*} \cdot x_{\pi\sigma*}}{x_{ad*} + x_{\pi\sigma*}} = 0.086 + \frac{2.155 \cdot 0.351}{2.155 + 0.351} = 0.389 \text{ в. о.}$$

Те ж, по поперечній осі: $x'_{q*} = x_{q*} = 1.262 \text{ в. о.}$

Зверх перехідний індуктивний опір обмотки статора по поздовжній осі при наявності демпферної обмотки:

$$x''_{d*} = x_{\sigma*} + \frac{x_{Дd*} \cdot (x'_{d*} - x_{\sigma*})}{x_{Дd*} + (x'_{d*} - x_{\sigma*})} = 0.086 + \frac{0.055 \cdot (0.389 - 0.086)}{0.055 + (0.389 - 0.086)} = 0.133 \text{ в. о.}$$

Те ж, по поперечній осі:

$$x''_{q*} = x_{\sigma*} + \frac{x_{aq*} \cdot x_{Дq*}}{x_{aq*} + x_{Дq*}} = 0.086 + \frac{1.175 \cdot 0.025}{1.175 + 0.025} = 0.111 \text{ в. о.}$$

Опори для струмів зворотної й нульової послідовності.

Індуктивний опір обмотки статора для струмів зворотної послідовності при роботі машини на малий зовнішній опір (близьке до к. з.):

$$x_{2*} = \sqrt{x''_{d*} \cdot x''_{q*}} = \sqrt{0.133 \cdot 0.111} = 0.121 \text{ в. о.}$$

					141.4361.КРБ.ПЗ.Р01	Лист
						50
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



Те ж, при великому зовнішньому індуктивному опорі:

$$x_{2*} = 0.5 \cdot (x_{d*}'' + x_{q*}'') = 0.5 \cdot (0.0133 + 0.111) = 0.122 \text{ в. о.}$$

Індуктивний опір двошарової обмотки статора для струмів нульової послідовності:

$$\begin{aligned} x_{0*} &= \frac{1.1 \cdot l_1 \cdot F_a}{10^9 \cdot \Phi \cdot q_1 \cdot k_{y1}^2} \cdot \left[(\beta_1 - 0.555) \cdot \frac{h_{\pi 1}}{b_{\pi 1}} + (3 \cdot \beta_1 - 2) \cdot \frac{h_4}{b_{\pi 1}} \right] + \\ &+ C \cdot \frac{F_a \cdot (3 \cdot \beta_1 - 2)}{F_\delta \cdot k_{y1}^2} \cdot \left[0.39 \cdot \left(\beta_1 - \frac{2}{3} \right) - \left(\beta_1 - \frac{2}{3} \right)^2 + \left(\frac{1}{3 \cdot q_1} \right)^2 + 0.037 \right] = \\ &= \frac{1.1 \cdot 240 \cdot 4807}{10^9 \cdot 0.03 \cdot 4 \cdot 0.966^2} \cdot \left[(0.833 - 0.555) \cdot \frac{26.282}{12.66} + (3 \cdot 0.833 - 2) \cdot \frac{1}{12.66} \right] + \\ &+ 0.355 \cdot \frac{4807 \cdot (3 \cdot 0.833 - 2)}{1728 \cdot 0.966^2} \cdot \left[0.39 \cdot \left(0.833 - \frac{2}{3} \right) - \left(0.833 - \frac{2}{3} \right)^2 + \left(\frac{1}{3 \cdot 4} \right)^2 + 0.037 \right] = \\ &= 0.05 \text{ в. о.} \end{aligned}$$

Активний опір обмотки фази статора для струму нульової послідовності при робочій температурі:

$$r_{0*} = r_{1*} \cdot m_T = 0.025 \cdot 1.48 = 0.035 \text{ в. о.}$$

Сталі часу.

Обмотка збудження при розімкнутих обмотках статора й демпферної:

$$T_{d0} = \frac{x_{\pi*}}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot r_{\pi*}} = \frac{2.506}{2 \cdot 3.14 \cdot 50 \cdot 0.004302} = 1.854 \text{ с.}$$

Те ж, при замкнутій обмотці статора:

$$T_d' = \frac{T_{d0} \cdot x_{d*}'}{x_{d*}} = \frac{1.854 \cdot 0.389}{2.48} = 0.291 \text{ с.}$$

					141.4361.КРБ.ПЗ.Р01	Лист
						51
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Демпферна обмотка при розімкнутих обмотках статора і збудження по поздовжній осі:

$$T_{Dd0} = \frac{x_{ad*} + x_{Dd*}}{\omega_1 \cdot r_{Dd*}} = \frac{2.155 \cdot 0.055}{40 \cdot 0.138} = 0.399 \text{ с.}$$

Те ж, по поперечній осі:

$$T_{Dq0} = \frac{x_{aq*} + x_{Dq*}}{\omega_1 \cdot r_{Dq*}} = \frac{1.175 \cdot 0.025}{40 \cdot 0.152} = 0.197 \text{ с.}$$

Демпферна обмотка по поздовжній осі при розімкнутій обмотці статора і замкнутій обмотці збудження:

$$T''_{d0} = \frac{x_{ad*} \cdot x_{\sigma*} + x_{Dd*} \cdot (x_{ad*} + x_{\sigma*})}{\omega_1 \cdot r_{Dd*} \cdot (x_{ad*} + x_{\sigma*})} =$$

$$= \frac{2.155 \cdot 0.351 + 0.055 \cdot (2.155 + 0.351)}{40 \cdot 0.138 \cdot (2.155 + 0.351)} = 0.064 \text{ с.}$$

Те ж, при короткозамкнених обмотках збудження і статора:

$$T''_d = \frac{T''_{d0} \cdot x''_{d*}}{x'_{d*}} = \frac{0.064 \cdot 0.133}{0.389} = 0.022 \text{ с.}$$

Демпферна обмотка по поперечній осі при короткозамкненій обмотці статора:

$$T''_q = \frac{T_{Dq0} \cdot x''_{q*}}{x'_{q*}} = \frac{0.197 \cdot 0.111}{1.262} = 0.017 \text{ с.}$$

Обмотка статора при короткозамкнених обмотках ротора:

$$T_a = \frac{x_{2*}}{\omega_1 \cdot r_{1*}} = \frac{0.121}{40 \cdot 0.025} = 0.119 \text{ с.}$$



1.12. Втрати й ККД

Розрахункова маса стали зубців статора:

$$\begin{aligned} m_{31} &= 7.8 \cdot b_{31cp} \cdot h_{п1} \cdot l_1 \cdot k_c \cdot 10^{-6} \cdot z_1 = \\ &= 7.8 \cdot 11.272 \cdot 26.282 \cdot 230 \cdot 0.95 \cdot 10^{-6} \cdot 72 = 36.353 \text{ кг.} \end{aligned}$$

Магнітні втрати в зубцях статора:

$$P_{31} = 3 \cdot B_{31(1/3)}^2 \cdot m_{31} = 3 \cdot 1.582^2 \cdot 36.353 = 272.909 \text{ Вт.}$$

Амплітуда коливань індукції:

$$B_0 = \beta_0 \cdot k_\delta \cdot B_\delta = 0.33 \cdot 1.345 \cdot 0.698 = 0.282 \text{ Тл.}$$

де $\beta_0 = 0.33$ - коефіцієнт, який залежить від $b_{ш} / \delta$ з [3, § 11-11].

Маса стали спинки статора:

$$\begin{aligned} m_{c1} &= 7.8 \cdot \pi \cdot (D_{H1} - h_{c1}) \cdot h_{c1} \cdot l_1 \cdot k_c \cdot 10^{-6} = \\ &= 7.8 \cdot 3.14 \cdot (660 \cdot 44.618) \cdot 44.618 \cdot 230 \cdot 0.95 \cdot 10^{-6} = 147.01 \text{ кг.} \end{aligned}$$

Магнітні втрати в спинці статора:

$$P_{c1} = 3 \cdot B_{c1}^2 \cdot m_{c1} = 3 \cdot 1.55^2 \cdot 147.01 = 904.122 \text{ Вт.}$$

Середнє значення питомих поверхневих втрат віднесених до 1 м² поверхні полюсного наконечника:

$$\begin{aligned} p_{пов} &= k_0 \cdot (z_1 \cdot n_1 \cdot 10^{-4})^{1.5} \cdot (0.1 \cdot B_0 \cdot t_1)^2 = \\ &= 4.5 \cdot (72 \cdot 1000 \cdot 10^{-4})^{1.5} \cdot (0.1 \cdot 0.31 \cdot 22.96)^2 = 44.014 \text{ Вт/м}^2, \end{aligned}$$

де $k_0 = 4.5$ вибирають з [3, §11-11].

					141.4361.КРБ.ПЗ.Р01	Лист
						53
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



Поверхневі втрати машини:

$$P_{\text{пов}} = 2 \cdot p \cdot \tau \cdot \alpha \cdot l_{\text{п}} \cdot p_{\text{пов}} \cdot k_{\text{п}} \cdot 10^{-6} = \\ 2 \cdot 3 \cdot 271.329 \cdot 0.708 \cdot 240 \cdot 44.014 \cdot 0.6 \cdot 10^{-6} = 7.306 \text{ Вт},$$

де $k_{\text{п}} = 0.6$ - в залежності від форми полюсного наконечника вибирають з [3, §11-11].

Сумарні магнітні втрати:

$$P_{\Sigma} = P_{\text{с1}} + P_{\text{з1}} + P_{\text{пов}} = 1060 + 272.909 + 7.306 = 1340 \text{ Вт}.$$

Втрати в обмотці статора:

$$P_{\text{м1}} = m_1 \cdot I_1^2 \cdot r_1 \cdot m_{\text{T}} = \\ = 3 \cdot 288.675^2 \cdot 0.02 \cdot 1.48 = 7018 \text{ Вт}.$$

Втрати на порушення синхронної машини при живленні від додаткової обмотки статора:

$$P_{\text{п}} = I_{\text{п.н}}^2 \cdot r_{\text{п}} + 2 \cdot I_{\text{п.н}} = 23.268^2 \cdot 3.214 + 2 \cdot 23.268 = 1787 \text{ Вт}.$$

Додаткові втрати в обмотці статора й сталі магнітопроводу при навантаженні:

$$P_{\text{доб}} = 0.005 \cdot P_2 = 0.005 \cdot 160000 = 800 \text{ Вт}.$$

Механічні втрати на тертя в підшипниках:

$$P_{\text{мх}} = 8 \cdot \left(\frac{n_1}{1000} \right)^2 \cdot \left(\frac{D_1}{100} \right)^3 = \\ = 8 \cdot \left(\frac{1000}{1000} \right)^2 \cdot \left(\frac{518.2}{100} \right)^3 = 1113 \text{ Вт}.$$

					141.4361.КРБ.ПЗ.Р01	Лист
						54
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



Втрати на тертя щіток та контактних кілець:

$$P_{\text{т.щ.}}' = 2.6 \cdot I_{\text{п.н}} \cdot D_1 \cdot n_1 \cdot 10^{-6} = 2.6 \cdot 23.268 \cdot 518.2 \cdot 1000 \cdot 10^{-6} = 31.349 \text{ Вт.}$$

Механічні втрати:

$$P_{\text{мх}} = P_{\text{мх}}' + P_{\text{т.щ.}}' = 1113 + 31.349 = 1145 \text{ Вт.}$$

Сумарні втрати:

$$P_{\Sigma} = P_{\text{с}\Sigma} + P_{\text{м1}} + P_{\text{доб}} + P_{\text{п}} + P_{\text{мх}} = 1340 + 7018 + 800 + 2630 + 1145 = 12930 \text{ Вт.}$$

ККД при нормальному навантаженні:

$$\eta = \left(1 - \frac{P_{\Sigma}}{P_2 + P_{\Sigma}} \right) \cdot 100\% = \left(1 - \frac{12930}{160000 + 12930} \right) \cdot 100\% = 92.522\%.$$

1.13. Тепловий розрахунок

Тепловий розрахунок синхронної машини.

Втрати в основній і додатковій обмотках статора:

$$P_{\text{м1}}' = m_1 \cdot m_T \cdot I_1^2 \cdot r_1 = 3 \cdot 1.48 \cdot 288.675^2 \cdot 0.02 = 7526 \text{ Вт.}$$

Умовна внутрішня поверхня охолодження активної частини статора:

$$S_{\text{п1}} = \pi \cdot D_1 \cdot l_1 = 3.14 \cdot 518.2 \cdot 230 = 374400 \text{ мм}^2.$$

Умовний периметр поперечного перерізу прямокутного відкритого паза:

$$\Pi_1 = 2 \cdot (h_{\text{п1}} + b_{\text{п1}}) = 2 \cdot (26.282 + 12.66) = 77.875 \text{ мм.}$$

					141.4361.КРБ.ПЗ.Р01	Лист
						55
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



Умовна поверхня охолодження пазів:

$$S_{м.п} = z_1 \cdot \Pi_1 \cdot l_1 = 72 \cdot 77.875 \cdot 230 = 1290000 \text{ мм}^2.$$

Умовна поверхня охолодження лобових частин обмотки:

$$S_{л1} = 4 \cdot \pi \cdot D_1 \cdot l_{B1} = 4 \cdot 3.14 \cdot 518.2 \cdot 133.171 = 867200 \text{ мм}^2.$$

Умовна поверхня охолодження генератора без охолоджуючих ребер на станині:

$$S_{маш} = \pi \cdot D_{H1} \cdot (l_1 + 2 \cdot l_{B1}) = 3.14 \cdot 660 \cdot (230 + 2 \cdot 133.171) = 1.029 \cdot 10^6 \text{ мм}^2.$$

Питомий тепловий потік від втрат в активній частині обмотки й від втрат у сталі, віднесених до внутрішньої поверхні охолодження активної частини статора:

$$p_{п1} = \frac{k \cdot \left(\frac{P_{м1} \cdot 2 \cdot l_1}{l_{cp1}} + P_{с\Sigma} \right)}{S_{п1}} = \frac{0.77 \cdot \left(\frac{7526 \cdot 2 \cdot 230}{1230} + 1340 \right)}{374400} = 8.542 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/мм}^2.$$

Те ж, від втрат в активній частині обмотки, віднесених до поверхні охолодження пазів:

$$p_{и.п1} = \frac{\frac{P'_{м1} \cdot 2 \cdot l_1}{l_{cp1}}}{S_{м.п}} = \frac{\frac{7526 \cdot 2 \cdot 230}{1230}}{1.29 \cdot 10^6} = 0.002182 \text{ Вт/мм}^2.$$

Те ж, від втрат у лобових частинах обмотки, віднесених до поверхні охолодження лобових частин обмотки:

$$p_{л1} = \frac{\frac{P'_{м1} \cdot 2 \cdot l_1}{l_{cp1}}}{S_{л1}} = \frac{\frac{7526 \cdot 2 \cdot 230}{1230}}{8.672 \cdot 10^5} = 0.003245 \text{ Вт/мм}^2.$$

					141.4361.КРБ.ПЗ.Р01	Лист
						56
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



Окружна швидкість ротора:

$$v_2 = \frac{\pi \cdot D_{H2} \cdot n_1}{60000} = \frac{3.14 \cdot 513.6 \cdot 1000}{60000} = 26.892 \text{ м/с.}$$

Перевищення температури внутрішньої поверхні активної частини статора над температурою повітря усередині машини:

$$\Delta t_{п1} = \frac{p_{п1}}{\alpha_1} = \frac{0.008542}{13 \cdot 10^{-5}} = 65.708 \text{ }^{\circ}\text{C.}$$

де $\alpha_1 = 13 \cdot 10^{-5}$ – коефіцієнт тепловіддачі поверхні статора визначається з [3, рис. 9-24].

Перепад температур в ізоляції паза й твердих котушок:

$$\Delta t_{и.п1} = \frac{p_{и.п1} \cdot b_{и1}}{\lambda_{\text{екв}}} = \frac{0.002182 \cdot 5.21}{16 \cdot 10^{-5}} = 71.045 \text{ }^{\circ}\text{C,}$$

де $\lambda_{\text{екв}} = 16 \cdot 10^{-5}$ Вт/(мм·град) – еквівалентний коефіцієнт теплопровідності ізоляції в пазу.

Перевищення температури зовнішньої поверхні лобових частин обмотки над температурою повітря усередині генератора:

$$\Delta t_{л1} = \frac{p_{л1}}{\alpha_1} = \frac{0.003245}{1.3 \cdot 10^{-4}} = 24.961 \text{ }^{\circ}\text{C.}$$

Перепад температури в ізоляції лобових частин твердої котушки:

$$\Delta t_{и.л1} = p_{л1} \cdot \frac{b_{и.л1}}{\lambda_{\text{екв}}} = 0.003245 \cdot \frac{0.6}{16 \cdot 10^{-5}} = 12.169 \text{ }^{\circ}\text{C.}$$

де $b_{и.л1} = 0.6$ мм - однобічна товщина ізоляції котушок у лобовій частині.

					141.4361.КРБ.ПЗ.Р01	Лист
						57
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



Середнє перевищення температури обмотки над температурою повітря у
редині генератора:

$$\begin{aligned}\Delta t' &= (\Delta t_{\pi 1} + \Delta t_{и. \pi 1}) \cdot \frac{2 \cdot l_1}{l_{cp1}} + (\Delta t_{л1} + \Delta t_{и. л1}) \cdot \frac{2 \cdot l_{л1}}{l_{cp1}} = \\ &= (65.708 + 71.045) \cdot \frac{2 \cdot 230}{1230} + (24.961 + 12.169) \cdot \frac{2 \cdot 385.13}{12304} = 74.38 \text{ }^{\circ}\text{C}.\end{aligned}$$

Втрати в генераторі зі ступенем захисту IP23, передані повітрю усередині
генератора:

$$\begin{aligned}P'_{\Sigma} &= k \cdot \left(P'_{м1} \cdot \frac{2 \cdot l_1}{l_{cp1}} + P_{c\Sigma} \right) + P'_{м1} \cdot \frac{2 \cdot l_{л1}}{l_{cp1}} + P'_{\pi} + 0.1 \cdot P_{мх} + P_{доб} = \\ &= 0.77 \cdot \left(7526 \cdot \frac{2 \cdot 230}{1230} + 1340 \right) + 7526 \cdot \frac{2 \cdot 385.13}{1230} + 2630 + 0.1 \cdot 1145 + 800 = 11450 \text{ Вт}.\end{aligned}$$

Середнє перевищення температури повітря усередині двигуна над темпера-
турою зовнішнього повітря без охолоджуючих ребер на станині:

$$\Delta t_B = \frac{P'_{\Sigma}}{S_{маш} \cdot \alpha_B} = \frac{11450}{1.029 \cdot 10^6 \cdot 120 \cdot 10^{-5}} = 9.275 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

де $\alpha_B = 120 \cdot 10^{-5}$ - коефіцієнт підігріву повітря з [3, рис. 9-25].

Середнє перевищення температури обмотки над температурою зовнішнього
повітря:

$$\Delta t_1 = \Delta t' + \Delta t_B = 74.38 + 9.275 = 83.655 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Тепловий розрахунок обмотки збудження.

Периметр поперечного перерізу умовної поверхні охолодження котушки:

$$\Pi_{\pi} = h'_{\pi} - 2b_{i3} + a \cdot 24 = 114.743 - 7 - 1.25 \cdot 24 = 137.743 \text{ мм}.$$

					141.4361.КРБ.ПЗ.Р01	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		58



Умовна поверхня охолодження одношарових котушок обмотки з неізованих проводів, намотаних на ребро:

$$S_{\Pi 2} = 2 \cdot p \cdot l_{\text{ср.}\Pi} \cdot \Pi_{\Pi} = 2 \cdot 3 \cdot 812.088 \cdot 137.743 = 671200 \text{ мм}^2.$$

Питомий тепловий потік від втрат в обмотці, віднесений до поверхні охолодження:

$$p_{\Pi} = k \cdot \frac{P_{\Pi}}{S_{\Pi 2}} = 0.77 \cdot \frac{2630}{671200} = 0.003017 \text{ Вт/мм}^2.$$

Коефіцієнт тепловіддачі котушки:

$$\alpha_T = (2.6 + 0.19 \cdot v_2) \cdot 10^{-5} = (2.6 + 0.19 \cdot 26.892) \cdot 10^{-5} = 7.709 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/мм}^2 \cdot ^\circ\text{C}.$$

Перевищення температури зовнішньої поверхні охолодження обмотки:

$$\Delta t_{\Pi, \Pi} = \frac{p_{\Pi}}{\alpha_T} = \frac{0.003017}{7.709 \cdot 10^{-5}} = 39.135 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Середнє перевищення температури обмотки над температурою повітря усередині машини:

$$\Delta t'_{\Pi} = \Delta t_{\Pi, \Pi} + \Delta t_{\text{и.}\Pi} = 39.135 + 7.543 = 46.678 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Середнє перевищення температури обмотки над температурою зовнішнього охолоджуючого повітря:

$$\Delta t_{\Pi} = \Delta t'_{\Pi} + \Delta t_{\text{в}} = 46.678 + 9.275 = 55.953 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

					141.4361.КРБ.ПЗ.Р01	Лист
						59
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



1.14. Характеристики генератора

Регулювальні характеристики генератора.

Для побудови регулювальних характеристик, що виражають залежність $I_{\Pi} = f(I_1)$ при $U_1 = \text{const}$ і $\cos\varphi = \text{const}$, задаються значеннями струму статора від 0 до $1,2I_{1н}$ і за допомогою частотних характеристик визначають відповідні струми збудження. Регулювальні характеристики зведені в таблицю 1.2.

Таблиця 1.2. Регулювальні характеристики

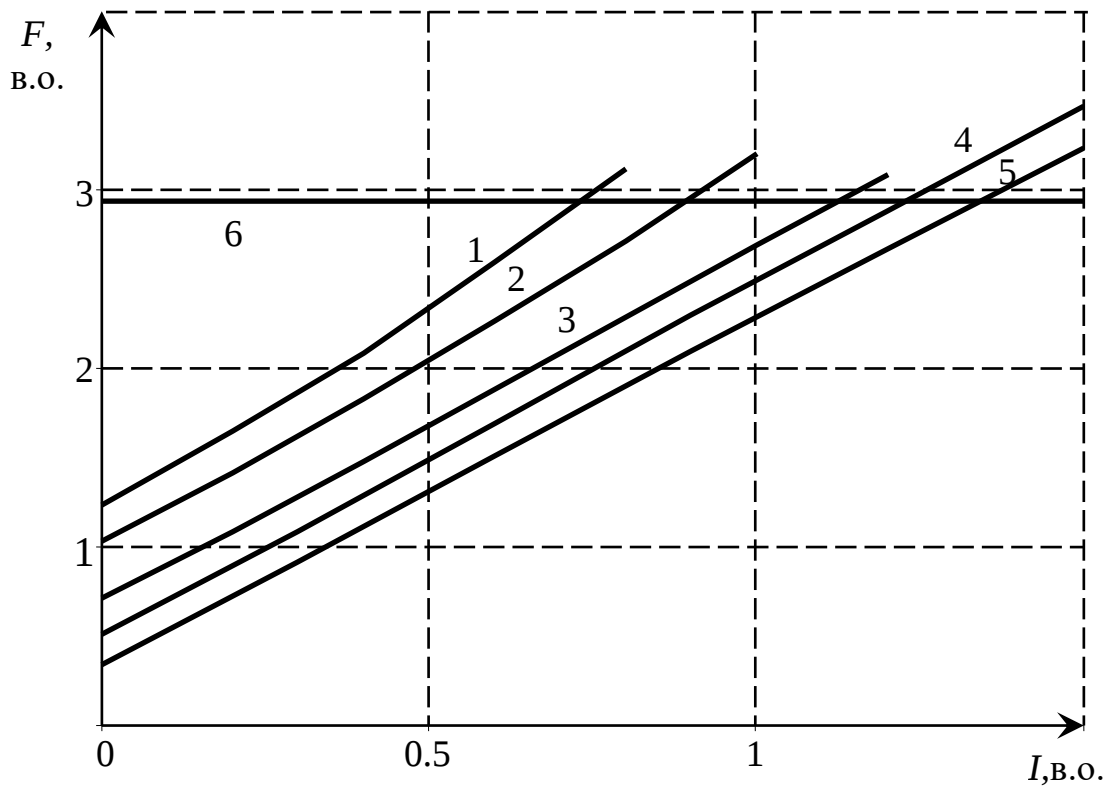
	U=0.4						
I_5^*	0	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	
I_{Π}, A	0.338	0.917	1.513	2.097	2.67	3.238	
	U=0.6						
I_4^*	0	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	
I_{Π}, A	0.515	1.09	1.696	2.295	2.885	3.467	
	U=0.8						
I_3^*	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2
I_{Π}, A	0.714	1.084	1.48	1.885	2.288	2.689	3.088
	U=1.1						
I_2^*	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	
I_{Π}, A	1.027	1.412	1.826	2.27	2.716	3.206	
	U=1.2						
I_1^*	0	0.2	0.4	0.6	0.8		
I_{Π}, A	1.233	1.648	2.087	2.598	3.114		

Зобразимо регулювальні характеристики на рисунку 1.3.

Зовнішні характеристики генератора.

Ці характеристики, що виражають залежність $U_1 = f(I_1)$ при $I_{\Pi} = \text{const}$ і $\cos\varphi = \text{const}$ можуть бути побудовані за допомогою регулювальних характеристик. Зокрема, для побудови зовнішньої характеристики $I_{\Pi,н} = \text{const}$ і $\cos\varphi = \text{const}$ дві крайні крапки, що відповідають $U_{1н}$ при $I_1 = I_{1н}$ і U_0 .

При $I_1 = 0$, уже відомі з попередніх розрахунків. Проміжні крапки знаходять по регулювальних характеристиках, побудованим для значень напруги $U_{1н} < U < U_0$. Зобразимо зовнішню характеристику на рисунку 1.4.



$$1 - F_{\text{пн}1.2} = f(I_1), 2 - F_{\text{пн}1.1} = f(I_2), 3 - F_{\text{пн}0.8} = f(I_3), 4 - F_{\text{пн}0.6} = f(I_4),$$

$$5 - F_{\text{пн}0.4} = f(I_5), 6 - F_{\text{пн}} = f(I_5)$$

Рисунок 1.3 – Регулювальні характеристики синхронного генератора

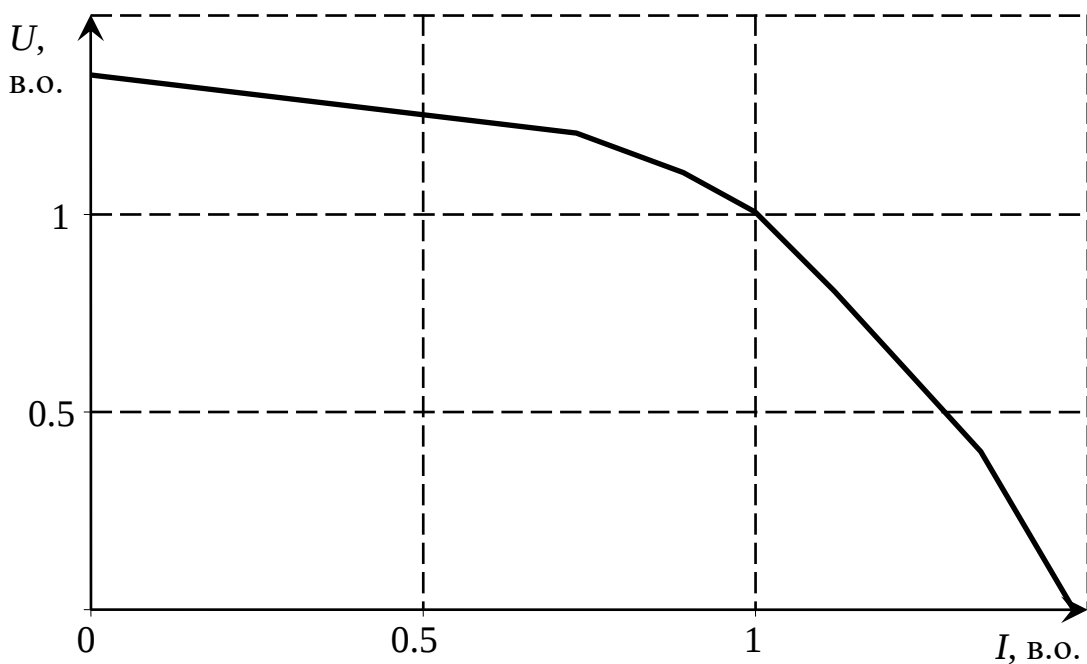


Рисунок 1.4 – Зовнішня характеристика генератора

Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

141.4361.КРБ.ПЗ.Р01

Лист

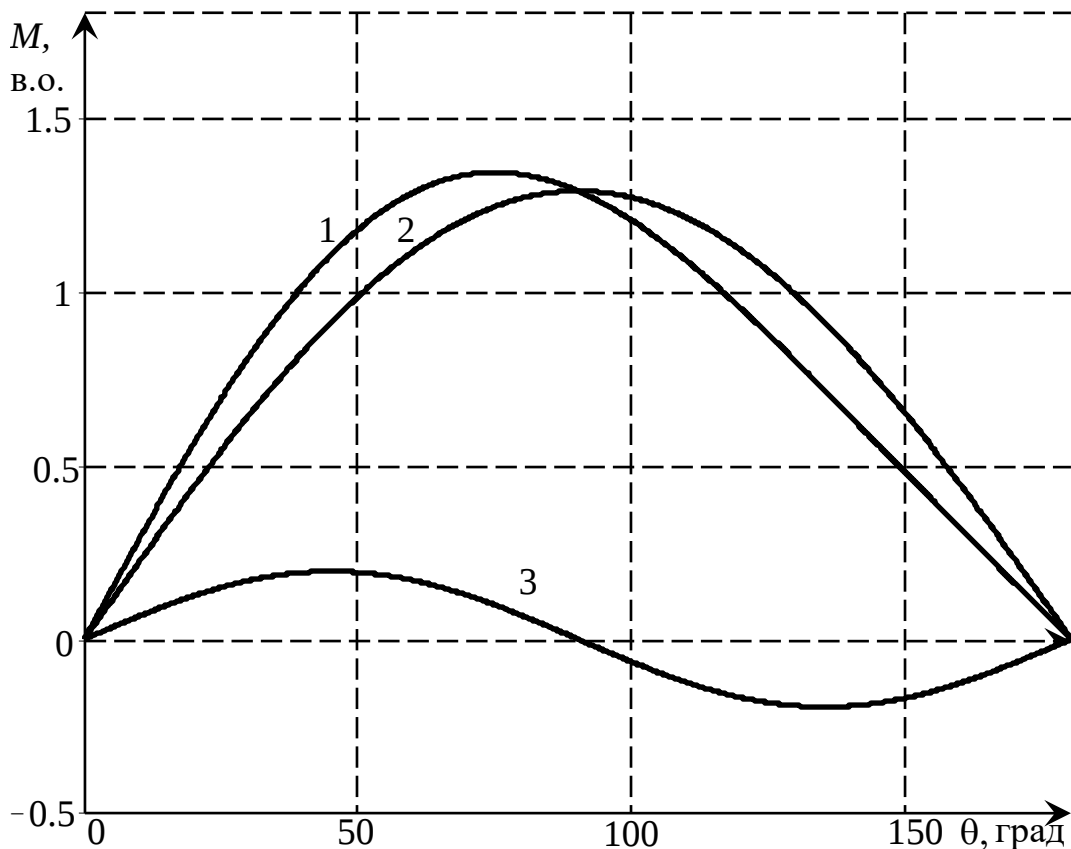
61

Кутові характеристики.

Кутові характеристики синхронних машин виражають залежність активної потужності від кута навантаження θ при $U_1=1$ і $E_0=\text{const}$. Під кутом навантаження θ розуміють кут між магнітною віссю полюса й віссю результуючого магнітного поля статора або між векторами ЕДС E_0 і напруги U_1 . Приблизно, приймаючи параметри синхронної машини постійними, кутову характеристику можна побудувати, задаючись значеннями кута θ от 0 до π .

$$P_* = \frac{F_{\text{п.н}^*}}{x_{d^*}} \cdot \sin \theta + 0.5 \cdot \left(\frac{1}{x_{q^*}} - \frac{1}{x_{d^*}} \right) \cdot \sin 2\theta.$$

Кутові характеристики зображені на рисунку 1.5.



$$1 - P^* = P_1 + P_2, 2 - P_1 = \frac{F_{\text{п.н}^*}}{x_{d^*}} \cdot \sin \theta, 3 - P_2 = 0.5 \cdot \left(\frac{1}{x_{q^*}} - \frac{1}{x_{d^*}} \right) \cdot \sin 2\theta$$

Рисунок 1.5 – Кутові характеристики синхронного генератора

Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

141.4361.КРБ.ПЗ.Р01

Лист

62



1.15. Маса й динамічні показники

Маса сталі сердечника статора:

$$m_{c3\Sigma} = m_{31} + m_{c1} = 36.353 + 147.01 = 183.364 \text{ кг.}$$

Маса сталі полюсів:

$$\begin{aligned} m_{c\Pi} &= 7.8 \cdot 10^{-6} \cdot k_c \cdot l_{\Pi} \cdot (b_{\Pi} \cdot h_{\Pi}^{\prime} + k_k \cdot b_{H,\Pi} \cdot h_{H,\Pi}^{\prime}) \cdot 2 \cdot p = \\ &= 7.8 \cdot 10^{-6} \cdot 0.98 \cdot 240 \cdot (99.383 \cdot 114.743 + 0.8 \cdot 192.107 \cdot 28.587) \cdot 2 \cdot 3 = 127.529 \text{ кг.} \end{aligned}$$

Маса сталі сердечника ротора:

$$\begin{aligned} m_{c2} &= 6.1 \cdot k_c \cdot 10^{-6} \cdot l_1 \cdot \left[(2.05 \cdot h_{c2} + D_2^{\prime})^2 - D_2^{\prime} \right] = \\ &= 6.1 \cdot 0.98 \cdot 10^{-6} \cdot 230 \cdot \left[(2.05 \cdot 48.786 + 129.369)^2 - 129.369 \right] = 72.402 \text{ кг.} \end{aligned}$$

Сумарна маса активної сталі статора й ротора:

$$m_{c\Sigma} = m_{c3\Sigma} + m_{c\Pi} + m_{c2} = 183.364 + 127.529 + 72.402 = 383.294 \text{ кг.}$$

Маса міді обмотки статора:

$$\begin{aligned} m_{m1} &= 8.9 \cdot 10^{-6} \cdot m_1 \cdot (a_1 \cdot \omega_1 \cdot l_{cp1} \cdot S \cdot c) = \\ &= 8.9 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \cdot (3 \cdot 40 \cdot 1230 \cdot 3.537 \cdot 4) = 55.768 \text{ кг.} \end{aligned}$$

Маса міді демпферної обмотки:

$$\begin{aligned} m_{mД} &= 8.9 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot p \cdot (N_2 \cdot S_d \cdot l_{ст}^{\prime} + b_{H,\Pi}^{\prime} \cdot S_c + 0.6 \cdot S_c \cdot C_{\Pi}) = \\ &= 8.9 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 3 \cdot (11 \cdot 28.274 \cdot 284.266 + 187.224 \cdot 52.27 + 0.6 \cdot 52.27 \cdot 2) = 5.247 \text{ кг.} \end{aligned}$$

					141.4361.КРБ.ПЗ.Р01	Лист
						63
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



Сумарна маса міди:

$$m_{\Sigma} = m_{\text{м1}} + m_{\text{м.п}} + m_{\text{мд}} = 55.768 + 95.668 + 5.247 = 156.683 \text{ кг.}$$

Сумарна маса ізоляції:

$$\begin{aligned} m_{\text{и}} &= (3.8 \cdot D_{\text{Н1}}^{1.5} + 0.2 \cdot D_{\text{Н1}} \cdot l_1) \cdot 10^{-4} = \\ &= (3.8 \cdot 660^{1.5} + 0.2 \cdot 660 \cdot 230) \cdot 10^{-4} = 9.479 \text{ кг.} \end{aligned}$$

Маса конструкційних матеріалів:

$$m_{\text{к}} = A \cdot D_{\text{Н1}} + B = 0.32 \cdot 660 - 400 = 611.2 \text{ кг,}$$

де $A=0.32$ та $B= 400$ з [3, § 11-14].

Маса машини:

$$m_{\text{маш}} = m_{\Sigma} + m_{\Sigma} + m_{\text{и}} + m_{\text{к}} = 383.294 + 156.683 + 9.479 + 611.2 \approx 1161 \text{ кг.}$$

Динамічний момент інерції ротора.

Радіус інерції полюсів з котушками:

$$\begin{aligned} R_{\text{п.ср}} &= 0.5 \cdot [0.5 \cdot D_1^2 + 0.85 \cdot (0.5 \cdot D_2 + h_{\text{с2}})^2] \cdot 10^{-6} = \\ &= 0.5 \cdot [0.5 \cdot 518.2^2 + 0.85 \cdot (0.5 \cdot 129.369 + 48.786)^2] \cdot 10^{-6} = 0.039 \text{ м.} \end{aligned}$$

Динамічний момент інерції полюсів з котушками:

$$\begin{aligned} J_{\text{п}} &= (m_{\text{сп}} + m_{\text{м.п}} + m_{\text{мд}}) \cdot 4 \cdot R_{\text{п.ср}}^2 = \\ &= (127.529 + 95.668 + 5.247) \cdot 4 \cdot 0.039^2 = 1.416 \text{ кг/м}^2. \end{aligned}$$

					141.4361.КРБ.ПЗ.Р01	Лист
						64
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



Динамічний момент інерції сердечника ротора:

$$J_{c2} = 0.5 \cdot m_{c2} \cdot 10^{-6} \cdot \left[(0.5 \cdot D_2 + 2 \cdot h_{c2})^2 - (0.5 \cdot D_2)^2 \right] = \\ = 0.5 \cdot 72.402 \cdot 10^{-6} \cdot \left[(0.5 \cdot 129.369 + 2 \cdot 48.786)^2 - (0.5 \cdot 129.369)^2 \right] = 0.802 \text{ кг/м}^2.$$

Маса вала:

$$m_B = 15 \cdot 10^{-6} \cdot l_1 \cdot D_2^2 = 15 \cdot 10^{-6} \cdot 230 \cdot 129.369^2 = 57.74 \text{ кг.}$$

Динамічний момент інерції вала:

$$J_B = 0.5 \cdot m_B \cdot (0.5 \cdot D_2)^2 \cdot 10^{-6} = 0.5 \cdot 57.74 \cdot (0.5 \cdot 129.369)^2 \cdot 10^{-6} = 0.242 \text{ кг/м}^2.$$

Сумарний динамічний момент інерції ротора:

$$J_{и.д} = J_{п} + J_{c2} + J_B = 3.038 + 0.802 + 0.242 \approx 4.081 \text{ кг/м}^2.$$

Загальний вигляд синхронного генератора представлений на рисунку 1.6.

					141.4361.КРБ.ПЗ.Р01	Лист
						65
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

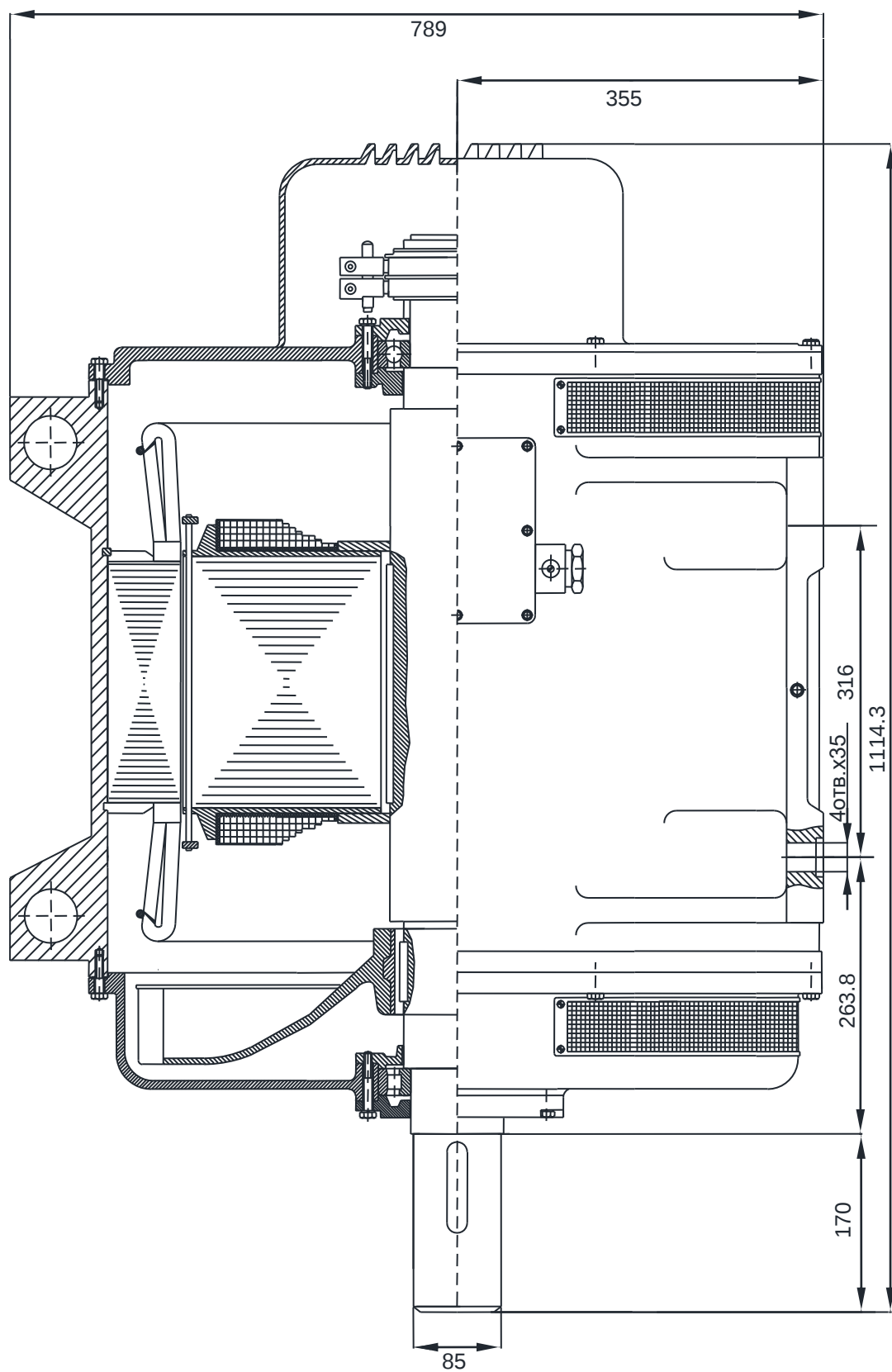


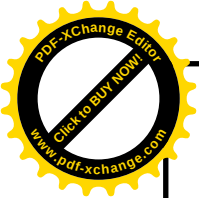
Рисунок 1.6 — Загальний вигляд синхронного генератора, потужністю 160 кВт

Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

141.4361.КРБ.ПЗ.Р01

Лист

9



					141.4361.КРБ.ПЗ.Р02						
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Автоматичне ввімкнення резерву				Лім.	Лист	Листів
Розроб.	Ісаков Д.А.										
Керівник	Новогорецький С.М.										
Консульт.									ННІАЕ НУК		
Н. контр.											
Зав. каф.	Обрубов А.В.										



Розділ 2. Автоматичне ввімкнення резерву (ABP)

2.1. Призначення АВР

Високий рівень надійності електропостачання споживачів забезпечують схеми живлення одночасно від двох і більше джерел (ліній, трансформаторів), оскільки аварійне відключення одного з них не призводить до зникнення напруги на виводах електроприймачів. Незважаючи на ці очевидні переваги багатостороннього живлення споживачів велику кількість підстанцій, які мають два і більше джерел живлення, працюють за схемою одностороннього живлення.

Одностороннє живлення мають також секції власних потреб електростанцій. Застосування такої менш надійною, але більш простої схеми електропостачання в багатьох випадках виявляється доцільним для зниження значень струмів КЗ, зменшення втрат електроенергії в живлячих трансформаторах, спрощення релейного захисту, створення необхідного режиму по напрузі, перетоків потужності тощо. При розвитку електричної мережі одностороннє живлення часто є єдино можливим, так як раніше встановлене обладнання та релейний захист не дозволяють здійснити паралельну роботу джерел живлення. Використовуються дві основні схеми одностороннього живлення споживачів при наявності двох або більше джерел.

У першій схемі одне джерело включене і живить споживачів, а друге – відключене і знаходиться в резерві. Відповідно цьому перше джерело називається робочим джерелом, а друге – резервним (рисунок 2.1, а, б). У другій схемі всі джерела нормально включені, але працюють окремо на виділених споживачів. Розподіл здійснюється на одному з вимикачів (рисунок 2.1, в, г).

Недоліком одностороннього живлення є те, що аварійне відключення робочого джерела призводить до припинення живлення споживачів. Цей недолік можна усунути швидким автоматичним включенням резервного джерела або включенням вимикача, на якому здійснено поділ мережі. Для виконання цієї операції широко використовуються спеціальні пристрої, що отримали назву

пристроїв автоматичного включення резерву (АВР). Розглянемо принципи використання АВР на прикладі схем, наведених на рисунку 2.1.

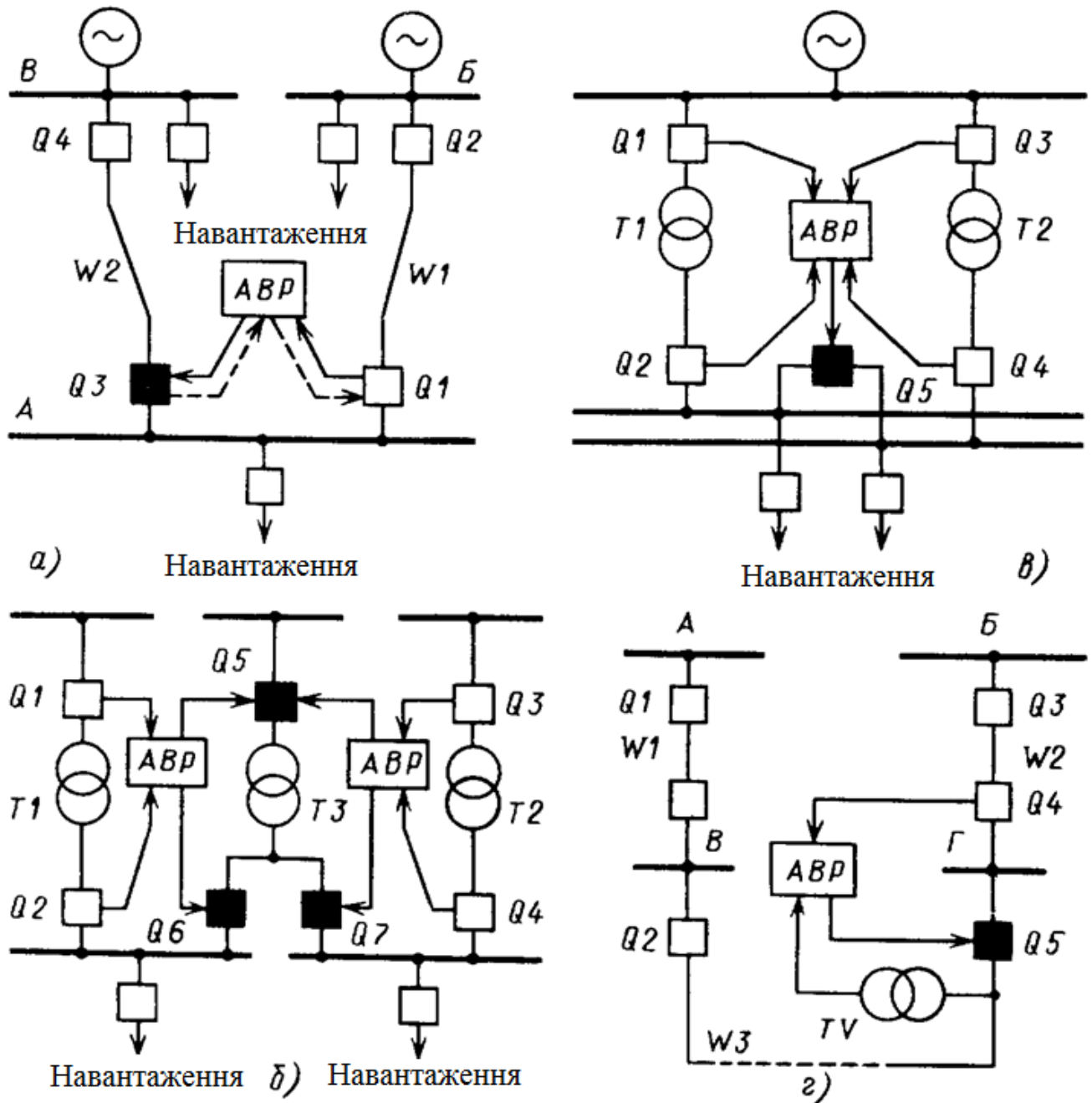


Рисунок 2.1 – Принципи здійснення АВР при різних схемах живлення споживачів

1. Живлення підстанції А (рисунок 2.1, а) здійснюється по робочій лінії W1 від підстанції Б. Друга лінія, що приходить з підстанції В є резервною і знаходиться під напругою (вимикач Q3 лінії W2 нормально відключений). При відключенні лінії W1 автоматично від пристрою АВР вмикається вимикач Q3 і

Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

141.4361.КРБ.ПЗ.Р02

Лист

69



таким чином знову подається живлення споживачам підстанції А. Схеми АВР можуть мати односторонню або двосторонню дію. При односторонньому АВР лінія W1 завжди повинна бути робочою, а лінія W2 – завжди резервною. При двосторонньому АВР будь-яка з цих ліній може бути робочою і резервною.

2. Живлення електродвигунів та інших споживачів власних потреб кожного агрегату електростанції здійснюється зазвичай від окремих робочих трансформаторів ($T1$ і $T2$ на рисунку 2.1, б). При відключенні робочого трансформатора автоматично від схеми АВР вмикається вимикач $Q5$ і один з вимикачів – $Q6$ (при відключенні $T1$) чи $Q7$ (при відключенні $T2$) – резервного трансформатора $T3$.

3. Трансформатори $T1$ і $T2$ ввімкнені на різні системи шин (рисунок 3.1, в). Шиноз'єднувальний вимикач $Q5$ нормально відключений. При аварійному відключенні кожного з робочих трансформаторів автоматично від схеми АВР вмикається вимикач $Q5$, підключаючи навантаження шин, що втратили живлення до трансформатора, що залишився в роботі. Якщо потужність одного трансформатора недостатня для живлення всього навантаження підстанції, при дії АВР повинні вживатися заходи для відключення частини найменш відповідальних споживачів.

4. Підстанції В і Г (рисунок 2.1, г) нормально живляться радіально від підстанцій А і Б відповідно. Лінія W3 знаходиться під напругою з боку підстанції В, а вимикач $Q5$ нормально відключений. При аварійному відключенні лінії W2 пристрій АВР, встановлений на підстанції Г, вмикає вимикач $Q5$, в результаті чого живлення з підстанції Г переводиться на підстанцію В по лінії W3. При відключенні лінії W1 підстанція В і разом з нею лінія W3 залишаються без напруги. Зникнення напруги на трансформаторі напруги TV також приводить в дію пристрій АВР на підстанції Г, яке ввімкненням вимикача $Q5$ подає напругу на підстанцію В від підстанції Г.

Досвід експлуатації показує, що АВР є дуже ефективним засобом підвищення надійності електропостачання. Успішність АВР становить 90-95%.

					141.4361.КРБ.ПЗ.Р02	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		70



Простота схем і висока ефективність зумовили широке застосування АВР в електростанціях і в електричних мережах.

2.2. Основні вимоги до схем АВР

Всі пристрої АВР повинні задовольняти наступним основним вимогам.

1. Схема АВР повинна приходити в дію при зникненні напруги на шинах споживача з будь-якої причини, в тому числі при аварійному, помилковому або мимовільному відключенні вимикачів робочого джерела живлення, а також при зникненні напруги на шинах, від яких здійснюється живлення робочого джерела. Включення резервного джерела часто допускається також при КЗ на шинах споживача.

2. Для того щоб зменшити тривалість перерви живлення споживачів, включення резервного джерела живлення повинно проводитися одразу ж після відключення робочого джерела.

3. Дія АВР має бути однократною, щоб не допускати декількох включень резервного джерела на неусуненому КЗ.

4. Схема АВР не повинна приходити в дію до відключення вимикача робочого джерела, щоб уникнути включення резервного джерела на КЗ в невимкненому робочому джерелі. Виконання цієї вимоги виключає також в окремих випадках несинхронне включення двох джерел живлення.

5. Для того, щоб схема АВР діяла при зникненні напруги на шинах, що живлять робоче джерело, коли його вимикач залишається ввімкненим, схема АВР повинна доповнюватися спеціальним пусковим органом мінімальної напруги.

6. Для прискорення відключення резервного джерела при його включенні на неусуненому КЗ повинно передбачатися прискорення захисту резервного джерела після АВР. Це особливо важливо в тих випадках, коли споживачі, які втратили живлення, підключаються до іншого джерела, що несе навантаження. Прискорений захист діє по колу прискорення без витримки часу. В установках власних потреб, а також на підстанціях, що живлять велику кількість



електродвигунів, прискорення захисту здійснюється до 0,5 с. Таке уповільнення прискореного захисту необхідно, щоб запобігти його неправильному спрацюванню у разі короткочасного замикання контактів струмових реле в момент ввімкнення вимикача під дією стрибку струму, обумовленого зрушенням по фазі між напругою енергосистеми і затухаючої ЕРС гальмуючих електродвигунів, який може досягати 180°.

2.3 Автоматичне включення резервних трансформаторів на теплових електростанціях

На рисунку 2.2 наведена схема АВР трансформаторів власних потреб блокових теплових електростанцій. Показаний у цій схемі робочий трансформатор $T1$ має розщеплені обмотки і підключений відпаюванням до генератору $G1$. Два резервних трансформатора $T2$ і $T3$ приєднані до магістралей резервного живлення 6 кВ А і В. Вимикачі вищої напруги резервних трансформаторів $Q21$ і $Q31$ нормально відключені, а вимикачі нижчої напруги $Q2A$ і $Q2B$, $Q3A$ і $Q3B$ ввімкнені. В розглянутій схемі є можливість заміни робочого трансформатора будь-якого блоку будь-яким з двох резервних $T2$ і $T3$. Залежно від того, який з резервних трансформаторів використовується, вмикаються вимикачі $Q4A$, $Q4B$ або $Q5A$, $Q5B$ (секційні вимикачі встановлюються через два блоки).

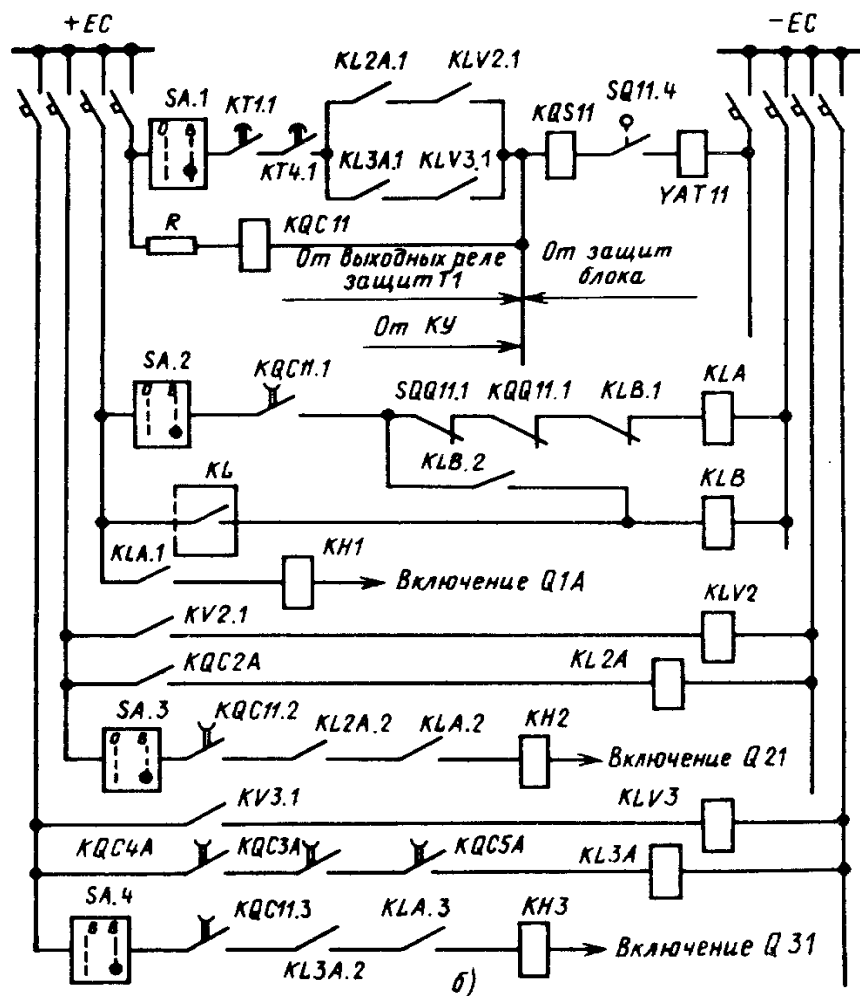
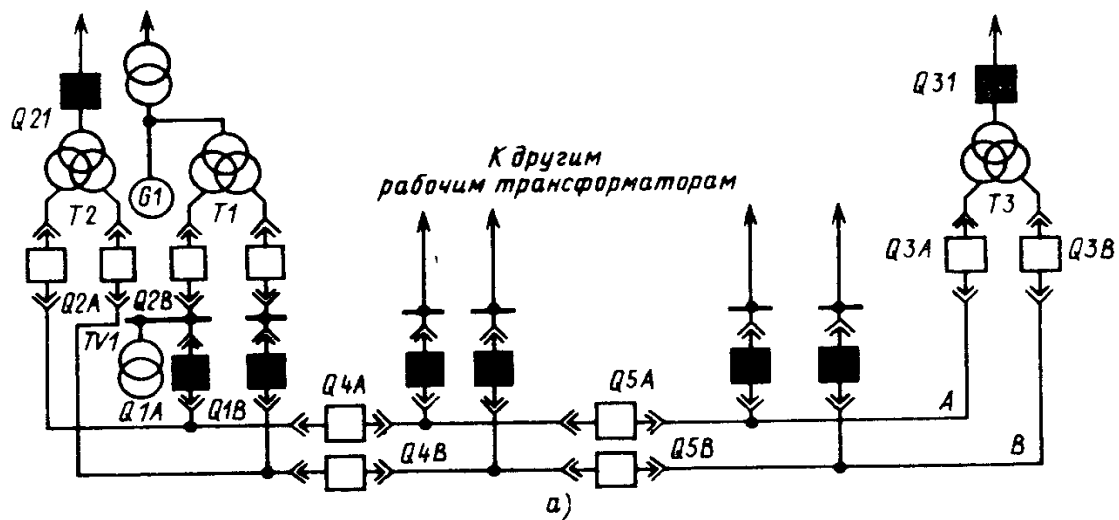
У схемі на рисунку 2.2,а показано АВР вимикачів, що забезпечують відновлення живлення секції власних потреб (СП), що живиться нормально від робочого трансформатора $T1$ через вимикач $Q11$.

У разі аварійного відключення $T1$ будуть ввімкнені вимикач $Q1A$, а також вимикач $Q21$ або $Q31$ резервних трансформаторів $T2$ або $T3$.

Команди на ввімкнення вимикачів подаються реле KLA (рисунок 2.2, б), яке спрацьовує при замиканні допоміжного контакту $SQQ11.1$, вимкненого вимикача $Q11$ через розмикаючий контакт $KQC11.1$, що забезпечує однократність дії АВР. Плюс на ввімкнення вимикача $Q1A$ подається

					141.4361.КРБ.ПЗ.Р02	Лист
						72
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

безпосередньо контактом *KLA.1* через вказівне реле *KH1*, а на ввімкненні вимикачів *Q21* і *Q31* - через контакти *KLA.2* і *KLA.3* відповідно.



а – первинна схема; б – кола оперативного струму

Рисунок 2.2 – Схема АВР трансформаторів власних потреб блокових теплових електростанцій

Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата



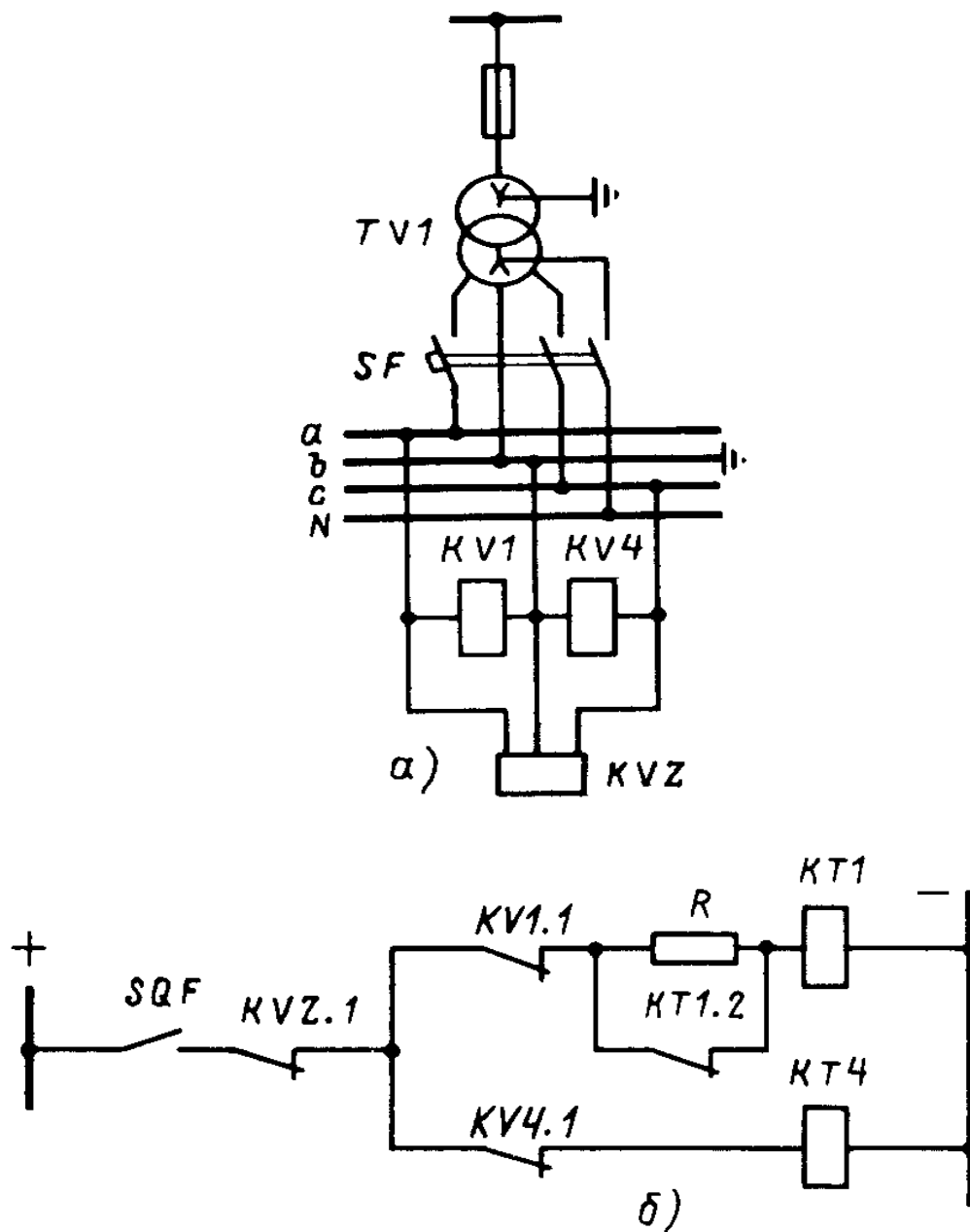
Для вибору напрямку дії схеми АВР на рисунку 2.2,б передбачені спеціальні проміжні реле (*KL2A* і *KL3A*), які контролюють, від якого резервного трансформатора живляться вводи резервного живлення до секції власних потреб відповідного блоку (в даному випадку блоку *G1*).

У схемах АВР вимикача *Q1A*, показаних на рисунку 2.2,б, при використанні для резервування *T2* замкнуті контакти *KV2.1* реле напруги *KV2*, що контролює наявність живильної напруги на стороні трансформатора *T2*, і контакти реле положення "Ввімкнено" *KQC2A* вимикача *Q2A*. Тому під напругою знаходяться реле *KLV2*, *KL2A* і контакти їх у схемі АВР (рисунк 3.6,б) замкнуті. При використанні для резервування *T3* під напругою будуть знаходитися реле *KLV3* і *KL3A* (рисунк 3.6,б).

Дія АВР забороняється в разі відключення вимикача *Q11* вручну (при цьому розмикаються контакти *KQQ11.1*) і в разі пошкодження на шинах або приєднаннях нижчої напруги, коли можуть подіяти резервні захисти живильного трансформатора (при цьому через замкнутий контакт вихідного проміжного реле резервних захистів трансформатора *KL* (рисунк 3.6,б) спрацює реле блокування *KLB*, яке контактом *KLB.1* розімкне коло обмотки реле *KLA*, а через контакт *KLB.2* буде самоутримуватися до розмикання контакту *KQC11.1* і повернення схеми АВР).

При зникненні напруги на шинах секції 6 кВ, коли вимикач робочого трансформатора *Q11* залишається ввімкненим, вступить у дію пусковий орган мінімальної напруги АВР, схема якого наведена на рисунку 2.3. Аналогічно схемі пускового органу мінімальної напруги для пуску схеми АВР в даному випадку необхідно спрацювання двох реле напруги (*KV1* і *KV4* на рисунку 2.3) і реле часу *KT1* і *KT4*. В якості реле *KV4* і *KT4* використовуються відповідні реле першого ступеня захисту мінімальної напруги, призначеної для відключення невідповідальних електродвигунів у режимі самозапуску. На реле *KV4* виконується зазвичай уставка спрацювання 70 В, і воно спрацює одночасно з реле *KV1* при зникненні напруги на шинах, забезпечуючи пуск АВР.

					141.4361.КРБ.ПЗ.Р02	Лист
						74
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



а – кола змінної напруги; б – кола оперативного струму

Рисунок 2.3 – Схема пускового органу АВР

Для виключення помилкового спрацьовування пускового органу АВР та захисту мінімальної напруги електродвигунів при відключенні автоматичного вимикача SF, встановленого у вторинних колах трансформатора напруги, плюс на контакти напруги подається через його допоміжний контакт замкнутий, при ввімкненому автоматичному вимикачі.

Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

141.4361.КРБ.ПЗ.Р02

Лист

75



Передбачені в схемі на рисунку 2.3 блокування не виключають можливість помилкового спрацювання пускового органу у разі перегорання запобіжника в середній фазі на стороні вищої напруги $TV1$, коли одночасно можуть спрацювати обидва реле напруги $KV1$ і $KV4$. Для запобігання в цьому разі помилкового спрацювання пускового органу схеми АВР плюс на його схему подається через розмикальний контакт фільтра-реле напруги зворотної послідовності KVZ (типу РНФ-1М), встановленого в схемі захисту мінімальної напруги електродвигунів, підключених до даної секції шин власних потреб.

У колі відключення відповідного вимикача робочого трансформатора від пускового органу схеми АВР ввімкнені замикаючі контакти проміжного реле $KLV2$ і $KLV3$ (див. рисунок 2.2), замкнуті при наявності напруги на резервному джерелі живлення. Проміжні реле $KLV2$ ($KLV3$) приходять в дію від контактів максимального реле напруги $KV2.1$ ($KV3.1$) і служать для розмноження контактів останнього з метою використання їх у колах інших робочих трансформаторів.

Реле часу $KT1$ і $KT4$ замикають коло відключення вимикача $Q11$ через замикаючі контакти реле $KLV2.1$ ($KLV3.1$) і $KLA2.1$ ($KLA3.1$) в залежності від того, який трансформатор – $T2$ або $T3$ – використовується для резервування робочого трансформатора $T1$.

2.4. Розрахунок уставок АВР. Реле однократності ввімкнення

Витримка часу проміжного реле однократності ввімкнення $t_{o.b}$ від моменту зняття напруги з його обмотки до розмикання контакту повинна з деяким запасом перевищувати час ввімкнення вимикача резервного джерела живлення:

$$t_{o.b} = t_{вкл} + t_{зап},$$

де $t_{вкл}$ – час ввімкнення вимикача резервного джерела живлення; $t_{зап}$ – час запасу, приймається рівним 0,3-0,5 с.

					141.4361.КРБ.ПЗ.Р02	Лист
						76
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



2.5. Пусковий орган мінімальної напруги

Напруга спрацьовування мінімального реле напруги при виконанні пускового органу за схемою обирається так, щоб пусковий орган спрацьовував тільки при повному зникненні напруги і не приходив в дію при зниженнях напруги, викликаних КЗ або самозапуском електродвигунів.

Для виконання цієї умови напруга спрацьовування мінімального реле напруги має дорівнювати:

$$U_{c.p} = \frac{U_{отс.к}}{k_{отс} \cdot k_U};$$

$$U_{c.p} = \frac{U_{сам}}{k_{отс} \cdot k_U},$$

де $U_{отс.к}$ – найменше розрахункове значення залишкової напруги при КЗ; $U_{сам}$ – найменша напруга при самозапуску електродвигунів; $k_{отс}$ – коефіцієнт налаштування, приймається 1,25; k_U – коефіцієнт трансформації трансформатора напруги.

Для визначення найменшої залишкової напруги виконуються розрахунки при трифазних КЗ за реакторами і трансформаторами (точки 1, 2, 3 на рисунку 2.4) і розрахунок самозапуску електродвигунів. Приймається менше значення напруги спрацьовування з отриманих.

У більшості випадків обом умовам задовольняє напруга спрацьовування, яка дорівнює:

$$U_{c.p} = (0.25 \div 0.4) \cdot U_{ном},$$

де $U_{ном}$ – номінальна напруга електроустановки.

У схемах пускових органів мінімальної напруги повинні застосовуватись термічно стійкі реле напруги типу РН-53/60Д, які мають межі уставок 15-60 В і допускають тривале включення на напругу 110 і 220 В.

					141.4361.КРБ.ПЗ.Р02	Лист
						77
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

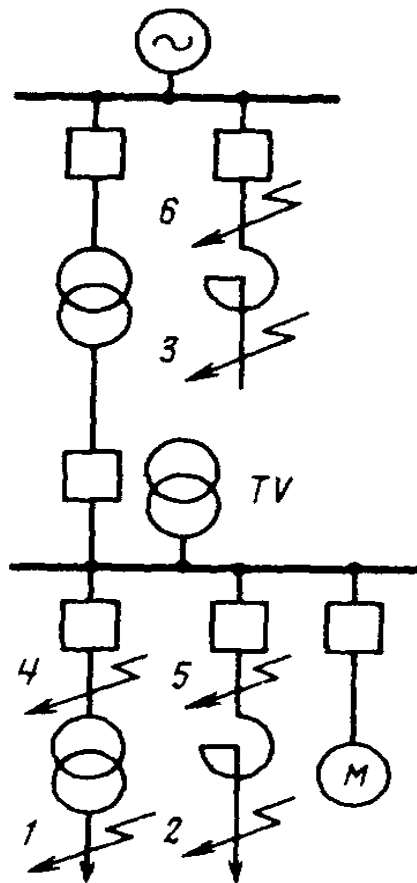


Рисунок 2.4 – Схема для розрахунку уставок пускових органів АВР

При виконанні органу мінімальної напруги за допомогою реле часу змінної напруги за схемами на рисунку 2.5,а,б необхідно мати на увазі наступне: напруга спрацьовування реле часу типів РВ-03 (ЕВ-215 – ЕВ-245) не регулюється і за даними заводу становить $(0,25-0,55)U_{ном.р}$, де $U_{ном.р}$ – номінальна напруга реле. Тому при використанні цих реле в схемах пускових органів мінімальної напруги потрібно обирати реле з напругою спрацьовування не вище розрахованого. Напруга спрацьовування реле часу типів РВ-03 (ЕВ-215К – ЕВ-245К) також не регулюється, але за даними заводу не перевищує $0,35U_{ном.р}$. Тому в схемах пускових органів можна застосовувати будь-які реле цих типів.

Витримка часу пускового органу мінімальної напруги повинна бути на ступінь селективності більше витримок часу захистів, в зоні дії яких залишкова напруга при КЗ становить нижче напруги спрацьовування мінімального реле

напруги або реле часу. Такими зонами є ділянки до реакторів (точки 5, 6) і до трансформаторів (точка 4) на рисунку 2.4.

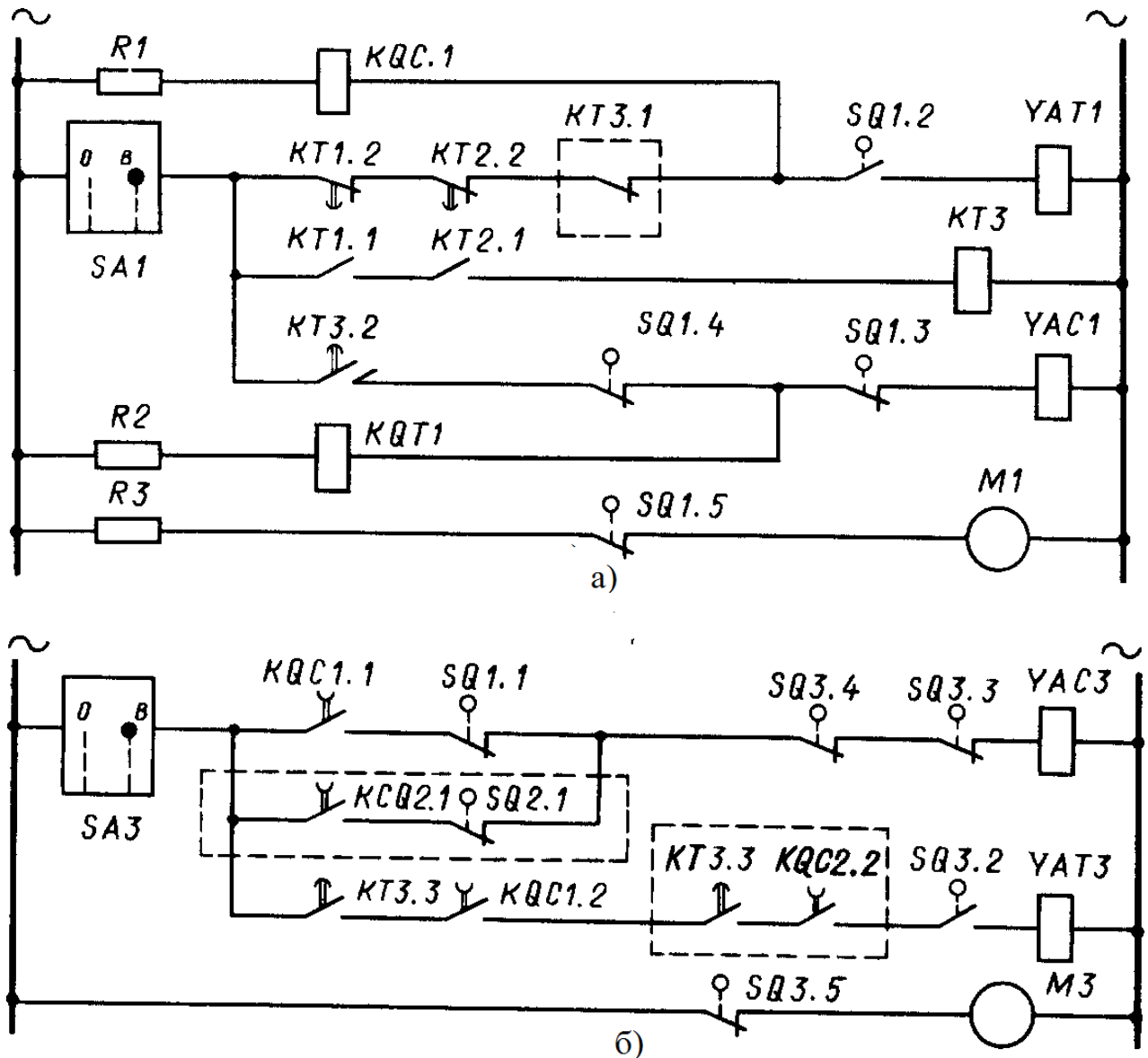


Рисунок 2.5 – Схеми АВР секційного вимикача на змінному оперативному струмі для підстанції з двома трансформаторами, під'єднаних до ліній електропередач без вимикачів

Таким чином, витримка часу пускового органу мінімальної напруги повинна дорівнювати:

$$t_{п.о} = t_1 + \Delta t;$$

$$t_{п.о} = t_2 + \Delta t,$$

Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

141.4361.КРБ.ПЗ.Р02

Лист

79



де t_1 – найбільша витримка часу захисту приєднань, що відходять від шин вис. напруги підстанції; t_2 – найбільша витримка часу захисту приєднань, що відходять від шин нижчої напруги підстанції; Δt – ступінь селективності, що дорівнює 0,4–0,5 с.

2.6. Пусковий орган мінімального струму і напруги

Напруга спрацьовування мінімального реле напруги пускового органу мінімального струму і напруги обирається, як розглянуто вище. При цьому налаштовувати варто тільки від КЗ в точці 3 (рисунок 2.4), так як при КЗ в точках 4 і 5 через трансформатор проходить великий струм КЗ і реле KA тримає контакт розімкненим.

Струм спрацьовування мінімального реле струму повинен бути менше мінімального струму навантаження і визначається за формулою:

$$I_{c.p} = \frac{I_{нагр.min}}{k_{отс} \cdot k_I},$$

де $I_{нагр.min}$ – мінімальний струм навантаження трансформатора; $k_{отс}$ – коефіцієнт налаштування, приймається 1,5; k_I – коефіцієнт трансформації трансформатора струму.

Витримка часу з умови узгодження з захистом, що діє при КЗ в точці 6 (рисунок 2.4) визначається за формулою:

$$t_{п.о} = t_1 + \Delta t.$$

Узгодження з захистами приєднань шин нижчої напруги не потрібно.

					141.4361.КРБ.ПЗ.Р02	Лист
						80
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



2.7. Реле контролю наявності напруги на резервному джерелі

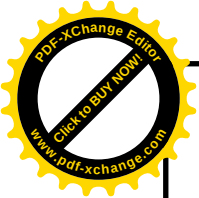
живлення

Напруга спрацьовування цього реле визначається з умови налаштування від мінімальної робочої напруги за формулою:

$$U_{c.p} = \frac{U_{робmin}}{k_{отс} \cdot k_B \cdot k_U},$$

де $U_{робmin}$ – мінімальна робоча напруга; $k_{отс}$ – коефіцієнт налаштування, приймається 1,2; k_B – коефіцієнт повернення реле.

					141.4361.КРБ.ПЗ.Р02	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		81



					141.4361.КРБ.ПЗ.Р03			
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Охорона праці			
Розроб.	Ісаков Д.А.							
Керівник	Новозрецький С.М.							
Консульт.								
Н. контр.								
Зав. каф.	Обрубов А.В.				ННІАЕ НУК			
					Лім.	Лист	Листів	



Розділ 3. Охорона праці

3.1 Вступ

Охорона праці — це система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, спрямованих на збереження здоров'я і працездатності людини в процесі праці. В поняття охорони праці входять і всі ті заходи, що спеціально призначені для створення особливих полегшених умов праці для жінок і неповнолітніх, а також працівників зі зниженою працездатністю.

Шкідливі умови праці - характеризується наявністю шкідливих виробничих чинників, що перевищують гігієнічні нормативи і здатні чинити несприятливий вплив на організм працюючого та (або) на його потомство.

Небезпечні (екстремальні) - умови праці, що характеризуються такими рівнями чинників виробничого середовища, вплив яких протягом робочої зміни (або ж її частини) створює високий ризик виникнення важких форм гострих професійних уражень, отруєнь, каліцтв, загрозу для життя.

Під умовами праці розуміють сукупність факторів виробничого середовища, які впливають на здоров'я і працеспроможність людини в процесі праці, можна розділити на чотири групи, що дозволить більш ефективно поліпшити умови праці на кожному робочому місці:

- санітарно-гігієнічна група — мікроклімат, чистота повітряного середовища, освітлення, шум і вібрація;
- естетична група — оформлення інтер'єрів робочих приміщень, обладнання робочих зон;
- психофізіологічна група — навантаження на м'язову, психіка;
- соціально-психологічна група — взаємовідносини робітників первинного колективу між собою та керівником.

При цьому умови праці для робітників такі, що вони наражаються одночасно впливу різних небезпечних і шкідливих виробничих факторів:

					141.4361. КРБ. ПЗ. Р03	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		83



фізичних, хімічних, біологічних, психологічних. Це підвищує небезпечність виробничого травматизму і професійних захворювань.

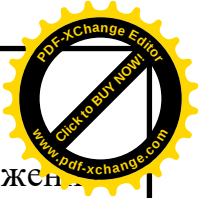
Крім Закону України «Про охорону праці» правове регулювання охорони праці знайшло відображення в нормах глави XI «Охорона праці» (ст. 153-173), глави XII «Праця жінок» (ст. 174-186), глави XIII «Праця молоді» (ст. ст. 187-200) КЗпП.

З охороною праці тісно пов'язана також низка правових норм, що відноситься до інших галузей права України. Це норми цивільного права, що встановлюють майнову відповідальність при ушкодженні здоров'я або смерті громадянина; норми адміністративного права, що визначають адміністративну відповідальність і порядок притягнення до неї громадян органами охорони праці; норми кримінального права, що встановлюють відповідальність при вчиненні злочинів у галузі охорони праці і техніки безпеки.

3.2 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів, впливаючих на людину при експлуатації суднової електростанції

Для машинного відділення характерна наявність таких шкідливих виробничих факторів, як шуми та вібрації внаслідок руху деталей механізмів, вихлопу газів і т.д., загазованість та запилення повітря через наявність парів палива, масел, внаслідок замкнутості приміщення, погане освітлення, так як машинне відділення знаходиться всередині корпусу судна. Для ЦПУ характерні шуми що створюються струмопровідними частинами ГРЩ, кабелями.

Небезпеку в машинному відділенні можуть представляти балони пускового повітря, що знаходяться під надлишковим тиском, неприкриті рухомі частини механізмів, струмопровідні поверхні, що контактують з корпусами генераторів, паливні системи і резервуари і т.д. Машинне відділення на судні, де розташовані синхронні дизель-генератори, відноситься до категорії приміщень підвищеної небезпеки, тому збереження здоров'я обслуговуючого



персоналу здобуває особливо важливе значення, оскільки зниження працездатності членів екіпажу може призвести до аварійних ситуацій з тяжкими наслідками, також машинного відділення, як суднове, піддане впливу хвильової хитавиці, кренів, диферентів..

Під час роботи синхронних дизель-генераторів до небезпечних та шкідливих факторів відносяться:

- висока температура поверхонь дизель-генераторів;
- підвищений рівень статичної напруги;
- підвищений рівень шуму;
- небезпека ураження електричним струмом;
- підвищений рівень вібрації;
- електромагнітні випромінювання.

Висока температура поверхонь збільшує температуру в виробничому приміщенні. Під час перебування в ньому працівників підвищується температура шкіри та глибше лежачих тканин на ділянці, що потрапила під теплове опромінення.

Шум, навіть якщо він невеликий (при рівні 50-60 дБ), спричиняє значне навантаження на нервову систему людини, піддаючи його психологічному впливу. Відсутність необхідної тиші призводить до передчасної втоми, а й нерідко до захворювань. Під впливом сильного шуму (90-100 дБ) притупляється гострота зору, з'являються головний біль і запаморочення, змінюються ритм дихання та серцевої діяльності, підвищується кров'яний внутрішньочерепний тиск, порушується процес травлення. Впливаючи на кору головного мозку, шум оказує дратівливу дію, прискорює процес стомлення, послаблює увагу та сповільнює психічні реакції. З цих причин сильний шум в умовах виробництва може сприяти виникненню травматизму. Рівень шуму суднового високо обертового дизель-генератора складає 110дБ.

Проходячи через організм, електричний струм робить термічну, електролітичну і біологічну дію. Випадки ураження людини струмом можливі

					141.4361. КРБ. ПЗ. Р03	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		85



лише у разі замикання електричного кола через тіло людини або, інакше кажучи, при дотику людини не менш ніж до двох точок кола, між якими існує деяка напруга.

Причиною виникнення вібрації є виникаючі під час роботи машин та агрегатів неврівноважені силові впливи. Ступінь шкідливості вібрації визначається інтенсивністю впливу на людину; даний фактор може стати причиною розладу серцево-судинної та нервової систем, ушкодження слуху, виникнення вібраційної хвороби; крім цього, вібрація може призвести до ушкодження елементів системи, що може послужити причиною аварійної ситуації.

Вплив електромагнітних полів на людину залежить від напруженості електричного та магнітного полів, інтенсивності потоку енергії, частоти коливань, локалізації випромінювань на поверхні тіла та індивідуальних особливостей організму. Механізм такого впливу полягає в тому, що в електричному полі атоми та молекули, з яких складається тіло людини, поляризуються, а полярні молекули (наприклад, води), крім цього, орієнтуються за напрямком розповсюдження електромагнітного поля. Перемінне електричне поле викликає нагрів тканин тіла людини, як за рахунок перемінної поляризації діелектриків, так і за рахунок виникнення струмів провідності. Електромагнітні поля також впливають на тканини як на біологічні об'єкти. Вони впливають на нервову систему, змінюють орієнтацію клітин, біохімічну активність білкових молекул і склад крові. Спостерігається зміна вуглеводного, білкового та мінерального обміну речовин.

Усі ці фактори потрібно усувати, щоб створити необхідні умови праці для членів екіпажу.

3.3 Розрахунок освітлення машинного відділення

Добре освітлення приміщень та робочих місць – одна з найважливіших вимог та заходів профілактики травматизму на судах і загального поліпшення



умов праці. В машинному відділенні джерелом освітлення робочих поверхонь є штучне освітлення. Для визначення необхідної кількості світильників і ламп зробимо світлотехнічний розрахунок за методом коефіцієнту використання світлового потоку.

Машинне відділення має наступні габарити:

- довжина $A = 14 \text{ м};$
- ширина $B = 8 \text{ м};$
- висота $H_0 = 4 \text{ м}.$

В якості світильників вибираємо плафон типу 434у з двома лампами типу С220-60-1. Світильник має опаловий ковпак; захищене конструктивне виконання і є світильником прямого світла.

- Потужність лампи: $60 \text{ Вт};$
- Робоча напруга лампи: $220 \text{ В};$
- Світловий потік лампи: $\Phi_a = 540 \text{ лм};$
- Відстань від світильника до точки підвісу: $h = 0,08 \text{ м}.$

Норма освітлення в машинному відділенні (загального) на рівні $h_c = 0,8 \text{ м}$ від настилу при загальному освітленні лампами розжарювання $E_{\min} = 75 \text{ лк}$ [13, табл. 21].

Висота підвісу світильників над освітлюваною поверхнею:

$$h_p = H_0 - (h_c + h) = 4 - (0,8 + 0,08) = 3,12 \text{ м}.$$

Площа машинного відділення:

$$S = A \cdot B = 14 \cdot 8 = 112 \text{ м}^2.$$

Індекс приміщення:

$$i = \frac{S}{H_0(A + B)} = \frac{112}{4 \cdot (14 + 8)} = 1,273.$$



Коефіцієнти віддзеркалення і використання світлового потоку:

подволака: $\eta_1 = 70\%$;

переборок: $\eta_2 = 50\%$;

палуби: $\eta_3 = 10\%$;

При даному індексі приміщення і коефіцієнтах відбиття для світильника типу 413п коефіцієнт використання світлового потоку складе [8, табл.25]:

$$\eta = 0,47$$

Коефіцієнт запасу при використанні ламп розжарювання для приміщень з малим виділенням пилу, диму та копоти $k_{\text{зап}} = 1,3$ [8, таб.5]. Коефіцієнт нерівномірності освітлення для ламп $z = 1,1$. Кількість ламп у світильнику $n = 2$.

Виходячи з параметрів, що надані вище, визначимо необхідну кількість світильників:

$$N = \frac{E_{\min} \cdot k_{\text{зап}} \cdot S \cdot z}{n \cdot \Phi_a \cdot \eta} = \frac{75 \cdot 1,3 \cdot 112 \cdot 1,1}{2 \cdot 540 \cdot 0,47} \approx 23,6.$$

Обираю $N = 25$.

Необхідно зазначити, що, якими б точними не були розрахунки, світлотехнічні характеристики реальної освітлюваної установки можуть відрізнятися від розрахункових через відхилення характеристик ламп і світильників від середніх каталожних даних, через кольори обладнання приміщення та його розташування, неточність вибраного коефіцієнту відображення барвників та декоративно-обробочних матеріалів і інших факторів.

Розташувати світильники необхідно таким чином, щоб у кожній точці приміщення було приблизно однакове освітлення.

3.4 Розробка заходів для забезпечення безпеки на судні

Під час виконання різного роду роботи на судні, на людину можуть діяти небезпечні фактори, це і ураження електричним струмом, і дія габаритних

					141.4361. КРБ. ПЗ. Р03	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		88

механізмів, які наприклад не надійно закріплені і т. д. Щоб цього не відбулося, потрібно дотримуватися правил техніки безпеки на судах морського флоту.

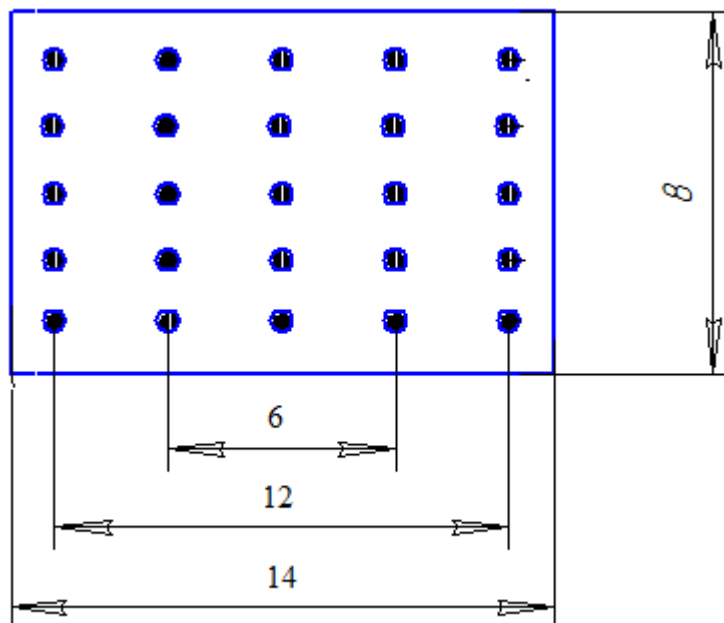


Рисунок 3.1 – Розташування світильників в машинному відділенні

У період експлуатації на судах різного призначення роботи з технічного обслуговування електрообладнання здійснюються електротехнічним персоналом під керівництвом старшого електромеханіка (електромеханіка) за погодженням із старшим механіком при повному або частковому знятті напруги, а у виняткових випадках - без зняття напруги при дотриманні необхідних заходів безпеки.

При виробництві робіт з електрообладнанням повинні використовуватися електрозахисні засоби - основні і додаткові. До основних електрозахисних засобів відносяться: ізолюючі штанги, покажчики напруги, електровимірювальні кліщі та інші. До додаткових засобів відносяться: діелектричні рукавички, діелектричні килимки, діелектричні калоші та боти, ізолюючі підставки, огорожувальні пристрої, знаки безпеки, переносні заземлення та інші. При експлуатації засоби захисту піддають періодичним і



позачерговим випробувань. Позачергові випробування проводять після ремонту за нормами приймально-здавальних випробувань. При всіх видах випробувань перевіряють механічні і електричні характеристики засобів захисту.

Для підготовки робочого місця при роботах з частковим або повним зняттям напруги слід:

1. Здійснити необхідні відключення на ГРЩ і вжити заходів, що перешкоджають подачі напруги до місця роботи внаслідок помилкового чи самовільного включення комутаційної апаратури;
2. Вивісити застережні знаки і встановити огороження; застосовувати електрозахисні засоби - діелектричні рукавички, килимки і т.п.;
3. Переконавшись в справності приладів і перевірити відсутність напруги на частини установки, призначеної для роботи;
4. В необхідних випадках накласти переносне заземлення та вивісити табличку з написом: "ПРАЦЮВАТИ ТУТ".

На струмовідних частинах допускається як виняток виробництво аварійних робіт під напругою. Така робота повинна проводитися кваліфікованими та досвідченими особами електротехнічного персоналу з дозволу старшого електромеханіка за погодженням із старшим механіком під керівництвом електромеханіка.

Забороняється застосування ножівок, напилків, металевих рулеток, міток та іншого неізолюваного інструменту при роботах на ділянках, що знаходяться під напругою.

Всі включення і відключення на ГРЩ з метою випробування в роботі брашпиля, шпиля, швартовних, вантажних і буксирних лебідок виробляє електротехнічний персонал (а також вахтовий механік). Включення з метою випробування в роботі рульового пристрою, системи дистанційного керування головного двигуна, стабілізаторів хитами, підрулює пристрою повинен виробляти електротехнічний персонал спільно з 2-м механіком.

					141.4361. КРБ. ПЗ. Р03	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		90



На рукоятках автоматів, вимикачів, роз'єднувачів, рубильників, на ключах і кнопках управління, а також на підставах запобіжників, за допомогою яких може бути подана напруга до місця робіт, особою, яка провадить відключення, вивішується табличка з написом: "НЕ ВКЛЮЧАТИ! ПРАЦЮЮТЬ ЛЮДИ" . При цьому запобіжники повинні бути вийняті з гнізд. Зняття табличок і включення електроживлення можуть бути зроблені після закінчення робіт особою, що встановив попереджувальні знаки.

У випадках, коли робота виконується без застосування переносних заземлень, повинні бути вжиті додаткові заходи, що перешкоджають помилковому поданню напруги до місця роботи: механічне замикання приводів відключених апаратів, зняття запобіжників, застосування ізолювальних накладок в рубильниках, автоматах, контакторах і т.п. При неможливості застосування зазначених заходів мають бути від'єднанні кінці лінії живлення.

Перед початком всіх видів робіт в електроустановках із зняттям напруги перевірка відсутності напруги повинна проводитися між усіма фазами та кожної фази по відношенню до корпусу і до нульового проводу (якщо такий є).

Накладення переносного заземлення є мірою захисту працюючих від випадкового появи напруги живлення або наведеного (потенціалу). Переносне заземлення застосовується при виробництві робіт в розподільних щитах, шафах і пускових станціях при повному знятті напруги, на кабельних магістралях і в разі, коли місце виконання робіт пов'язане з розгалуженим ланцюгом. Необхідність накладення переносного заземлення в кожному конкретному випадку визначається електромеханіком судна. Заземлення повинні бути накладені на струмовідні частини всіх фаз відключеній для виконання робіт частини електроустановки з усіх боків, звідки може бути подана напруга (у тому числі і внаслідок зворотної трансформації). Ці заземлення можуть накладатися за допомогою спеціальних пристосувань (перемичок, штанги тощо) та повинні бути відокремлені від струмовідних частин або обладнання,

					141.4361. КРБ. ПЗ. Р03	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		91



на якому безпосередньо проводиться робота, автоматами, роз'єднувачами, вимикачами, рубильниками, знятими запобіжниками, демонтованими ділянками і т.п. . Переносне заземлення має бути попередньо приєднане до корпусу судна, а потім (після перевірки відсутності напруги на частинах, що підлягають заземленню) накладається на струмоведучі частини і надійно кріпиться до них за допомогою струбцин, затискачів та інших пристосувань. Знімати заземлення слід в зворотному порядку, тобто спочатку зняти його зі струмовідних частин, а потім від'єднати від корпусу.

Догляд за колектором на працюючій машині допускається проводити одній особі електротехнічного персоналу при дотриманні наступних заходів обережності:

1. працюючий повинен остерігатися захоплення одягу або обтиральних матеріалів обертовими частинами машин; працювати слід в налокітниках, щільно стягуючих руку у зап'ястя, або з застебнутими у зап'ястя рукавами;
2. з боку колекторів і у кілець ротора повинні бути розстелені гумові діелектричні мати або робота повинна проводитися в діелектричних калошах;
3. забороняється торкатися руками одночасно струмовідних частин і заземлених частин машини, а також інших механізмів і конструкцій. Повинен застосовуватися інструмент з діелектричними рукоятками.

При виробництві робіт на електродвигунах або механізмі, що приводиться в рух електродвигуном, останній повинен бути зупинений, з нього необхідно зняти напругу, а на ключі керування або приводі вимикача вивісити табличку з написом: "НЕ ВМИКАТИ! ПРАЦЮЮТЬ ЛЮДИ".

					141.4361. КРБ. ПЗ. Р03	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		92



Висновки

В результаті дипломного проектування розрахований явнополюсний синхронний генератор потужністю 160 кВт. У відповідності до розрахунку параметрів генератора коефіцієнт корисної дії склав 92,5 %, а маса генератора – 1161 кг. Крім того були розраховані кутова, регулювальна та зовнішня характеристики генератора.

Також був проведений аналіз роботи систем автоматичного ввімкнення резерву (АВР). Зокрема, розглянуті питання про автоматичне включення резервних трансформаторів на теплових електростанціях та особливості розрахунку уставок АВР. Наведені формули свідчать, що напруга спрацьовування мінімального реле напруги при виконанні пускового органу за схемою обирається так, щоб пусковий орган спрацьовував тільки при повному зникненні напруги і не приходив в дію при зниженнях напруги, викликаних КЗ або самозапуском електродвигунів. Крім цього витримка часу проміжного реле однократності ввімкнення від моменту зняття напруги з його обмотки до розмикання контакту повинна з деяким запасом перевищувати час ввімкнення вимикача резервного джерела живлення.

					141. 4361. КРБ. ПЗ.	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		93



Література

1. Веретенніков Л.П. Дослідження процесів в судових електроенергетичних системах. Теорія и методи. –Л.: Суднобудування, 1975. –376 с.
2. Гольдберг О.Д., Гурин Я.С., Свириденко І.С. Проектування електричних машин. : Підручник для вузів – М.: Вища школа, 2001.
3. Проектування електричних машин. Копилов І. П., Горяйнов Ф. А., Клоков Б. К. та ін. – М.: Енергія, 1980. – 495 с.
4. Ахматов М.Г. Синхронні машини. Спеціальний курс: Учбовий посібник для вузів по спец. "Електричні машини".– М.: Вища школа, 1984.
5. Іванов-Смоленський А.В. Електричні машини.: Підручник для вузів – М.: Енергія, 1980.
6. Вольдек А.І. Електричні машини. Підручник для вузів.– Л.: Енергія, 1974.– 840 с.
7. Подимака В.І. Проектування автоматичних судових електроенергетичних систем. –Миколаїв: МКІ, 1980.
8. Горев А.А. Перехідні процеси синхронної машини.– Л.: Енергія, 1950.
9. Мелешкін Г.А. “Перехідні режими судових електроенергетичних систем.” - Л.: “Суднобудування” 1971.
10. Сувалов Л.В. “Довідник по розрахункам судових автоматизованих систем” –Л.: Суднобудування, 1989 – 408с.
11. Сухарев Е.М. “Суднові електричні станції, сіті, та їх експлуатація”: Підручник: – Л.: Суднобудування, 1986.
12. Коваленко В.П. Автоматичне регулювання збудження та стійкість судових синхронних генераторів. – Л., "Судостроение", 1976.
13. “Охорона праці в машинобудуванні”: Підручник./ Під ред. Юдіна Е.Л. – М.: Машинобудування, 1976. – 336с.
14. Тубальцев А.М. Виробниче освітлення та його розрахунок: Навчальний посібник. – Миколаїв: УДМТУ, 2001. – 84 с.
15. Фомін П.А. “Основи техніки безпеки в електроустановках”: Навчальний посібник. –М.: Енергоіздат.

					141. 4361. КРБ. ПЗ.	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		94