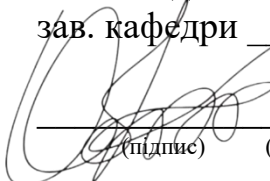


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ  
імені адмірала Макарова  
Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки  
кафедра суднових електроенергетичних систем

Рекомендовано до захисту  
зав. кафедри СЕЕС

  
Обрубов А.В.  
(підпис) (прізвище та ініціали)  
«    »      20   р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»

на тему «Проектування синхронного збудника  
для безщіткового синхронного генератора»

Виконав: студент IV курсу, групи 4301з  
спеціальності

141. Електроенергетика, електротехніка  
та електромеханіка

освітня програма

Електромеханіка та електроенергетика

  
Юрескул Л.О.  
(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*

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Гарант освітньої програми \_\_\_\_\_  
*д.т.н., проф. Волянська Я.Б.*

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

*Юрескула Леоніда Олександровича*

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи \_\_\_\_\_ *Проектування синхронного збудника для безщіткового синхронного генератора*

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 генератор явнополюсної конструкції потужністю 250 кВт і частотою обертання 1500 об/хв*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) *1. Проектування явнополюсного синхронного генератора 2. Проектування збудника для безщіткового синхронного генератора 3. Охорона праці*

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)  
*1. Загальний вид судового синхронного генератора 2. Схеми статорної обмотки основного генератора та роторної обмотки збудника 3. Характеристики основного синхронного генератора та збудника 4. Характеристика холостого ходу генератора та діаграма Blondеля 5. Зовнішня, регульовальна та кутова характеристики явно полюсного синхронного генератора.*

## 6. Консультанти розділів роботи

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

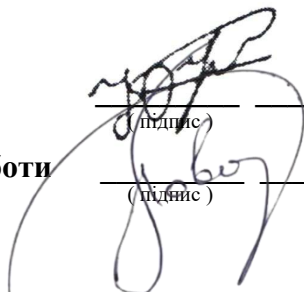
7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_ 02.02.2026 \_\_\_\_\_

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів дипломного роботи                               | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------|----------|
| 1     | <i>Розрахунок суднового синхронного генератора</i>           | 09.03.2026                    | Виконано |
| 2     | <i>Розрахунок збудника для безціткової системи збудження</i> | 13.04.2026                    | Виконано |
| 3     | <i>Виконання розділу з охорони праці</i>                     | 11.05.2026                    | Виконано |
| 4     | <i>Оформлення дипломної роботи</i>                           | 25.05.2026                    | Виконано |
|       |                                                              |                               |          |
|       |                                                              |                               |          |
|       |                                                              |                               |          |
|       |                                                              |                               |          |
|       |                                                              |                               |          |

Студент

Керівник роботи



Юрескул Л.О.

(прізвище та ініціали)

Новогрецький С.М.

(прізвище та ініціали)

## Анотація

В даній кваліфікаційній роботі запроектований явнополісний синхронний генератор та збудник до нього. До плану роботи належать:

1. Розрахунок основного явнополісного синхронного генератора;
2. Розрахунок збудника синхронного генератора;
3. Проробка питань щодо охорони праці.

В якості збудника використовується обернений синхронний генератор, живлення обмотки збудження якого забезпечується від якоря генератора. Розроблений синхронний генератор являється безконтактним. Безщіткові синхронні генератори (БСГ) на відміну від щітково-контактних, мають вищу безвідмовність і більший термін служби, ніж машини з щітково-контактними вузлами. Окрім цього, важливою перевагою всіх безщіткових синхронних машин є те, що вони можуть працювати у вибухонебезпечному, хімічно активному і вогнебезпечному середовищі, тому вимоги до умов експлуатації істотно спрощуються.

Описані заходи по опрацюванню вимог по охороні праці, що є однією з основних проблем на сьогоднішній день.

## Abstract

This qualification thesis presents the design of a salient-pole synchronous generator and its exciter. The scope of the project includes:

1. Calculation and design of the main salient-pole synchronous generator;
2. Calculation and design of the synchronous generator exciter;
3. Consideration of occupational health and safety issues.

An inverted synchronous generator is used as the exciter, with its field winding supplied from the armature winding of the main generator. The designed synchronous generator is a brushless machine.

Brushless synchronous generators (BSGs), unlike brush-contact generators, provide higher reliability and a longer service life due to the absence of brushes and slip rings. In addition, an important advantage of all brushless synchronous machines is their ability to operate in explosive, chemically aggressive, and flammable environments. As a result, the requirements for operating conditions are significantly simplified.

The main geometric, dimensional, weight, and electromagnetic parameters of both the synchronous generator and its exciter were determined during the design process.

The project also describes measures aimed at ensuring compliance with occupational health and safety requirements, which remain one of the most important issues in modern industrial practice.

|       |      |          |        |      |                      |      |
|-------|------|----------|--------|------|----------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                      | 3    |

## Зміст

|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| Анотація                                                                | 3  |
| Зміст                                                                   | 4  |
| Вступ                                                                   | 6  |
| Розділ 1. Проектування судового явнополюсного синхронного генератора    | 10 |
| 1.1 Магнітний ланцюг машини                                             | 11 |
| 1.2 Сердечник статора синхронної мани                                   | 14 |
| 1.3 Розрахунок параметрів обмотки статора                               | 16 |
| 1.4 Обмотка статора із прямокутними відчиненими                         | 19 |
| 1.5 Сердечник ротора                                                    | 24 |
| 1.6 Демпферна (пускова) обмотка                                         | 27 |
| 1.7 Розрахунок магнітного кола при холостому ході                       | 29 |
| 1.8 Активний і індуктивний опір розсіювання обмотки статора             | 40 |
| 1.9 Розрахунок магнітного кола при навантаженні                         | 43 |
| 1.10 Система збудження                                                  | 47 |
| 1.11 Параметри обмоток і постійні часу                                  | 51 |
| 1.12 Втрати і ККД                                                       | 60 |
| 1.13 Тепловий і вентиляційний розрахунок                                | 63 |
| 1.14 Вентиляційний розрахунок                                           | 68 |
| 1.15 Характеристики машин                                               | 69 |
| 1.16 Маса і динамічні показники                                         | 72 |
| Розділ 2. Проектування збудника для безщіткового синхронного генератора | 76 |
| 2.1. Вихідні дані для розрахунку збудника                               | 77 |

|                                                                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.2 Розрахунок геометричних параметрів ротора                                                                     | 79  |
| 2.3 Розрахунок геометричних параметрів статора                                                                    | 86  |
| 2.4 Розрахунок магнітного кола при холостому ході                                                                 | 87  |
| 2.5 Характеристики намагнічування й холостого ходу                                                                | 94  |
| 2.6 Розрахунок опорів розсіювання обмотки статора та<br>розрахунок магнітного кола за номінального навантаження   | 95  |
| 2.7 Розрахунок обмотки збудження, параметрів обмоток<br>та сталих часу                                            | 104 |
| 2.8 Масові показники                                                                                              | 112 |
| Розділ 3. Охорона праці                                                                                           | 114 |
| Вступ                                                                                                             | 115 |
| 3.1 Небезпечні та шкідливі виробничі фактори, які<br>впливають на людину пр. експлуатації суднової електростанції | 117 |
| 3.2 Розрахунок освітлення машинного відділення                                                                    | 120 |
| 3.3 Заходи щодо безпеки на судні                                                                                  | 122 |
| Висновки                                                                                                          | 124 |
| Література                                                                                                        | 125 |

## Вступ

Безвідмовність і термін служби синхронних генераторів з електромагнітним збудженням визначаються в основному трьома чинниками:

- якістю електричної ізоляції;
- якістю підшипникових вузлів;
- безвідмовністю і ресурсом щітково-контактного пристрою.

Перші два чинники мають важливе значення і визначаються рівнем розвитку виробництва електроізоляційних матеріалів і підшипників.

Для поліпшення характеристик синхронних генераторів, залежних від роботи щітково-контактного пристрою, необхідне або конструктивне удосконалення цього пристрою, або використання безщікових систем збудження. Не дивлячись на великі зусилля, що робляться для вдосконалення щітково-контактного апарату, значних успіхів в цьому напрямі досягнуто не було.

При застосуванні безщікових систем збудження питання про щітково-контактний пристрій одержує найбільш кардинальне рішення. Безщікові синхронні генератори за інших рівних умов мають вищу безвідмовність і більший термін служби, ніж машини з щітково-контактними вузлами. Окрім цього, важливою перевагою всіх безщікових синхронних машин є те, що вони можуть працювати у вибухонебезпечному, хімічно активному і пожежонебезпечному середовищі, тому вимоги до умов експлуатації істотно спрощуються. Всі названі обставини мають велике значення при рішенні питань вибору типу суднового генератора. Найбільш повне уявлення про відмітні характеристики даних систем збудження можна одержати, проаналізувавши можливі модифікації безщікових синхронних генераторів (БСГ).

У машинах цього типу всі електричні зв'язки між обмотками, а також зв'язки останніх із зовнішньою мережею здійснюються без застосування коваючих контактів. Відсутність контактного переходу між нерухомими еле-

|       |      |          |        |      |                      |      |
|-------|------|----------|--------|------|----------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                      | 6    |

ментами і частиною машини (ротором), що обертається, є першою і найістотнішою особливістю будь-якої БСМ. Потрібна для створення потоку збудження безщікової синхронної машини енергія або підводиться до ротора електромагнітним способом від магнітного поля, створюваного на статичній частині машини, або запасається в роторі при її виготовленні (генератори з постійними магнітами, гістерезисні генератори і т. п.).

У синхронній машині (СМ) з ковзаючими контактами в ланцюзі живлення обмотки збудження перетворення змінного струму в постійний здійснюється або за допомогою щітково-колекторного пристрою збудника, або напівпровідникових або інших випрямних пристроїв. У деяких видах БСМ останнє перетворення змінного струму в постійний є обов'язковим. Більш того, для ряду модифікацій БСМ характерне перетворення електроенергії в ланцюзі збудження не тільки по роду струму, але і по частоті. Природно, що всі названі перетворення в БСГ здійснюються за допомогою безщікових елементів. Необхідність безщікового перетворення електроенергії в ланцюзі збудження по частоті і роду струму є другою характерною особливістю, властивою деяким типам БСМ.

Таким чином, проблема створення БСМ включає рішення задач безщікових способів утворення магнітного поля ротора і безщікового перетворення електричної енергії (по частоті і роду струму), що призначається для живлення обмотки збудження.

Безщіткові синхронні генератори із збудником змінного струму і випрямлячами, що обертаються, найбільш придатні для застосування їх як загальносуднові джерела електроенергії нормальної і підвищеної частоти (до 400 Гц) в діапазоні потужностей від декількох десятків кіловат до декількох мегават і частотах обертання від декількох сотень оборотів в хвилину до 12 000 об/хв.

|       |      |          |        |      |                      |      |
|-------|------|----------|--------|------|----------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                      | 7    |



На підставі викладеного можна виділити найперспективніші для суднових умов модифікації БСГ і зробити деякі висновки про доцільні області їх застосування.

При рішенні цих питань необхідно керуватися основними вимогами, які пред'являються до генераторів суднового призначення:

- висока надійність функціонування в заданих режимах та умовах;
- висока якість електроенергії в сталих і перехідних режимах і стійкість режимів роботи;
- малі значення питомих масогабаритних характеристик.

Враховуючи перспективність БЩСГ із збудником змінного струму, розглянемо порівняльні характеристики безщіткових систем збудження із синхронним та асинхронним збудником.

Система збудження із синхронним збудником і діодами, що обертаються, проста і надійна. Проте наявність такої інерційної ланки, як обмотка збудження збудника, обмежує швидкодію таких систем і погіршує динамічні характеристики БСГ. Значення динамічних характеристик (амплітуда відхилення напруги і час його відновлення) подібних БСГ близькі (або дещо гірше) до відповідних характеристик ССГ із статичними системами збудження. Недоліком БСГ з синхронним збудником і діодами, що обертаються, є тривалий час гасіння поля, оскільки цей процес в початковій фазі досягається за рахунок гасіння поля обмотки збудження збудника.

Система збудження з асинхронним збудником і тиристорами, що обертаються, забезпечує високу швидкодію. Гасіння поля в цій системі здійснюється безпосередньо в обмотці збудження, а тому також є достатньо швидкодійним. Необхідність управління тиристорами за допомогою трансформаторів (або конденсаторів), що обертаються, декілька ускладнює цю систему. Проте ця безщіткова система збудження в даний час є найперспективнішою для загальносуднових генераторів.

|       |      |          |        |      |                      |      |
|-------|------|----------|--------|------|----------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                      | 8    |

Система збудження з асинхронним збудником і діодами, що обертаються, по швидкодії близька до статичних систем самозбудження з тиристорами. Проте наявність трансформатора струму приводить до істотного збільшення її габаритів. Крім того, в системі з асинхронним збудником і діодами, що обертаються, гасіння поля здійснюється триваліший час, ніж в статичних системах самозбудження з тиристорами.

У дипломному проекті проведено розрахунок явнополюсного синхронного генератору із синхронним збудником.

|       |      |          |        |      |                      |      |
|-------|------|----------|--------|------|----------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                      | 9    |

|           |      |                   |        |      |                                                       |           |      |        |
|-----------|------|-------------------|--------|------|-------------------------------------------------------|-----------|------|--------|
|           |      |                   |        |      | 141.4301з.КРБ.ПЗ.Р01                                  |           |      |        |
|           |      |                   |        |      |                                                       |           |      |        |
| Зм.       | Лист | № докум.          | Підпис | Дата | Проектування судового<br>явнополюсного<br>синхронного | Лім.      | Лист | Листів |
| Розроб.   |      | Юрескул Л.О.      |        |      |                                                       |           |      |        |
| Керівник  |      | Новозрецький С.М. |        |      |                                                       |           |      |        |
| Консульт. |      |                   |        |      |                                                       | ННІАЕ НУК |      |        |
| Н. контр. |      |                   |        |      |                                                       |           |      |        |
| Зав. каф. |      | Обрубов А.В.      |        |      |                                                       |           |      |        |

## Розділ 1. Проектування явнополюсного синхронного генератора.

В даному розділі проектується синхронний генератор потужністю 250 кВт

Для проектування синхронного генератора задані наступні вихідні дані:

|                                         |                     |
|-----------------------------------------|---------------------|
| Номінальна потужність                   | 250000 Вт           |
| Кількість фаз                           | $m_1 = 3$           |
| Частота напруги                         | $f_1 = 50$ Гц       |
| Номінальна напруга                      | $U_1 = 230$ В       |
| Частота обертання                       | $n_1 = 1500$ об/хв. |
| Ступінь захисту від навколишніх впливів | IP23                |
| Спосіб охолодження                      | IC01                |
| Кількість пар полюсів                   | $p = 2$             |
| Клас нагрівостійкості ізоляції          | F                   |

### 1.1. Магнітний ланцюг 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] вибираю значення осі обертання залежно від заданої номінальної потужності й від частоти обертання.

Висота осі обертання:  $h = 355$  мм.

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

$$D_{H1} = 660 \text{ мм.}$$

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. Р01. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 11   |

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

$$D_1 = 0.69 \cdot D_{H1} + 6 = 0.69 \cdot 660 + 6 \approx 461.4 \text{ мм.}$$

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

$$x'_{\sigma^*} = 0.08 \text{ в. о.}$$

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

$$k_H \approx \sqrt{\cos^2 \varphi + (\sin \varphi + x'_{\sigma^*})^2} \approx \sqrt{0.8^2 + (0.6 + 0.08)^2} \approx 1.05$$

Попереднє значення КПД:

$$\eta = 0.94\%$$

Розрахункова потужність:

$$P' = \frac{k_H \cdot P_2}{\cos \varphi} = \frac{1.05 \cdot 250000}{0.8} = 328100 \text{ Вт.}$$

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

Лінійне навантаження:  $A_1 = 430 \text{ А/см.}$

Індукція в повітряному зазорі:  $B_\delta = 0.85 \text{ Тл.}$

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 43013. КРБ. ПЗ. Р01. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 12   |

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

$$B_{\delta 0} = \frac{B_{\delta}}{k_H} = \frac{0.85}{1.05} = 0.81 \text{ Тл.}$$

Полісний розподіл сердечника статора:

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_1}{2 \cdot p} = \frac{3.14 \cdot 461.4}{2 \cdot 2} = 362.383 \text{ мм.}$$

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

$$x_{d*} = 2.2 \text{ в. о.}$$

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

$$x_{ad*} = x_{d*} - x_{\sigma} = 2.2 - 0.08 = 2.12 \text{ в. о.}$$

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:

$$\delta = \frac{36 \cdot 10^{-6} \cdot \tau \cdot A_1}{x_{ad*} \cdot B_{\delta 0} \cdot k'} = \frac{36 \cdot 10^{-6} \cdot 362.383 \cdot 430}{2.12 \cdot 0.81 \cdot 1.06} = 3.1 \text{ мм.}$$

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:

$$\delta' = \frac{\delta}{1.125} = \frac{3.1}{1.125} = 2.741 \text{ мм.}$$

Повітряний зазор під краєм полюсного наконечника:

$$\delta'' = \frac{\delta}{0.75} = \frac{3.1}{0.75} = 4.111 \text{ мм.}$$

Дійсний коефіцієнт полюсної дуги:

$$\alpha = 0.72 - 8.57^{-5} \cdot D_1 = 0.72 - 8.57 \cdot 660 = 0.66$$

Розрахунковий коефіцієнт полюсної дуги з [3, рис.11-9]:  $\alpha' = 0.63$ .

## 1.2. 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 використають ізолювання листів лакувкою.

Коефіцієнт заповнення стали:  $k_c = 0.95$

Коефіцієнт форми поля збудження:  $k_B = 1.18$

Обмотувальний коефіцієнт:  $k_{o\delta 1} = 0.91$

Розрахункова довжина сердечника статора:

$$\begin{aligned} l_1' &= \frac{6.1 \cdot 10^7 \cdot P'}{D_1^2 \cdot n_1 \cdot A_1 \cdot B_\delta \cdot \alpha' \cdot k_B \cdot k_{o\delta 1}} = \\ &= \frac{6.1 \cdot 10^7 \cdot 328100}{461.4^2 \cdot 1500 \cdot 430 \cdot 0.85 \cdot 0.63 \cdot 1.18 \cdot 0.91} = 253.485 \text{ мм.} \end{aligned}$$

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. Р01. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 14   |

Обираємо  $l_1=300$  мм. з урахуванням перерахунків.

Кількість пакетів сталі у сердечнику статора:

$$n_{II1} = \frac{l_1}{l_{II1}} = \frac{300}{60} = 5,$$

де  $l_{II1}$  – довжина одного каналу сталі, обираємо з [додатка 3, § 11-3].

Кількість радіальних вентиляційних каналів сердечника статора:

$$n_k = n_{II1} - 1 = 5 - 1 = 4$$

Довжина вентиляційного каналу  $l_{k1}=10$  з [додатка 3, § 9-3].

Конструкторська довжина сердечника статора:

$$l_1 = l_1 + n_k \cdot l_{k1} = 300 + 4 \cdot 10 = 340 \text{ мм.}$$

Відношення конструктивної довжини до внутрішнього діаметру сердечника статора:

$$\lambda = \frac{l_1}{D_1} = \frac{340}{461.4} = 0.737$$

Доцільно щоб це відношення було приблизне  $\lambda_{\max} = 1$  з [3, рис 11-10].

Кількість пазів на полюс і фазу обираємо  $q_1=5$  з [3, § 11-3].

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

Кількість пазів сердечника статора:

$$z_1 = 2 \cdot p \cdot m_1 \cdot q_1 = 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 5 = 60$$



### 1.3. 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 відкритих пазах.

Звичайно обмотку статора виконують шестизонній: кожна зона = 60 ел. градусів. При шестизонній обмотці коефіцієнт розподілу дорівнює:

$$k_{p1} = \frac{0.5}{q_1 \cdot \sin(\frac{\alpha}{2})} = \frac{0.5}{5 \cdot \sin(\frac{12}{2})} = 0.957,$$

$$\text{де } \alpha = \frac{60}{q_1} = 12^\circ.$$

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

Двошарову обмотку виконують із укороченим кроком.

Діаметральний крок:

$$y_{II1} = \frac{\beta_1 \cdot z_1}{2 \cdot p} = \frac{0.8 \cdot 60}{2 \cdot 2} = 12$$

Коефіцієнт укорочення:

$$k_{y1} = \sin(\beta_1 \cdot 90^\circ) = \sin(0.8 \cdot 90^\circ) = 0.951$$

Обмотувальний коефіцієнт:

$$k_{o\delta 1} = k_{p1} \cdot k_{y1} = 0.957 \cdot 0.951 = 0.91$$

Попереднє значення магнітного потоку:

$$\Phi' = \frac{B_{\delta} \cdot D_1 \cdot l_1 \cdot 10^{-6}}{p} = \frac{0.85 \cdot 461.4 \cdot 300 \cdot 10^{-6}}{2} = 0.059 \text{ Вб}$$

Попередня кількість витків в обмотці фази:

$$\omega'_1 = \frac{k_H \cdot U_1}{222 \cdot k_{об1} \cdot \frac{f_1}{50} \cdot \Phi'} = \frac{1.05 \cdot 230}{222 \cdot 0.91 \cdot \frac{50}{50} \cdot 0.059} \approx 20$$

Виберемо число паралельних гілок обмотки статора, що повинне бути одним з дільників числа полюсів:  $a_1=1$ .

Попередня кількість ефективних провідників у пазу:

$$N'_{n1} = \frac{\omega'_1 \cdot a_1}{p \cdot q_1} = \frac{20 \cdot 1}{2 \cdot 5} = 2$$

Приймаємо з урахуванням округлення:  $N_{n1} = 2$

Кількість витків в обмотці фази:

$$\omega_1 = \frac{N_{n1} \cdot p \cdot q_1}{a_1} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 5}{1} = 20$$

Уточнене значення магнітного потоку:

$$\Phi = \Phi' \cdot \frac{\omega'_1}{\omega_1} = 0.059 \cdot \frac{20}{20} = 0.059 \text{ Вб.}$$

Паралельні гілки обмотки повинні містити однакова кількість витків, а сторони котушок - перебувати в магнітному полі в однакових умовах. Вибравши ціле число  $N_{л1}$ , уточнимо попередньо встановлені параметри.

Уточнене значення індукції в повітряному зазорі:

$$B_{\delta} = B_{\delta}^* \cdot \frac{\omega_1^*}{\omega_1} = 0.85 \cdot \frac{20}{20} = 0.85 \text{ Тл.}$$

Попереднє значення номінального фазного струму:

$$I_1 = \frac{P_2}{3 \cdot U_1 \cdot \cos \varphi} = \frac{250000}{3 \cdot 230 \cdot 0.8} = 452.899 \text{ А}$$

Уточнене лінійне навантаження статора:

$$A_1 = \frac{10 \cdot N_{л1} \cdot z_1 \cdot I_1}{\pi \cdot D_1 \cdot a_1} = \frac{10 \cdot 2 \cdot 60 \cdot 452.899}{3.14 \cdot 461.4 \cdot 1} = 374.934 \text{ А/см}$$

Отримане значення  $A_1$  в даному випадку відрізняється від раніше прийнятого  $A_1^*$  більш ніж на 10%, але у від'ємному напрямку, тому все відповідає нормі.

$$\left| \frac{A_1 - A_1^*}{A_1} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{374.934 - 430}{374.934} \right| \cdot 100\% = 14.687\%$$

Зубцовий розподіл по внутрішньому діаметрі статора:

$$t_1 = \frac{\pi \cdot D_1}{z_1} = \frac{3.14 \cdot 461.4}{60} = 24.159$$

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 43013. КРБ. ПЗ. Р01. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 18   |

#### 1.4. Обмотка статора із прямокутними відчиненими пазами.

Попереднє значення магнітної індукції в найбільш вузькому місці зубця вибираємо з [3, табл.9-16]:  $B_{z1\max} = 1.8$  Тл.

Зубцовий розподіл статора в найбільш вузькому місці:

$$t_{1\min} = \frac{\pi \cdot D_1}{z_1} = \frac{3.14 \cdot 461.4}{60} = 24.159 \text{ мм.}$$

де  $h_{u1} = 1$  мм - висота шліца,  $h_k = 3$  мм - висота клина з [3, § 9-4].

Попередня ширина зубця в найбільш вузькому місці:

$$b_{z1\min} = \frac{t_{1\min} \cdot B_\delta}{k_c \cdot B_{z1\max}} = \frac{24.159 \cdot 0.85}{0.95 \cdot 1.8} = 12.009 \text{ мм.}$$

Попередня ширина відчиненого пазу в штампі:

$$b'_{n1} = t_{1\min} - b_{z1\min} = 24.159 - 12.009 = 12.15 \text{ мм.}$$

Ширина шліца відчиненого паза:

$$b_{u1} = 0.6 \cdot b'_{n1} = 0.6 \cdot 12.15 = 7.29 \text{ мм.}$$

Кількість ефективних провідників по ширині паза  $N_u = 2$

Загальна товщина ізоляції по висоті  $h_{ul} = 4,5$  мм з [3, табл. 9-17].

Припуск на збірку сердечника по ширині  $b_c = 0.3$  мм з [3, § 9-4].

Загальна товщина ізоляції по ширині  $b_{ul} = 2,2$  мм з [3, табл. 9-17].

Припустима ширина ефективного провідника по висоті паза:

$$b_{\epsilon\phi}^{\prime} = \frac{b_{n1}^{\prime} - 2 \cdot b_{u1} - b_c}{N_{\text{ш}}} = \frac{12.15 - 2 \cdot 2.2 - 0.3}{2} = 4.825 \text{ мм.}$$

Кількість ефективних провідників по висоті паза:

$$N_B = \frac{N_{n1}}{N_{\text{ш}}} = \frac{2}{2} = 1$$

Попередня висота спинки статора  $B_{c1} = 1.55$  Тл. з [3, § 9-4].

Попередня висота спинки статора:

$$h_{c1}^{\prime} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{2 \cdot k_c \cdot l_1 \cdot B_{c1}} = \frac{0.059 \cdot 10^6}{2 \cdot 0.95 \cdot 300 \cdot 1.55} = 66.586 \text{ мм.}$$

Попередня висота пазу:

$$h_{n1}^{\prime} = \frac{D_{H1} - D_1}{2} - h_{c1}^{\prime} = \frac{660 - 461.4}{2} - 66.586 = 32.714 \text{ мм.}$$

Припустима висота ефективного провідника з витковою ізоляцією:

$$a_{\epsilon\phi}^{\prime} = \frac{c_0 \cdot h_{n1}^{\prime} - h_{u1} - h_k - h_{u1} - h_c}{N_B} = \frac{0.9 \cdot 32.714 - 4.5 - 3 - 1 - 0.3}{1} = 20.643 \text{ мм.}$$

Площа ефективного провідника:

$$S_{\epsilon\phi}^{\prime} = a_{\epsilon\phi}^{\prime} \cdot b_{\epsilon\phi}^{\prime} = 20.643 \cdot 4.8 = 99.602 \text{ мм}^2.$$

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. Р01. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 20   |

Площа елементарного провідника й ширина елементарного провідника  
 $S_{\text{дон}}=6 \text{ мм}^2$ ,  $b_{\text{дон}}=4.5 \text{ мм}$  з [3, § 9-4].

Попередня кількість елементарних провідників:

$$c' = \frac{S'_{\text{эф}}}{S_{\text{дон}}} = \frac{99.602}{6} = 16.6 \text{ мм}^2.$$

Обираємо  $c'=16$  з міркувань отримання необхідної площі елементарного провідника.

Кількість елементарних провідників в одному ефективному по ширині:

$$c_b = \frac{b'_{\text{эф}}}{b_{\text{дон}}} = \frac{4.8}{4.5} \approx 1$$

Кількість елементарних провідників в одному ефективному по висоті паза:

$$c_a = \frac{c'}{c_b} = \frac{16}{1} = 16$$

Загальна кількість провідників:

$$c = c_a \cdot c_b = 16 \cdot 1 = 16$$

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

Розміри неізолюваного елементарного провідника:

$$a' = \left( \frac{a'_{\text{эф}}}{c_a} \right) - \Delta_u = \left( \frac{20.643}{16} \right) - 0.15 = 1.14 \text{ мм}.$$

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. Р01. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 21   |

$$b = \left( \frac{b' \cdot \epsilon \phi}{c_b} \right) - \Delta_u = \left( \frac{4.8}{1} \right) - 0.15 = 4.67 \text{ мм.}$$

Вибираємо провід з [3],  $a=1.12$  мм,  $b=4.5$  мм,  $S=4.825$  мм<sup>2</sup>.

Розмір по ширині паза в штампі:

$$b_{n1} = N_u \cdot c_b \cdot (b + \Delta_u) + 2b_{u1} + b_c = 2 \cdot 1 \cdot (4.5 + 0.15) + 2.2 + 0.3 = 11.18 \text{ мм.}$$

Уточнена ширина зубця в найбільш вузькій частині:

$$b_{31\min} = t_{1\min} - b_{n1} = 24.159 - 11.18 = 12.359 \text{ мм.}$$

Уточнена магнітна індукція в найбільш вузькій частині зубця статора:

$$B_{31\min} = \frac{t_1 \cdot B_\delta}{b_{31\min} \cdot k_c} = \frac{24.159 \cdot 0.85}{12.359 \cdot 0.95} = 1.749 \text{ Тл.}$$

Розмір основної обмотки статора по висоті паза:

$$h_{n.o} = N_B \cdot c_0 \cdot (a + \Delta_u) + h_{u1} = 1 \cdot 0.9 \cdot (1.12 + 0.15) + 4.5 = 5.643 \text{ мм.}$$

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

$$h_{n1} = h_{n.o} + h_k + h_{u1} + h_c = 5.643 + 3 + 1 + 0.3 = 9.943 \text{ мм.}$$

Середній зубцевий розподіл статора:

$$t_{cp1} = \frac{\pi \cdot (D_1 + h_{n1})}{z_1} = \frac{3.14 \cdot (461.4 + 9.943)}{60} = 24.679 \text{ мм.}$$

Середня ширина котушки обмотки статора:

$$b_{cp1} = t_{cp1} \cdot y_{П1} = 24.679 \cdot 12 = 296.154 \text{ мм.}$$

Середня довжина однієї лобової частини обмотки:

$$l_{л1} = 1.3 \cdot b_{cp1} + h_{n1} + 50 = 1.3 \cdot 296.154 + 9.943 + 50 = 444.943 \text{ мм.}$$

Середня довжина обмотки:

$$l_{cp1} = 2 \cdot (l_1 + l_{л1}) = 2 \cdot (340 + 444.943) = 1570 \text{ мм.}$$

Довжина вильоту лобової частини обмотки:

$$l_{B1} = 0.4 \cdot b_{cp1} + \frac{h_{n1}}{2} + 25 = 0.4 \cdot 296.154 + \frac{9.943}{2} + 25 = 148.433 \text{ мм.}$$

Щільність струму в обмотці статора:

$$J_1 = \frac{I_1}{c \cdot S \cdot a_1} = \frac{452.899}{16 \cdot 4.825 \cdot 1} = 5.867 \text{ А/мм}^2.$$

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 43013. КРБ. ПЗ. Р01. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 23   |



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

$$A_1 \cdot J_1 = 374.934 \cdot 5.867 = 2200$$

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

### 1.5. Сердечник ротора.

Марка стали для сердечника ротора приймається такий же як і для сердечника статора. Товщина листів - 0,5 мм.

У синхронних машинах з  $h=315-450$  мм, виконуваних з ексцентричним повітряним зазором під полюсними наконечниками, полюса виконуються з листів стали 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  $k_c=0.95$ .

Довжина сердечника ротора:

$$l_2 = l_1 + 20 = 300 + 20 = 320 \text{ мм.}$$

Довжина шихтованого сердечника полюса:

$$l_n = l_1 + 15 = 300 + 15 = 315 \text{ мм.}$$

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. Р01. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 24   |

Попереднє значення магнітного потоку в номінальному режимі:

$$\Phi = \frac{B_{\delta} \cdot D_1 \cdot l_1 \cdot 10^{-6}}{p} = \frac{0.85 \cdot 461.4 \cdot 300 \cdot 10^{-6}}{2} = 0.059 \text{ Тл.}$$

Ширина дуги полюсного наконечника:

$$b_{н.н} = \alpha \cdot \tau = 0.663 \cdot 362.383 = 240.6 \text{ мм.}$$

Радіус обрису повітряного зазору при ексцентричному повітряному зазорі:

$$R_{н.н} = \frac{D_1}{2 + \frac{8 \cdot D_1 \cdot (\delta'' - \delta')}{b_{н.н}^2}} = \frac{461.4}{2 + \frac{8 \cdot 461.4 \cdot (4.111 - 2.741)}{240.26^2}} = 221.016 \text{ мм.}$$

Ширина полюсного наконечника обумовлена хордою:

$$b'_{н.н} = 2 \cdot R_{н.н} \cdot \sin\left(\frac{0.5 \cdot b_{н.н}}{R_{н.н}}\right) = 2 \cdot 221.016 \cdot \sin\left(\frac{0.5 \cdot 240.26}{221.016}\right) = 228.603 \text{ мм.}$$

Вибираємо висоту полюсного наконечника  $h_{н.н}=12$  мм з конструкторських міркувань.

Висота полюсного наконечника по осі полюса:

$$\begin{aligned} h_{н.н} &= h'_{н.н} + R_{н.н} - \sqrt{R_{н.н}^2 - (0.5 \cdot b'_{н.н})^2} = \\ &= 12 + 221.016 - \sqrt{221.016^2 - (0.5 \cdot 228.603)^2} = 43.852 \text{ мм.} \end{aligned}$$

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. Р01. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 25   |

Поправочний коефіцієнт:

$$k_{\sigma} = 1.25 \cdot h_{н.н} + 25 = 1.25 \cdot 43.852 + 25 = 79.814$$

Попереднє значення коефіцієнта магнітного розсіювання:

$$\sigma' = 1 + \frac{k_{\sigma} \cdot 35 \cdot \delta}{\tau^2} = 1 + \frac{79.814 \cdot 35 \cdot 3.084}{362.383^2} = 1.066$$

Магнітна індукція в основі сердечника полюса  $B'_n = 1.5$  Вб з [3, § 11-2].

Ширина сердечника полюса:

$$b_n = \frac{\sigma' \cdot \Phi' \cdot 10^6}{k_c \cdot l_n \cdot B'_n} = \frac{1.066 \cdot 0.059 \cdot 10^6}{0.95 \cdot 315 \cdot 1.5} = 139.654 \text{ мм.}$$

Висота виступу в підставі полюсного сердечника:

$$h_B = 0.125 \cdot b_n + 2 = 19.457 \text{ мм.}$$

Попередня висота полюсного сердечника:

$$h'_n = 10.5 \cdot \delta' + 0.18 \cdot D_1 = 10.5 \cdot 2.741 + 0.18 \cdot 461.4 = 111.832 \text{ мм.}$$

Приймаємо  $h'_n = 100$  з конструкторських міркувань.

Попередньо внутрішній діаметр сердечника ротора:

$$D'_2 = k_B \cdot \sqrt[3]{\frac{P_2}{n_1}} = 24.3 \cdot \sqrt[3]{\frac{250000}{1500}} = 133.728 \text{ мм,}$$

де  $k_B = 24.3$  з [3, § 11-2].

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. Р01. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 26   |

Висота спинки ротора:

$$h_{c2} = 0.5 \cdot D_1 - \delta - h_n - h_{n.n} - 0.5 \cdot D_2 = \\ = 0.5 \cdot 461.4 - 2.741 - 111.832 - 43.852 - 0.5 \cdot 133.728 = 16.901 \text{ мм.}$$

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

$$h_{c2} = h_{c2} + 0.5 \cdot D_2 = 16.901 + 0.5 \cdot 133.728 = 83.765 \text{ мм.}$$

Магнітна індукція в спинці ротора:

$$B_{c2} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{2 \cdot h_{c2} \cdot l_1 \cdot k_c} = \frac{0.059 \cdot 10^6}{2 \cdot 83.765 \cdot 340 \cdot 0.95} = 1.087 \text{ Вб.}$$

### 1.6. Демпферна (пускова) обмотка.

Демпферна обмотка полюсів синхронної машини виконує ряд функцій. У генераторах вона служить для зниження рівня динамічних перенапруг в обмотці ротора при несиметричних коротких замиканнях, гасіння зворотного синхронного поля, поліпшення форми ЕРС і симетрії напруги при несиметричних завантаженнях фаз, заспокоєння кочень і підвищення динамічної стійкості роботи.

Сумарна площа поперечного перерізу міді обмотки статора, що доводиться на один полюсний розподіл:

$$S_{2\Sigma} = \frac{0.015 \cdot \tau \cdot A_1}{J_1} = \frac{0.015 \cdot 362.383 \cdot 374.934}{5.867} = 347.4 \text{ мм}^2.$$

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 43013. КРБ. ПЗ. Р01. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 27   |

Для зменшення додаткових втрат і пульсацій ЕРС обмотки статора бажано приймати зубцовий розподіл полюсного наконечника ротора  $t_2$ , близьким до зубцовому розподілу статора  $t_1$ , ( $t_2 = t_1$ ).

Попередня кількість стрижнів демпферної обмотки на один полюс:

$$N_2 = 1 + \frac{b_{н.н} - 20}{t_2} = 1 + \frac{240.26 - 20}{24.159} = 10.117$$

Кількість стрижнів демпферної обмотки на один полюс  $N_2 = 10$ .

Попередній діаметр стрижня демпферної обмотки:

$$d_c = 1.13 \cdot \sqrt{\frac{S_{2\Sigma}}{N_2}} = 1.13 \cdot \sqrt{\frac{347.4}{10}} \approx 6.7 \text{ мм.}$$

Визначимо відповідному цьому діаметру перетин стрижня  $S = 36.62 \text{ мм}^2$  з [3, додаток 2].

Мінімальна ширина крайнього зубця полюсного наконечника:

$$b_{32\min} = 0.5 \cdot t_2 = 0.5 \cdot 24.159 \approx 12 \text{ мм.}$$

Уточнене значення зубцового розподілу полюсного наконечника:

$$t_2 = \frac{b_{н.н} - d_c - 2 \cdot b_{32\min}}{N_2 - 1} = \frac{240.26 - 6.7 - 2 \cdot 12}{10 - 1} = 23.284 \text{ мм.}$$

Діаметр круглої частини паза полюсного наконечника:

$$d_{n2} = d_c + 0.15 = 6.75 + 0.15 = 6.85 \text{ мм.}$$

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 43013. КРБ. ПЗ. Р01. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 28   |

Розміри шліца паза демпферної обмотки генераторів вибирають так, щоб ширина  $b_{u2}=3$  мм і висота  $h_{u2}=3$  мм були приблизно однакові з [3, § 11-5].

Попередня довжина стрижня демпферної обмотки:

$$l_{cm} = l_1 + 0.2 \cdot \tau = 340 + 0.2 \cdot 362.383 = 412.477 \text{ мм.}$$

Розміри короткозамикаючих сегментів вибирають такими, щоб їх висота й товщина були рівні:

$$h_c = 2 \cdot d_c = 2 \cdot 6.7 = 13.4 \text{ мм.}$$

$$l_c = 0.7 \cdot d_c = 0.7 \cdot 6.7 = 4.69 \text{ мм.}$$

З урахуванням подальших розрахунків обираємо  $h_c=17$  мм,  $l_c=10$  мм з [3, додаток 2].

Площа поперечного перерізу коротко замикаючих сегментів:

$$S_c = 0.5 \cdot S_{2\Sigma} = 0.5 \cdot 347.4 = 173.7 \text{ мм}^2.$$

З урахуванням подальших розрахунків обираємо  $S_c=198.1$  мм<sup>2</sup>.

### 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.

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 43013. КРБ. ПЗ. Р01. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 29   |

Розрахункова площа поперечного перерізу повітряного зазору:

$$S_{\delta} = \alpha \cdot \tau \cdot (l_1' + 2 \cdot \delta) = 0.63 \cdot 362.383 \cdot (300 + 2 \cdot 3.084) = 69900 \text{ мм}^2.$$

Уточнене значення магнітної індукції в повітряному зазорі:

$$B_{\delta} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{S_{\delta}} = \frac{0.059 \cdot 10^6}{69900} = 0.842 \text{ Тл.}$$

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

$$k_{\delta 1} = 1 + \frac{b_{\text{ш1}}}{\left( t_1 - b_{\text{ш1}} + \frac{5 \cdot \delta \cdot t_1}{b_{\text{ш1}}} \right)} = 1 + \frac{7.29}{\left( 24.159 - 7.29 + \frac{5 \cdot 3.084 \cdot 24.159}{7.29} \right)} = 1.1073$$

Коефіцієнт, що враховує збільшення магнітного опору повітряного зазору внаслідок зубчатої будови ротору:

$$k_{\delta 2} = 1 + \frac{b_{\text{ш2}}}{\left( t_2 - b_{\text{ш2}} + \frac{5 \cdot \delta \cdot t_2}{b_{\text{ш2}}} \right)} = 1 + \frac{3}{\left( 23.284 - 3 + \frac{5 \cdot 3.084 \cdot 23.284}{3} \right)} = 1.0214$$

Коефіцієнт, що враховує зменшення магнітного опору повітряного зазору при наявності радіальних каналів на статорі:

$$k_k = 1 - \frac{1.5 \cdot \delta}{\left[ l_n - 1.5 \cdot \delta \cdot \left( 1 + \frac{l_n}{l_k} \right) \right]} = 1 - \frac{1.5 \cdot 3.084}{60 + 1.5 \cdot 3.084 \cdot \left( 1 + \frac{60}{10} \right)} = 0.95$$

Загальний коефіцієнт повітряного зазору дорівнює:

$$k_{\delta} = k_{\delta 1} \cdot k_{\delta 2} \cdot k_{\kappa} = 1.1073 \cdot 1.0214 \cdot 0.95 = 1.074$$

МРС для повітряного зазору:

$$F_{\delta} = 0.8 \cdot \delta \cdot k_{\delta} \cdot B_{\delta} \cdot 10^3 = 0.8 \cdot 3.084 \cdot 1.074 \cdot 0.842 \cdot 10^3 = 2231 \text{ А.}$$

**МРС для зубців статора.**

Зубовий розподіл на 1/3 висоти зубця:

$$t_{1(1/3)} = \frac{\pi \cdot \left[ D_1 + \left( \frac{2}{3} \right) \cdot h_{n1} \right]}{z_1} = \frac{3.14 \cdot \left[ 461.4 + \left( \frac{2}{3} \right) \cdot 9.943 \right]}{60} = 24.506 \text{ мм.}$$

Ширина зубця:

$$b_{z1(1/3)} = t_{1(1/3)} - b_{n1} = 24.506 - 11.18 = 12.706 \text{ мм.}$$

Розрахункова площа поперечного перерізу зубців статора:

$$S_{z1} = \frac{z_1 \cdot l_1' \cdot b_{z1(1/3)} \cdot k_c \cdot \alpha'}{2 \cdot p} = \frac{60 \cdot 300 \cdot 12.706 \cdot 0.95 \cdot 0.63}{2 \cdot 2} = 34220 \text{ мм}^2.$$

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

$$B_{z1} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{S_{z1}} = \frac{0.059 \cdot 10^6}{34220} = 1.72 \text{ Тл.}$$

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. Р01. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 31   |



Напруженість магнітного поля в зубцях статора дорівнює  $H_{з1} = 20$  А/см з [3, додаток 9].

Середня довжина шляху магнітного потоку:

$$L_{з1} = h_{н1} = 9.943 \text{ мм.}$$

МРС для зубців статора:

$$F_{з1} = 0.1 \cdot L_{з1} \cdot H_{з1} = 0.1 \cdot 9.943 \cdot 20 = 19.886 \text{ А.}$$

**МРС для спинки статора.**

Розрахункова площа поперечного перерізу спинки статора:

$$S_{с1} = h_{с1}' \cdot l_1 \cdot k_c = 66.586 \cdot 300 \cdot 0.95 = 18980 \text{ мм}^2$$

Магнітна індукція спинки статора:

$$B_{с1} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{2 \cdot S_{с1}} = \frac{0.059 \cdot 10^6}{2 \cdot 18980} = 1.55 \text{ Тл}$$

Напруженість магнітного поля в спинці статора дорівнює  $H_{с1} = 10.9$  А/см з [3, додаток 12].

Середня довжина шляху магнітного потоку:

$$L_{с1} = \frac{\pi \cdot (D_{н1} - h_{с1})}{4 \cdot p} = \frac{3.14 \cdot (660 - 66.586)}{4 \cdot 2} = 233.033 \text{ мм}$$

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 43013. КРБ. ПЗ. Р01. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 32   |

МРС для спинки статора:

$$F_{c1} = 0.1 \cdot L_{c1} \cdot H_{c1} = 0.1 \cdot 233.033 \cdot 10.9 = 254.006 \text{ А}$$

### Зубцы полюсного наконечника

Магнітна індукція в зубцях полюсного наконечника:

$$B_{z2} = \frac{t_2 \cdot B_\delta}{k_c \cdot (t_2 - 0.94 \cdot d_{n2})} = \frac{23.284 \cdot 0.842}{0.95 \cdot (23.284 - 0.94 \cdot 6.85)} = 1.22 \text{ Тл.}$$

Напруженість магнітного поля в зубцях полюсного наконечника  $H_{z2}=13.4$  А/см з [3, додаток 21].

Середня довжина шляху магнітного потоку в зубцях полюсного наконечника:

$$L_{z2} = h_{u2} + d_{n2} = 3 + 6.85 = 9.85 \text{ мм.}$$

МРС для зубців полюсного наконечника:

$$F_{z2} = 0.1 \cdot L_{z2} \cdot H_{z2} = 0.1 \cdot 9.85 \cdot 13.4 = 13.199 \text{ А.}$$

### МРС для полюсів.

Величина виступу полюсного наконечника:

$$b''_n = 0.5 \cdot (b'_{n,n} - b_n) = 0.5 \cdot (228.603 - 139.654) = 44.475 \text{ мм.}$$

Висота полюсного наконечника:

$$h_H = \frac{2 \cdot h_{H.n} + h_{H.n}^{\prime\prime}}{3} = \frac{2 \cdot 43.852 + 12}{3} = 33.234 \text{ мм.}$$

Відстань між бічними поверхнями суміжних полюсних наконечників:

$$a_{H.n} = \left[ \frac{\pi \cdot (D_1 - 2 \cdot \delta^{\prime\prime} - h_{H.n}^{\prime\prime})}{2 \cdot p} \right] - b_{H.n}^{\prime\prime} =$$
$$= \left[ \frac{3.14 \cdot (461.4 - 2 \cdot 4.111 - 12)}{2 \cdot 2} \right] - 228.603 = 117.897 \text{ мм.}$$

Коефіцієнт магнітної провідності розсіювання по внутрішніх поверхнях полюсних наконечників:

$$\lambda_{H.n} = 140 \cdot \left( \frac{h_{H.n}}{a_{H.n}} - 0.25 \right) + 55 \cdot \left( \frac{b_{H.n}^{\prime\prime}}{a_{H.n}} + 0.2 \right) - 40 \cdot \left( \frac{b_{H.n}^{\prime\prime}}{a_{H.n}} - 0.5 \right)^2 =$$
$$= 140 \cdot \left( \frac{43.852}{117.897} - 0.25 \right) + 55 \cdot \left( \frac{44.475}{117.897} + 0.2 \right) - 40 \cdot \left( \frac{44.475}{117.897} - 0.5 \right)^2 = 35.61 \text{ мм.}$$

Довжина шляху магнітного потоку в полюсі при наявності демпферної обмотки:

$$L_H = h_n^{\prime\prime} + 0.5 \cdot h_{H.n} - L_{32} = 100 + 0.5 \cdot 43.852 - 9.85 = 112.076 \text{ мм.}$$

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 43013. КРБ. ПЗ. Р01. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 34   |

Коефіцієнт магнітної провідності потоку розсіювання: по потоках полюсів:

$$\lambda_{n.c} = \frac{55 \cdot h_n}{\tau - b_n - \frac{(h_n + 2 \cdot h_{n.n} + 2 \cdot \delta) \cdot \pi}{2 \cdot p}} =$$

$$= \frac{55 \cdot 100}{362.383 - 139.654 - \frac{(100 + 2 \cdot 43.852 + 2 \cdot 3.084) \cdot 3.14}{2 \cdot 2}} = 78.055$$

Те ж, по торцях полюсів:

$$\lambda_{n.в} = \frac{37 \cdot b_n}{l_n} = \frac{37 \cdot 139.654}{315} = 16.404$$

Коефіцієнт магнітної провідності потоку розсіювання полюсів:

$$\lambda_n = \lambda_{n.n} + \lambda_{n.c} + \lambda_{n.в} = 35.61 + 78.05 + 16.404 = 130.069$$

МРС для статора й повітряного зазору:

$$F_{\delta зс} = F_{\delta} + F_{з1} + F_{с1} = 2231 + 19.886 + 254.006 = 2504 \text{ А.}$$

Магнітний потік розсіювання полюсів:

$$\Phi_{\sigma} = 4 \cdot \lambda_n \cdot l_{n.n} \cdot F_{\delta зс} \cdot 10^{-11} = 4 \cdot 130.069 \cdot 315 \cdot 2504 \cdot 10^{-11} = 0.004104 \text{ Вб.}$$

Коефіцієнт розсіювання магнітного потоку:

$$\sigma = 1 + \frac{\Phi_{\sigma}}{\Phi} = 1 + \frac{0.004104}{0.059} = 1.07$$

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. Р01. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 35   |

Розрахункова площа поперечного перерізу сердечника полюса:

$$S_n = k_c \cdot l_n \cdot b_n = 0.95 \cdot 315 \cdot 139.654 = 41790 \text{ мм}^2.$$

Магнітний потік у сердечнику полюса:

$$\Phi_{n1} = \Phi + \Phi_{\sigma} = 0.059 + 0.004104 = 0.063 \text{ Вб.}$$

Магнітна індукція в сердечнику полюса:

$$B_n = \frac{\Phi_{n1}}{S_n \cdot 10^{-6}} = \frac{0.063}{41790 \cdot 10^{-6}} = 1.51 \text{ Тл.}$$

Напруженість магнітного поля в підставі полюса, у полюсного наконечника й у середньому перетині полюса  $H_n = 29.9 \text{ А/см}$ , з [3, додаток 21].

МРС для полюсів:

$$F_n = 0.1 \cdot L_n \cdot H_n = 0.1 \cdot 112.076 \cdot 29.9 = 335.107 \text{ А.}$$

**МРС для спинки ротора.**

Розрахункова площа поперечного перерізу спинки ротора:

$$S_{c2} = l_2 \cdot h_{c2} \cdot k_c = 320 \cdot 83.765 \cdot 0.95 = 25460 \text{ мм}^2.$$

Середнє значення індукції в спинці ротора:

$$B_{c2} = \frac{\sigma \cdot \Phi \cdot 10^6}{2 \cdot S_{c2}} = \frac{1.07 \cdot 0.059 \cdot 10^6}{2 \cdot 25460} = 1.24 \text{ Тл.}$$

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. Р01. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 36   |

Напруженість магнітного поля в спинці ротора  $H_{c2}=4.44$  з [3, додаток 12].

Середня довжина шляху магнітного потоку в спинці ротора:

$$L_{c2} = \left[ \frac{\pi \cdot (D_2 + 2 \cdot h_{c2})}{4 \cdot p} \right] + 0.5 \cdot h_{c2} =$$
$$= \left[ \frac{3.14 \cdot (133.728 + 2 \cdot 16.901)}{4 \cdot 2} \right] + 0.5 \cdot 83.765 = 107.671 \text{ мм.}$$

МРС для спинки ротора:

$$F_{c2} = 0.1 \cdot L_{c2} \cdot H_{c2} = 0.1 \cdot 107.671 \cdot 4.44 = 47.806 \text{ А.}$$

Повітряний зазор у стику полюса:

$$\delta_{n2} = (2 \cdot l_n \cdot 10^{-6}) + 0.1 = (2 \cdot 315 \cdot 10^{-6}) + 0.1 = 0.163 \text{ мм.}$$

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

$$F_{n2} = 0.8 \cdot \delta_{n2} \cdot B_n \cdot 10^3 = 0.8 \cdot 0.163 \cdot 1.506 \cdot 10^3 = 355.107 \text{ А.}$$

**Загальні параметри магнітного ланцюга.**

Сумарна МРС магнітного ланцюга( на полюс):

$$F_{\Sigma} = F_{\delta_{3c}} + F_n + F_{c2} + F_{n2} + F_{32} = 2504 + 47.806 +$$
$$+ 196.367 + 13.199 + 355.107 = 3097 \text{ А.}$$

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 43013. КРБ. ПЗ. Р01. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 37   |

Коефіцієнт насичення магнітного ланцюга:

$$k_{нас} = \frac{F_{\Sigma}}{(F_{\delta} + F_{n2})} = \frac{3097}{(2231 + 196.367)} = 1.276$$

### 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  $\Phi_*$  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.

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.):  $F_{\delta\sigma c} = \frac{F_{\delta\sigma c}}{F_{\Sigma(1)}}.$

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

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

Магнітний потік у сердечнику полюса (Вб):  $\Phi_{n1} = \Phi + \Phi_{\sigma}.$

Магнітний потік у сердечнику полюса (в. о.):  $\Phi_{n1*} = \frac{\Phi_{n1}}{\Phi_{(1)}}.$

Сумарна МРС для полюса та спинки ротора (А):

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 43013. КРБ. ПЗ. Р01. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 38   |

$$F_{n.c.} = F_n + F_{c2} + F_{n2} + F_{32}.$$

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

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

$$F_{\Sigma} = F_{\delta_{3c}} + F_n + F_{c2} + F_{n2} + F_{32}.$$

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 строять по наступній данням:

|                                    |   |      |     |      |     |     |
|------------------------------------|---|------|-----|------|-----|-----|
| $E_* = E / U_1$                    | 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 %.

Таблиця 1.1.

|                                  |          |          |          |         |          |
|----------------------------------|----------|----------|----------|---------|----------|
| $\Phi (E), \text{ в.о.}$         | 0,5      | 1,0      | 1,1      | 1,2     | 1,3      |
| $\Phi, \text{ Вб.}$              | 0,03     | 0,059    | 0,065    | 0,071   | 0,077    |
| $B_{\delta}, \text{ Тл.}$        | 0,42     | 0,84     | 0,92     | 1,01    | 1,09     |
| $F_{\delta_{3c}*}, \text{ в.о.}$ | 0,374    | 0,809    | 0,977    | 1,229   | 1,882    |
| $\Phi_{\sigma}, \text{ Вб.}$     | 0,001901 | 0,004104 | 0,004961 | 0,00624 | 0,009551 |
| $\Phi_{\sigma*}, \text{ в.о.}$   | 0,03221  | 0,07     | 0,084    | 0,106   | 0,162    |
| $\Phi_{n1}, \text{ Вб.}$         | 0,032    | 0,063    | 0,07     | 0,077   | 0,087    |
| $\Phi_{n1*}, \text{ в.о.}$       | 0,541    | 1,067    | 1,186    | 1,309   | 1,467    |
| $F_{nc}, \text{ А}$              | 185,048  | 579,279  | 839,961  | 1832    | 3157     |
| $F_{nc*}, \text{ в.о.}$          | 0,06     | 0,187    | 0,271    | 0,591   | 1,019    |
| $F_{\Sigma}, \text{ А.}$         | 1345     | 3084     | 3867     | 5639    | 8985     |



|                              |       |       |       |       |       |
|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $F_{\Sigma*}, \text{ в. о.}$ | 0,434 | 0,809 | 0,977 | 1,229 | 1,882 |
|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|

Згідно даних таблиці будемо характеристику х.х. показану на рис.1.1.

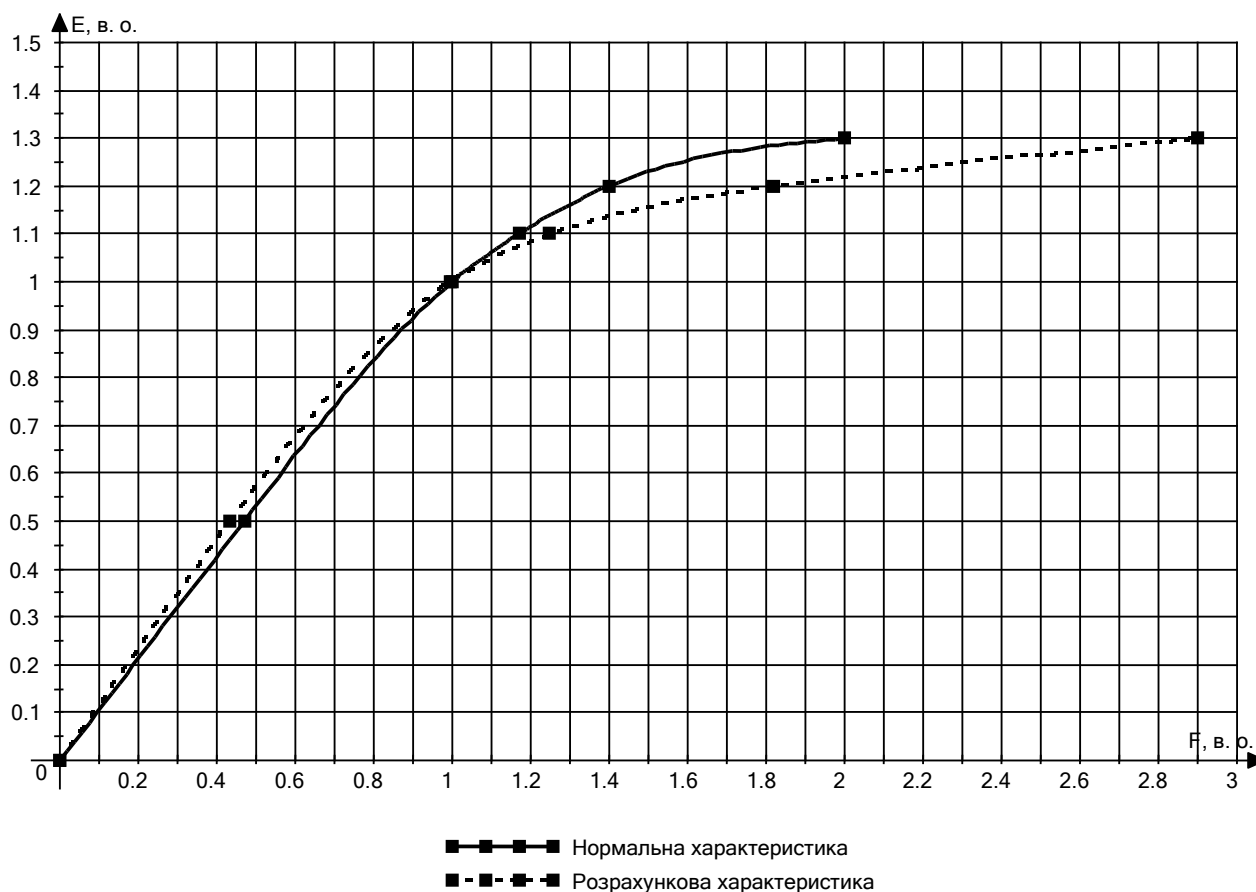


Рис. 1.1. Характеристика холостого ходу синхронного генератора з  $x_{d*}=2.2$

В. О.

### 1.8.Активний і індуктивний опір 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:

$$r_1 = \frac{\omega_1 \cdot l_{cp1}}{\rho_{м20} \cdot a_1 \cdot c \cdot S_1 \cdot 10^3} = \frac{20 \cdot 1570}{57 \cdot 1 \cdot 16 \cdot 4.85} = 0.007135 \text{ Ом},$$

де  $\rho_{M20} = 57 \text{ см/мкм}$  - питома електрична провідність міді при  $20^\circ\text{C}$ .

Те ж (в. о.):

$$r_{1*} = \frac{r_1 \cdot I_1}{U_1} = \frac{0.007135 \cdot 452.899}{230} = 0.014 \text{ в. о.}$$

Перевірка правильності визначення  $r_{1*}$ :

$$r_{1*} = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot (A_1 \cdot J_1) \cdot l_{cp1}}{114 \cdot 10^4 \cdot m_1 \cdot U_1 \cdot I_1} = \frac{3.14 \cdot 461.4 \cdot 2200 \cdot 1570}{114 \cdot 10^4 \cdot 3 \cdot 230 \cdot 452.899} = 0.014 \text{ в. о.}$$

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:

$$k_{\beta 1} = 0.4 \cdot 0.6 \cdot \beta_1 = 0.4 \cdot 0.6 \cdot 0.8 = 0.88$$

$$k_{\beta 1}^* = 0.2 + 0.8 \cdot \beta_1 = 0.2 + 0.8 \cdot 0.8 = 0.84$$

Розмір обмотки:

$$h_1 = h_{n1} - h_{u1} - h_{k1} - h_2 - h_4 = 9.943 - 1 - 3 - 1.9 - 1 = 3.043 \text{ мм.}$$

Коефіцієнт провідності розсіювання:

$$\lambda_{n1} = \frac{h_3}{4 \cdot b_{n1}} + \frac{h_1 - h_3}{3 \cdot b_{n1}} \cdot k_{\beta 1} + \left( \frac{3 \cdot h_{k1}}{b_{n1} + 2 \cdot b_{u1}} + \frac{h_{u1}}{b_{u1}} + \frac{h_2}{b_{n1}} \right) \cdot k_{\beta 1}^* =$$

$$= \frac{1}{4 \cdot 11.8} + \frac{3.043 - 1}{3 \cdot 11.8} \cdot 0.88 + \left( \frac{3 \cdot 3}{11.8 + 2 \cdot 7.29} + \frac{1}{7.29} + \frac{1.9}{11.8} \right) \cdot 0.84 = 0.609$$

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 43013. КРБ. ПЗ. Р01. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 41   |

Коефіцієнт провідності диференціального розсіювання:

$$\lambda_{\partial 1} = \frac{0.03 \cdot \tau \cdot \alpha \cdot C_{\partial}}{\delta \cdot k_{\delta} \cdot q_1} = \frac{0.03 \cdot 362.383 \cdot 1.14 \cdot 0.9}{3.084 \cdot 1.074 \cdot 5} = 0.673,$$

де  $C_{\partial}=0,9$  - коефіцієнт, що враховує вплив форми повітряного зазору.

Коефіцієнт провідності розсіювання лобових частин обмотки:

$$\lambda_{\lambda 1} = 0.34 \cdot \frac{q_1}{l_1} \cdot (l_{\lambda 1} - 0.64 \cdot \beta_1 \cdot \tau) = 0.34 \cdot \frac{5}{340} \cdot (444.943 - 0.64 \cdot 0.8 \cdot 362.383) = 1.297$$

Коефіцієнт зубової зони статора:

$$k_{B\delta} = \frac{b_{u1}}{\delta \cdot k_{\delta}} = \frac{7.29}{3.084 \cdot 1.074} = 2.201$$

Коефіцієнт, що враховує вплив відкриття пазів статора на магнітну провідність розсіювання між коронками зубців  $k_k=0.18$ .

Коефіцієнт провідності розсіювання між коронками зубців статора:

$$\lambda_k = 0.04 + k_k + 0.07 \cdot \sqrt{\frac{t_1 - b_{u1}}{b_{u1}}} = 0.04 + 0.18 + 0.07 \cdot \sqrt{\frac{24.159 - 7.29}{7.29}} = 0.326$$

Сумарний коефіцієнт магнітної провідності потоку розсіювання обмотки статора:

$$\lambda_1 = \lambda_{\lambda 1} + \lambda_{\partial 1} + \lambda_{\lambda 1} + \lambda_k = 0.609 + 0.673 + 1.297 + 0.326 = 2.906$$

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 43013. КРБ. ПЗ. Р01. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 42   |

Індуктивний опір обмотки фази статора:

$$x_{\sigma} = \frac{1.58 \cdot f_1 \cdot l_1 \cdot \omega_1^2 \cdot \lambda_1}{p \cdot q_1 \cdot 10^8} = \frac{1.58 \cdot 50 \cdot 340 \cdot 20^2 \cdot 2.906}{2 \cdot 5 \cdot 10^8} = 0.031 \text{ Ом.}$$

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

$$x_{\sigma^*} = \frac{x_{\sigma} \cdot I_1}{U_1} = \frac{0.031 \cdot 452.899}{230} = 0.061 \text{ в. о.}$$

Перевірка правильності розрахунку  $x_{\sigma^*}$ :

$$\begin{aligned} x_{\sigma^*} &= \frac{0.39 \cdot (D_1 \cdot A_1)^2 \cdot l_1 \cdot \lambda_1 \cdot 10^{-7}}{m_1 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot z_1} = \\ &= \frac{0.39 \cdot (461.4 \cdot 374.943)^2 \cdot 340 \cdot 2.906 \cdot 10^{-7}}{3 \cdot 230 \cdot 452.899 \cdot 60} = 0.062 \text{ в.о.} \end{aligned}$$

### 1.9. Розрахунок магнітного ланцюга при навантаженні.

При навантаженні обмотка статора створює поле реакції якоря. Через нерівномірність повітряного зазору й відповідно магнітного опору уздовж окружності розточення статора явнополюсної 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  $\psi$  – кут зрушення між струмом якоря  $I_1$  та ЕРС  $E_{\delta d}$  наведеної результируючим поздовжнім потоком.

МРС обмотки збудження при навантаженні можна визначити використовуючи векторну діаграму Блонделя й часткові характеристики.

Будуємо часткові характеристики намагнічування  $\Phi = f(F_{\delta_{3c}})$ ,  
 $\Phi_{\sigma} = f(F_{\delta_{3c}})$ ,  $\Phi_n = f(F_{n2})$  за даними табл. 1.1.

Строю векторну діаграму Блонделя.

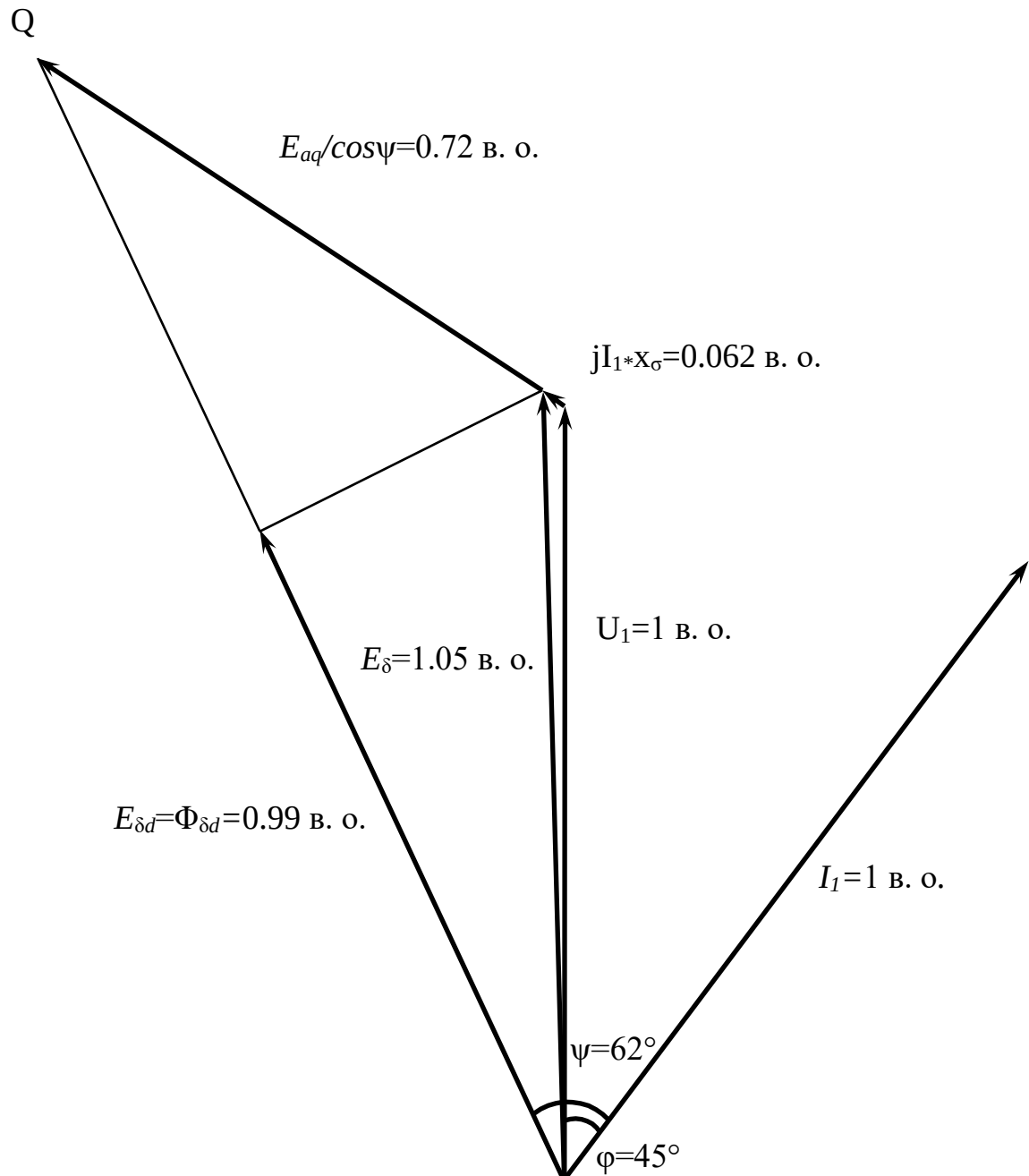


Рис. 1.2. Векторна діаграма Блонделя для номінального режиму.

|       |      |          |        |      |
|-------|------|----------|--------|------|
|       |      |          |        |      |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |

141. 43013. КРБ. ПЗ. Р01.

Лист

44

ЕРС , яка індуктується магнітним потоком повітряного зазору ( по векторній діаграмі)  $E_{\delta^*}=1,05$  в. о.

МРС для магнітного ланцюга повітряного зазору й статора( по рис. 1.2)  
 $F_{\delta_{zc}^*}=0,9$  в. о.

МРС для повітряного зазору(по рис.1.2.)  $F_{\delta^*}=0.82$  в. о.

Попереднє коефіцієнт насичення магнітного ланцюга статора:

$$k'_{nac} = \frac{F_{\delta_{zc}^*}}{F_{\delta^*}} = \frac{0.9}{0.82} = 1.098$$

Поправочні коефіцієнти, що враховують насичення магнітного ланцюга:

$\chi_d = 0.97$  ,  $\chi_q = 0.81$ ,  $k_{qd} = 0.0025$  з [3, рис.11-17].

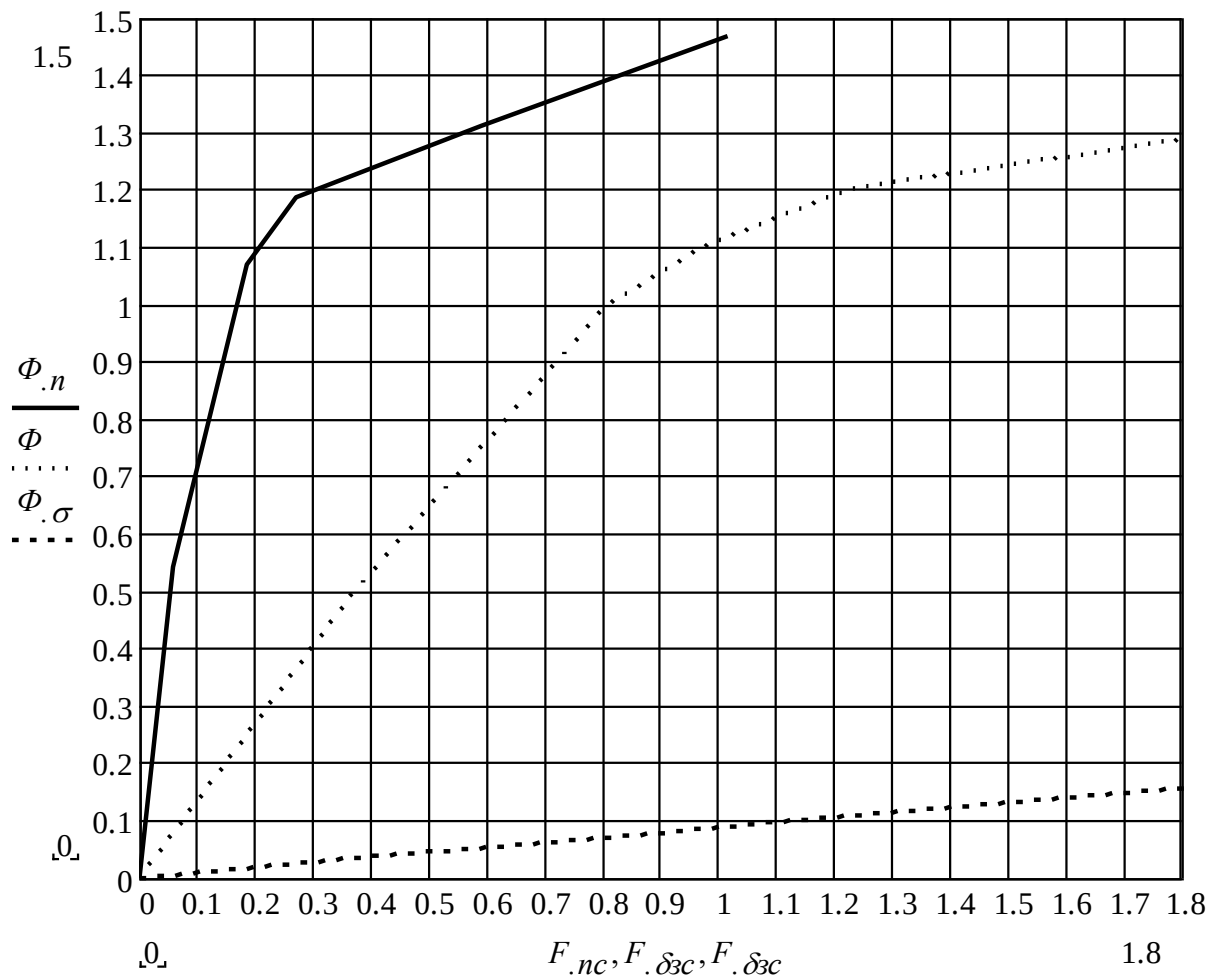


Рис.1.3. Часткові характеристики намагнічування для генератору з  $x_{d^*}=2.2$

в.о

Коефіцієнти реакції якоря:  $k_{ad}=0.87$ ,  $k_{aq}=0.87$  з [3, табл. 11-4].

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

Амплітуда МРС обмотки статора:

$$F_a = \frac{0.45 \cdot m_1 \cdot \omega_1 \cdot k_{об1} \cdot I_1 \cdot k_{\Phi a}}{p} = \frac{0.45 \cdot 3 \cdot 20 \cdot 0.91 \cdot 452.899 \cdot 1}{2} = 5563 \text{ А.}$$

Те ж, у відносних одиницях:

$$F_{a^*} = \frac{F_a}{F_{\Sigma}} = \frac{5563}{3097} = 1.796 \text{ в. о.}$$

Поперечна складова МРС реакції якоря, з урахуванням насичення, віднесена до обмотки збудження:

$$\frac{F_{aq^*}}{\cos \psi} = \chi_q \cdot k_{aq} \cdot F_{a^*} = 0.81 \cdot 0.38 \cdot 1.796 = 0.553 \text{ в. о.}$$

ЕРС обмотки статора обумовлена дією МРС  $\frac{F_{aq^*}}{\cos \psi}$  (по рис. 1.2.):

$$\frac{E'_{aq^*}}{\cos \psi} = 0.72 \text{ в. о.}$$

$\cos \psi = 0.469$ ,  $\sin \psi = 0.883$  з векторної діаграми Блонделя.

Поздовжня МРС реакції якоря з урахуванням впливу поперечного поля:

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. Р01. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 46   |

$$F_{ad}^* = \chi_d \cdot k_{ad} \cdot F_{a^*} \cdot \sin \psi + \frac{k_{aq} \cdot F_{a^*} \cdot \cos \psi \cdot \tau}{\delta} =$$

$$= 0.97 \cdot 0.87 \cdot 1.796 \cdot 0.883 + \frac{0.38 \cdot 1.796 \cdot 0.469 \cdot 362.383}{3.084} = 1.586 \text{ в. о.}$$

Поздовжня складова ЕРС, що наводиться в обмотці статора результирующим потоком по поздовжній осі  $\Phi_{\delta d^*}$ :  $E_{\delta d^*} = \Phi_{\delta d^*} = 0.99 \text{ в. о.}$

МРС по поздовжній осі, необхідна для створення ЕРС  $F_{\delta d} = 0.8 \text{ в. о.}$  з рис. 1.2.

Результируюча МРС по поздовжній осі:

$$F_{\delta a^*} = F_{\delta d} + F_{ad}^* = 0.8 + 1.586 = 2.386 \text{ в. о.}$$

Магнітний потік розсіювання при дії МРС  $F_{\delta a}$ :  $\Phi_{\sigma^*} = 0.19 \text{ в. о.}$

Результируючий магнітний потік:

$$\Phi_{n^*} = \Phi_{\delta d^*} + \Phi_{\sigma^*} = 0.8 + 0.19 = 0.99 \text{ в. о.}$$

МРС , необхідна для створення магнітного потоку по рис. 1.2.:

$$F_{n.c} = 0.18 \text{ в. о.}$$

МРС обмотки збудження при навантаженні:

$$F_{n.n^*} = F_{\delta a^*} + F_{n.c} = 2.386 + 0.18 = 2.566 \text{ в. о.}$$

Те ж:

$$F_{n.n} = F_{n.n^*} \cdot F_{\Sigma} = 2.566 \cdot 3097 = 7947 \text{ А.}$$



### 1.10. Система збудження.

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

Напруга додаткової обмотки статора:  $U_{\partial} = 80$  В з [3, § 11-9].

Попередня середня довжина витка обмотки збудження:

$$l_{cr,\partial} = 2.5 \cdot (l_n + b_n) = 2.5 \cdot (315 + 139.654) = 1137 \text{ мм.}$$

Попередня площа поперечного перерізу провідника обмотки збудження:

$$S' = \frac{1.15 \cdot m_T \cdot 2 \cdot p \cdot F_{n,n} \cdot l_{cr,\partial}}{57 \cdot (U_{\partial} - 2) \cdot 10^3} = \frac{1.15 \cdot 1.38 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 7947 \cdot 1137}{57 \cdot (80 - 2) \cdot 10^3} = 12.898 \text{ мм}^2,$$

де  $m_T = 1.38$  - температурний коефіцієнт, який приймається з [3, табл. 4-1].

Попередня щільність струму в обмотці збудження:  $J'_n = 4.9$  А/мм<sup>2</sup> з [3, рис. 11-21].

Попередня кількість витків однієї полюсної котушки:

$$\omega'_n = 1.15 \cdot \frac{F_{n,n}}{S' \cdot J'_n} = 1.15 \cdot \frac{7947}{12.898 \cdot 4.9} \approx 145$$

Відстань між котушками суміжних полюсів:

$$a_k = \frac{l_n \cdot \tau}{h'_n \cdot 10^3} + a_{\partial on} = \frac{315 \cdot 362.383}{100 \cdot 10^3} + 7 = 8.142 \text{ мм.}$$

Попередній розмір провідника обмотки з не ізолюваної смугової міді, що навиває на ребро, по ширині:

$$b' = \frac{D_1 - 2 \cdot \delta - 2 \cdot h_{n,n} - 2 \cdot h'_n}{p} - 0.5 \cdot [b_n + 2 \cdot (b_3 + b_u) + a_k] =$$

$$= \frac{461.4 - 2 \cdot 2.741 - 2 \cdot 43.852 - 2 \cdot 100}{2} - 0.5 \cdot [139.654 + 7 + 8.142] = 6.71 \text{ мм.}$$

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

Обираємо  $b' = 10 \text{ мм}$ .

Те ж, по товщині:

$$a = \frac{h'_n - 2 \cdot (b_3 - b_u) - b_{n,p}}{\omega'_n} = \frac{100 - 7 - 2.5}{145} = 0.626 \text{ мм.}$$

Розміри провідника без ізоляції  $a \times b = 1.32 \times 10 \text{ мм}$ ,  $S = 12.99 \text{ мм}^2$ .

Розміри провідника із ізоляцією  $a \times b = 1.47 \times 10.15 \text{ мм}$ ,  $S = 13.2 \text{ мм}^2$ . Двостороння товщина ізоляції дроту марки ПЕТП-155 складає 0,15 мм

Розмір полюсної котушки по ширині:

$$b_{k,n} = 1.05 \cdot N_{ш} \cdot b = 1.05 \cdot 10.45 \cdot 10 = 97.5 \text{ мм.}$$

Розкладка витків по висоті котушки:

$$N_B = \frac{h'_n - h_{np}}{1.05 \cdot b'} = \frac{100 - 2.5}{1.05 \cdot 1.32} = 70.346 \text{ мм.}$$

Попередня кількість слоїв обмотки по ширині полюсної котушки:

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. Р01. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 49   |

$$N_{ш} = \frac{w'_H}{N_B} = \frac{144.615}{70.346} = 2.056 \text{ мм.}$$

Розмір полюсної котушки по висоті:

$$h_{к.н} = 1.05 \cdot N_B \cdot a = 1.05 \cdot 70.346 \cdot 1.32 = 97.5 \text{ мм.}$$

Середня довжина витка котушки:

$$\begin{aligned} l_{ср.н} &= 2 \cdot (l_n + b_n) + \pi \cdot (b_k + 2 \cdot (b_z + b_u)) = \\ &= 2 \cdot (315 + 139.654) + 3.14 \cdot (21.585 \cdot 7) = 999.112 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Струм збудження при номінальному навантаженні:

$$I_{н.н} = \frac{F_{н.н}}{w_n} = \frac{7947}{145} = 54.8 \text{ А.}$$

Уточнена щільність струму в обмотці збудження:

$$J_n = \frac{I_{н.н}}{a_n \cdot S} = \frac{54.8}{1 \cdot 13.2} = 4.152 \text{ А/мм}^2,$$

де  $a_n=1$  – кількість паралельних гілок ланцюгу збудження.

Загальна довжина всіх витків обмотки збудження:

$$L_n = 2 \cdot p \cdot \omega'_n \cdot l_{ср.н} \cdot 10^{-3} = 2 \cdot 2 \cdot 145 \cdot 999.112 \cdot 10^{-3} = 579.485 \text{ мм.}$$

Маса міді обмотки збудження:

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. Р01. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 50   |

$$m_{м.п} = 8.9 \cdot L_n \cdot S \cdot 10^{-3} = 8.9 \cdot 579.485 \cdot 13.2 \cdot 10^{-3} = 68.078 \text{ кг.}$$

Опір обмотки збудження при температурі 20 °С:

$$r_n = \frac{L_n}{\rho_{м20} \cdot a_n \cdot S} = \frac{579.485}{57 \cdot 1 \cdot 13.2} = 0.77 \text{ Ом,}$$

де  $\rho_{м20} = 57 \text{ см/мкм}$  – питоме електричне опір міді при 20 °С.

Максимальний струм збудження:

$$I_{n.\max} = \frac{U_{\partial}}{r_n \cdot m_T} = \frac{80}{0.77 \cdot 1.38} = 75.269 \text{ А.}$$

Коефіцієнт запасу збудження:

$$\frac{I_{n.\max}}{I_{н.п}} = \frac{75.269}{54.8} = 1.374$$

Номинальна потужність збудження:

$$P_n = U_{\partial} \cdot I_{n.\max} = 80 \cdot 75.269 = 6022 \text{ Вт.}$$

### 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:  $k_{ad}=0.87$  з [3, табл. 11-4].

Коефіцієнт насичення при  $E=0,5$ :

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. Р01. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 51   |

$$k_{nac(0,5)} = \frac{0.5 \cdot F_{\Sigma}}{(F_{\delta} + F_{n2})} = \frac{0.5 \cdot 1345}{(1113 + 98.452)} = 1.11$$

МРС для повітряного зазору при  $E=1,0$ (в. о.) по табл. 2.1.  $F_{\delta(1)} = 2231$

Індуктивний опір поздовжньої реакції якоря:

$$x_{ad*} = \frac{k_{ad} \cdot F_{a*}}{k_{nac(0,5)} \cdot F_{\delta(1)}} = \frac{0.87 \cdot 5563}{1.11 \cdot 2231} = 1.955 \text{ в. о.}$$

Індуктивний опір поперечної реакції якоря:

$$x_{aq*} = \frac{0.5 \cdot k_{aq} \cdot (1 + k_{\delta}) \cdot F_{a*}}{k_{nac(0,5)} \cdot F_{\delta(1)}} = \frac{0.5 \cdot 0.38 \cdot (1 + 1.074) \cdot 5563}{1.1 \cdot 2231} = 0.855 \text{ в. о.}$$

Синхронний індуктивний опір по поздовжній осі:

$$x_d* = x_{ad*} + x_{\sigma*} = 1.955 + 0.062 = 2.016 \text{ в. о.}$$

Синхронний індуктивний опір по поперечній осі:

$$x_q = x_{aq*} + x_{\sigma*} = 0.855 + 0.062 = 0.917 \text{ в. о.}$$

### Опір обмотки збудження.

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

$$r_n* = \frac{3.6 \cdot m_T \cdot F_a \cdot k_{ad}^2 \cdot l_{cp.n}}{\Phi \cdot \omega_n \cdot S \cdot f_1 \cdot 10^6} = \frac{3.6 \cdot 1.38 \cdot 5563 \cdot 0.87^2 \cdot 999.112}{0.059 \cdot 144.615 \cdot 12.99 \cdot 50 \cdot 10^6} = 0.003771 \text{ в. о.}$$

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. Р01. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 52   |

Коефіцієнт магнітної провідності потоку розсіювання обмотки збудження:

$$\lambda_{n\Sigma} = \lambda_{n.n} + 0.65 \cdot \lambda_{n.c} + 0.38 \cdot \lambda_{n.e} = 35.61 + 0.65 \cdot 78.055 + 0.38 \cdot 16.404 = 92.579$$

Індуктивний опір обмотки збудження:

$$\begin{aligned} x_{n*} &= 1.27 \cdot k_{ad} \cdot x_{ad*} \cdot \left( 1 + \frac{4 \cdot k_{nac(0,5)} \cdot F_{\delta} \cdot l_n \cdot \lambda_{n\Sigma}}{\Phi \cdot 10^{11}} \right) = \\ &= 1.27 \cdot 0.87 \cdot 1.955 \cdot \left( 1 + \frac{4 \cdot 1.11 \cdot 2894 \cdot 315 \cdot 92.579}{0.059 \cdot 10^{11}} \right) = 2.297 \text{ в.о.} \end{aligned}$$

Індуктивний опір розсіювання обмотки збудження:

$$x_{n\sigma*} = x_{n*} - x_{ad*} = 2.297 - 1.955 = 0.342 \text{ в. о.}$$

**Опір демпферної (пускової) обмотки.**

Відносний зубцовий розподіл демпферної обмотки:

$$t_{2*} = \frac{\pi \cdot t_2}{\tau} = \frac{3.14 \cdot 23.284}{362.383} = 0.202 \text{ в. о.}$$

Коефіцієнт розподілу демпферної обмотки (кути виражені в радіанах):

$$k_{p2} = \frac{\sin(N_2 \cdot t_{2*})}{N_2 \cdot \sin(t_{2*})} = \frac{\sin(10 \cdot 0.202)}{10 \cdot \sin(0.202)} = 0.45 \text{ в.о.}$$

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. Р01. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 53   |

Коефіцієнт магнітної провідності потоку розсіювання по зубцях полюсного наконечника:

$$\lambda_{\partial z} = \frac{t_2}{g_{\partial} \cdot \delta} = \frac{23.284}{16.5 \cdot 3.084} = 0.458 \text{ в. о.},$$

де  $g_{\partial} = 16.5$  з [3, § 11-10].

Коефіцієнт магнітної провідності пазового розсіювання полюсів:

$$\lambda_{\partial.n} = \left( 0.785 - \frac{b_{u2}}{2 \cdot d_{n2}} \right) + \frac{h_{u2}}{b_{u2}} = \left( 0.785 - \frac{3}{2 \cdot 6.85} \right) + \frac{3}{3} = 1.566$$

Коефіцієнти  $C_d=1$ ,  $C_q=3.3$  вибирають з [3, рис.11-23].

Коефіцієнт магнітної провідності розсіювання лобових частин демпферної обмотки по поздовжній осі:

$$\lambda_{\partial ld} = \frac{0.019 \cdot \tau \cdot C_d}{N_2} = \frac{0.019 \cdot 362.383 \cdot 1}{10} = 0.689$$

Те ж, по поперечній осі:

$$\lambda_{\partial lq} = \frac{0.019 \cdot \tau \cdot C_q}{N_2} = \frac{0.019 \cdot 362.383 \cdot 3.3}{10} = 2.272$$

Коефіцієнт магнітної провідності розсіювання демпферної обмотки по поздовжній осі:

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. Р01. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 54   |

$$\lambda_{\partial d} = \frac{l_{н.н}}{10 \cdot N_2} \cdot (\lambda_{\partial.н} + \lambda_{\partial з}) + \lambda_{\partial лд} = \frac{315}{10 \cdot 10} \cdot (1.566 + 0.458) + 0.689 = 7.063$$

Те ж, по поперечній осі:

$$\lambda_{\partial q} = \frac{l_{н.н}}{10 \cdot N_2} \cdot (\lambda_{\partial.н} + \lambda_{\partial з}) + \lambda_{\partial лq} = \frac{315}{10 \cdot 10} \cdot (1.566 + 0.458) + 2.272 = 8.647$$

Індуктивний опір повної демпферної обмотки по поперечній осі:

$$x_{\partial d*} = \frac{3.9 \cdot F_a \cdot \lambda_{\partial d}}{\Phi \cdot 10^8 \cdot (1 - k_{p2})} = \frac{3.9 \cdot 5563 \cdot 7.063}{0.059 \cdot 10^8 \cdot (1 - 0.45)} = 0.047 \text{ в. о.}$$

Те ж, по поздовжній осі:

$$x_{\partial q*} = \frac{3.9 \cdot F_a \cdot \lambda_{\partial q}}{\Phi \cdot 10^8 \cdot (1 + k_{p2})} = \frac{3.9 \cdot 5563 \cdot 8.647}{0.059 \cdot 10^8 \cdot (1 + 0.45)} = 0.022 \text{ в.о.}$$

Активний опір стрижнів демпферної обмотки по поздовжній осі:

$$r_{cd*} = \frac{1.57 \cdot \rho_2(t) \cdot l_{cm} \cdot k_{ad} \cdot k_{\delta} \cdot \delta \cdot x_{ad*}}{(1 - k_{p2}) \cdot N_2 \cdot S \cdot l_n \cdot \mu_0 \cdot k_{\phi} \cdot \tau \cdot f_1} =$$

$$= \frac{1.57 \cdot 0.0242 \cdot 412.477 \cdot 0.87 \cdot 1.074 \cdot 3.084 \cdot 1.905}{(1 - 0.45) \cdot 10 \cdot 141.026 \cdot 315 \cdot 4 \cdot 3.14 \cdot 10^{-7} \cdot 1.18 \cdot 368.383 \cdot 50} = 0.013 \text{ в.о.}$$

де  $\rho_2(t) = 0.0242$  - питоме значення опору стрижня й короткозамикаючого кільця (сегмента) при температурі  $t = 115^\circ \text{C}$ ,  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ Г/м}$  - магнітна проникність повітря.

Те ж, по поперечній осі:

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. Р01. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 55   |



$$r_{cq*} = 0.75 \cdot r_{cd*} = 0.75 \cdot 0.013 = 0.01 \text{ в. о.}$$

Активний опір короткозамикаючих кілець демпферної обмотки по поздовжній осі:

$$r_{kd*} = \frac{1.57 \cdot \rho_2(t) \cdot N_2 \cdot t_2 \cdot k_{ad} \cdot k_{\delta} \cdot \delta \cdot x_{ad*}}{(1 - k_{p2}) \cdot S_c \cdot l_n \cdot \mu_0 \cdot k_{\phi} \cdot \tau \cdot f_1} =$$

$$= \frac{1.57 \cdot 0.0242 \cdot 10 \cdot 23.284 \cdot 0.87 \cdot 1.074 \cdot 3.084 \cdot 1.905}{(1 - 0.45) \cdot 198.1 \cdot 315 \cdot 4 \cdot 3.14 \cdot 10^{-7} \cdot 1.18 \cdot 368.383 \cdot 50} = 0.012 \text{ в.о.}$$

Те ж, по поперечній осі:

$$r_{kq*} = 1.5 \cdot r_{kd*} = 1.5 \cdot 0.012 = 0.018 \text{ в. о.}$$

Активний опір повної демпферної обмотки по поздовжній осі:

$$r_{\partial d*} = r_{cd*} + r_{kd*} = 0.013 + 0.012 = 0.025 \text{ в. о.}$$

Те ж, по поперечній осі:

$$r_{\partial q*} = r_{cq*} + r_{kq*} = 0.01 + 0.018 = 0.028 \text{ в. о.}$$

**Перехідні й свержперехідні опори обмотки статора.**

Перехідний індуктивний опір обмотки статора по поздовжній осі:

$$x_{\partial d*} = x_{\sigma*} + \frac{x_{ad*} \cdot x_{n\sigma*}}{x_{ad*} + x_{n\sigma*}} = 0.062 + \frac{1.955 \cdot 0.342}{1.955 + 0.342} = 0.353 \text{ в. о.}$$

Те ж, по поперечній осі:  $x_{q*}^{\prime\prime} = x_{q*} = 0.947$  в. о.

Сверхперехідний індуктивний опір обмотки статора по поздовжній осі при наявності демпферної обмотки:

$$x_{d*}^{\prime\prime} = x_{\sigma*} + \frac{x_{\partial d*} \cdot (x_{d*}^{\prime} - x_{\sigma*})}{x_{\partial d*} + x_{d*}^{\prime} - x_{\sigma*}} = 0.062 + \frac{0.047 \cdot (0.353 - 0.062)}{0.047 + 0.353 - 0.062} = 0.102 \text{ в. о.}$$

Те ж, по поперечній осі:

$$x_{q*}^{\prime\prime} = x_{\sigma*} + \frac{x_{aq*} \cdot x_{\partial d*}}{x_{aq*} + x_{\partial d*}} = 0.062 + \frac{0.885 \cdot 0.022}{0.885 + 0.022} = 0.083 \text{ в. о.}$$

### **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.):

$$x_{2*} = \sqrt{x_{d*}^{\prime\prime} \cdot x_{q*}^{\prime\prime}} = \sqrt{0.102 \cdot 0.083} = 0.092 \text{ в. о.}$$

Те ж, при великому зовнішньому індуктивному опорі:

$$x_{2*} = 0.5 \cdot (x_{d*}^{\prime\prime} + x_{q*}^{\prime\prime}) = 0.5 \cdot (0.102 + 0.083) = 0.093 \text{ в. о.}$$

Індуктивний опір двошарової обмотки статора для струмів нульової послідовності:

$$\begin{aligned}
 x_{0*} &= \frac{1.1 \cdot l_1 \cdot F_a}{10^9 \cdot \Phi \cdot q_1 \cdot k_{y1}^2} \cdot \left[ (\beta_1 - 0.555) \cdot \frac{h_{n1}}{b_{n1}} + (3 \cdot \beta_1 - 2) \cdot \frac{h_4}{b_{n1}} \right] + \\
 &+ C \cdot \frac{F_a \cdot (3 \cdot \beta_1 - 2)}{F_\delta \cdot k_{y1}^2} \cdot \left[ 0.39 \cdot \left( \beta_1 - \frac{2}{3} \right) - \left( \beta_1 - \frac{2}{3} \right)^2 + \left( \frac{1}{3 \cdot q_1} \right)^2 + 0.037 \right] = \\
 &= \frac{1.1 \cdot 340 \cdot 5563}{10^9 \cdot 0.059 \cdot 0.951^2} \cdot \left[ (0.8 - 0.555) \cdot \frac{9.943}{11.8} + (3 \cdot 0.8 - 2) \cdot \frac{1}{9.943} \right] + \\
 &+ 0.355 \frac{5563 \cdot (3 \cdot 0.8 - 2)}{2894 \cdot 0.951^2} \cdot \left[ 0.39 \cdot \left( 0.8 - \frac{2}{3} \right) - \left( 0.8 - \frac{2}{3} \right)^2 + \left( \frac{1}{3 \cdot 5} \right)^2 + 0.037 \right] \\
 &= 0.025 \text{ в.о.}
 \end{aligned}$$

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

$$r_{0*} = r_{1*} \cdot m_T = 0.014 \cdot 1.38 = 0.019 \text{ в. о.}$$

### Сталі часу.

Обмотка збудження при розімкнутих обмотках статора й демпферної:

$$T_{d0} = \frac{x_{n*}}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot r_{n*}} = \frac{2.297}{2 \cdot 3.14 \cdot 50 \cdot 0.003771} = 1.938 \text{ с.}$$

Те ж, при замкнутій обмотці статора:

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 43013. КРБ. ПЗ. Р01. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 58   |

$$T_d = \frac{T_{d0} \cdot x_{d*}}{x_{d*}} = \frac{1.938 \cdot 0.353}{2.016} = 0.339 \text{ с.}$$

Демпферна обмотка при розімкнутих обмотках статора й порушення по поздовжній осі:

$$T_{\partial d0} = \frac{x_{ad*} + x_{\partial d*}}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot r_{\partial d*}} = \frac{1.955 + 0.047}{2 \cdot 3.14 \cdot 50 \cdot 0.025} = 0.254 \text{ с.}$$

Те ж, по поперечній осі:

$$T_{\partial q0} = \frac{x_{aq*} + x_{\partial q*}}{\omega_1 \cdot r_{\partial q*}} = \frac{0.885 + 0.022}{314.2 \cdot 0.028} = 0.105 \text{ с.}$$

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

$$T_{d0}'' = \frac{x_{ad*} \cdot x_{n\sigma*} + x_{\partial d*} \cdot (x_{ad*} + x_{n\sigma*})}{\omega_1 \cdot r_{\partial d*} \cdot (x_{ad*} + x_{n\sigma*})} = \frac{1.955 \cdot 0.342 + 0.047 \cdot (1.955 + 0.342)}{314.2 \cdot 0.025 \cdot (1.955 + 0.342)} = 0.043 \text{ с.}$$

Те ж, при короткозамкнених обмотках збудження й статора:

$$T_d'' = \frac{T_{d0}'' \cdot x_{d*}}{x_{d*}} = \frac{0.043 \cdot 0.102}{0.353} = 0.012 \text{ с.}$$

Демпферна обмотка по поперечній осі при короткозамкненій обмотці статора:

$$T''_q = \frac{T_{dq0} \cdot x''_{q*}}{x_{q*}} = \frac{0.105 \cdot 0.083141}{0.947} = 0.009155 \text{ с.}$$

Обмотка статора при короткозамкнених обмотках ротора:

$$T_a = \frac{x_{2*}}{\omega_1 \cdot r_{1*}} = \frac{0.093158}{314.2 \cdot 0.014} = 0.021 \text{ с.}$$

### 1.12.Втрати й ККД.

Розрахункова маса стали зубців статора:

$$\begin{aligned} m_{z1} &= 7.8 \cdot b_{z1cp} \cdot h_{n1} \cdot l_1 \cdot k_c \cdot 10^{-6} \cdot z_1 = \\ &= 7.8 \cdot 12.706 \cdot 9.943 \cdot 340 \cdot 0.95 \cdot 10^{-6} \cdot 60 = 19.097 \text{ кг.} \end{aligned}$$

Зубцевий розподіл статора:

$$t_{z1max} = \frac{\pi \cdot (D_1 + 2 \cdot h_{n1})}{z_1} = \frac{3.14 \cdot (461.4 + 2 \cdot 9.963)}{60} = 25.2 \text{ мм.}$$

Ширина зубця в найбільш широкій частині:

$$b_{z1max} = t_{z1max} - b_{n1} = 13.4 \text{ мм.}$$

Ширина зубця в середній частині:

$$b_{z1cp} = \frac{b_{z1min} - b_{z1max}}{2} = \frac{12.359 + 13.4}{2} = 25.759 \text{ мм.}$$

Магнітні втрати в зубцях статора:

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. Р01. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 60   |

$$P_{31} = 3.0 \cdot B_{31cp}^2 \cdot m_{31} = 3.0 \cdot 1.078^2 \cdot 19.097 = 66.587 \text{ Вт.}$$

Амплітуда коливань індукції:

$$B_0 = \beta_0 \cdot k_\delta \cdot B_\delta = 0.17 \cdot 1.074 \cdot 1.092 = 0.199 \text{ Тл.}$$

де  $\beta_0 = 0.17$  - коефіцієнт, який залежить від  $b_{uu} / \delta$  з [3, § 11-11].

Маса стали спинки статора:

$$\begin{aligned} m_{c1} &= 7.8 \cdot \pi \cdot (D_{H1} \cdot h_1) \cdot h_1 \cdot l_1 \cdot k_c \cdot 10^{-6} = \\ &= 7.8 \cdot 3.14 \cdot (660 \cdot 3.043) \cdot 3.043 \cdot 340 \cdot 0.95 \cdot 10^{-6} = 48.372 \text{ кг.} \end{aligned}$$

Магнітні втрати в спинці статора:

$$P_{c1} = 3.0 \cdot B_{c1}^2 \cdot m_{c1} = 3.0 \cdot 2.015^2 \cdot 48.372 = 589.205 \text{ Вт.}$$

Середнє значення питомих поверхневих втрат віднесених до 1 м<sup>2</sup> поверхні полюсного наконечника:

$$\begin{aligned} p_{нов} &= k_0 \cdot (z_1 \cdot n_1 \cdot 10^{-4})^{1.5} \cdot (0.1 \cdot B_0 \cdot t_1)^2 = \\ &= 1.4 \cdot (60 \cdot 1500 \cdot 10^{-4})^{1.5} \cdot (0.1 \cdot 0.199 \cdot 24.159)^2 = 8.776 \text{ Вт/м}^2 \end{aligned}$$

де  $k_0 = 1.4$  вибирають з [3, §11-11].

Поверхневі втрати машини:

$$P_{нов} = 2 \cdot p \cdot \tau \cdot \alpha \cdot l_n \cdot p_{нов} \cdot k_n \cdot 10^{-6} =$$

$$2 \cdot 2 \cdot 362.383 \cdot 0.663 \cdot 315 \cdot 8.776 \cdot 0.6 \cdot 10^{-6} = 1.594 \text{ Вт},$$

де  $k_n = 0.6$  - в залежності від форми полюсного наконечника вибирають з [3, §11-11].

Сумарні магнітні втрати:

$$P_{c\Sigma} = P_{c1} + P_{31} + P_{нов} = 589.205 + 66.587 + 1.594 \approx 657.386 \text{ Вт}.$$

Втрати в обмотці статора:

$$P_{M1} = m_1 \cdot I_1^2 \cdot r_1 \cdot m_T =$$

$$= 3 \cdot 452.899^2 \cdot 0.007135 \cdot 1.38 = 6059 \text{ Вт}.$$

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

$$P_n = I_{n.n}^2 \cdot r_n + 2 \cdot I_{n.n} = 54.956^2 \cdot 0.781 + 2 \cdot 54.956 = 2467 \text{ Вт}.$$

Додаткові втрати в обмотці статора й стали магнітопроводу при навантаженні:

$$P_{доб} = 0.005 \cdot P_2 = 0.005 \cdot 250000 = 1250 \text{ Вт}.$$

Механічні втрати:

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 43013. КРБ. ПЗ. Р01. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 62   |

$$P_{mx} = 0.8 \cdot (n_n + 10) \cdot \left( \frac{n_1}{1000} \right)^2 \cdot \left( \frac{D_1}{100} \right)^2 =$$

$$= 0.8 \cdot (5 + 10) \cdot \left( \frac{1500}{1000} \right)^2 \cdot \left( \frac{461.4}{100} \right)^2 = 574.803 \text{ Вт.}$$

Втрати на тертя щіток об контактні кільця:

$$P_{m.щ} = 2.6 \cdot I_{n.n} \cdot D_1 \cdot n_1 \cdot 10^{-6} = 2.6 \cdot 54.956 \cdot 461.4 \cdot 1500 \cdot 10^{-6} = 98.89 \text{ Вт.}$$

Механічні втрати:

$$P_{mx} = P_{mx} + P_{m.щ} = 574.803 + 98.89 \approx 673.693 \text{ Вт.}$$

Сумарні втрати:

$$P_{\Sigma} = P_{c\Sigma} + P_{m1} + P_{доб} + P_n + P_{mx} = 657.386 + 6059 +$$

$$+ 1250 + 2467 + 673.693 = 11110 \text{ Вт.}$$

ККД при нормальному навантаженні:

$$\eta = \left( 1 - \frac{P_{\Sigma}}{P_2 + P_{\Sigma}} \right) \cdot 100\% = \left( 1 - \frac{11110}{250000 + 11110} \right) \cdot 100\% = 95.746\%$$

### 1.13. Тепловий і вентиляційний розрахунок.

Тепловий розрахунок синхронної машини.

Втрати в основній і додатковій обмотках статора:

$$P_{m1} = m_1 \cdot m_T \cdot I_1^2 \cdot r_1 = 3 \cdot 1.38 \cdot 452.899^2 \cdot 0.007135 = 6059 \text{ Вт.}$$

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. Р01. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 63   |



Периметр поперечного перерізу умовної поверхні охолодження котушки

$$\Pi_{\Pi} = I_{n.n}^2 \cdot r_n + 2 \cdot r_1 = 54.956 \cdot 0.781 + 2 \cdot 0.007135 = 2467 \text{ мм}^2$$

Умовна внутрішня поверхня охолодження активної частини статора:

$$S_{n2} = 2 \cdot p \cdot l_{cp.n} \cdot \Pi_{\Pi} = 2 \cdot 2 \cdot 999.112 \cdot 2.467 = 9.86 \cdot 10^6 \text{ мм}^2.$$

Умовний периметр поперечного переріза прямокутного відкритого паза:

$$\Pi_1 = 2 \cdot (h_{n1} + b_{n1}) = 2 \cdot (9.943 + 11.8) = 43.486 \text{ мм}.$$

Умовна поверхня охолодження пазів:

$$S_{m.n} = z_1 \cdot \Pi_1 \cdot l_1 = 60 \cdot 43.486 \cdot 340 = 887100 \text{ мм}^2.$$

Умовна поверхня охолодження лобових частин обмотки:

$$S_{л1} = 4 \cdot \pi \cdot D_1 \cdot l_{B1} = 4 \cdot 3.14 \cdot 461.4 \cdot 148.433 = 860600 \text{ мм}^2.$$

Умовна поверхня охолодження генератора без охолоджуючих ребер на станині:

$$S_{маш} = \pi \cdot D_{H1} \cdot (l_1 + 2 \cdot l_{B1}) = 3.14 \cdot 660 \cdot (340 + 2 \cdot 148.433) = 1.321 \cdot 10^6 \text{ мм}^2.$$

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. Р01. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 64   |

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

$$p_{n1} = \frac{k \cdot \left( \frac{P_{M1} \cdot 2 \cdot l_1}{l_{cp1} + P_{c\Sigma}} \right)}{S_{n2}} = \frac{0.84 \cdot \left( \frac{6059 \cdot 2 \cdot 340}{1570 + 657.386} \right)}{596148} = 1.577 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/мм}^2.$$

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

$$p_{u.n1} = \frac{\frac{P'_{M1} \cdot 2 \cdot l_1}{l_{cp1}}}{S_{m.n}} = \frac{\frac{6059 \cdot 2 \cdot 340}{1570}}{8.871 \cdot 10^5} = 0.002958 \text{ Вт/мм}^2.$$

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

$$p_{л1} = \frac{\frac{P'_{M1} \cdot 2 \cdot l_1}{l_{cp1}}}{S_{л1}} = \frac{\frac{6059 \cdot 2 \cdot 340}{1570}}{8.606 \cdot 10^5} = 0.00305 \text{ Вт/мм}^2.$$

Окружна швидкість ротора:

$$v_2 = \frac{\pi \cdot D_{H2} \cdot n_1}{60000} = \frac{3.14 \cdot 455.233 \cdot 1500}{60000} = 35.754 \text{ м/с.}$$

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

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. Р01. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 65   |

$$\Delta t_{n1} = \frac{p_{n1}}{\alpha_1} = \frac{0.0001576}{13 \cdot 10^{-5}} = 1.212 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

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

Перепад температур в ізоляції паза й твердих катушок:

$$\Delta t_{u.n1} = \frac{p_{u.n1} \cdot b_{u1}}{\lambda'_{екв}} = \frac{0.002958 \cdot 2.2}{16 \cdot 10^{-5}} = 40.679 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

$\lambda'_{екв} = 16 \cdot 10^{-5}$  Вт/(мм·град) - еквівалентний коефіцієнт теплопровідності ізоляції в пазу.

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

$$\Delta t_{л1} = \frac{p_{л1}}{\alpha_1} = \frac{0.00305}{13 \cdot 10^{-5}} = 23.458 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Перепад температури в ізоляції лобових частин твердої катушки:

$$\Delta t_{u..л} = p_{л1} \cdot \frac{b_{u..л1}}{\lambda'_{екв}} + \frac{h_{л1}}{12 \cdot \lambda'_{экв}} = 0.00305 \cdot \frac{0.6}{16 \cdot 10^{-5}} \cdot \frac{9.943}{12 \cdot 16 \cdot 10^{-5}} = 27.228 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

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

Середнє перевищення температури обмотки над температурою повітря усередині генератора:

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. Р01. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 66   |

$$\Delta t' = (\Delta t_{n1} + \Delta t_{u.n1}) \cdot \frac{2 \cdot l_1}{l_{cp1}} + (\Delta t_{л1} + \Delta t_{u.л}) \cdot \frac{2 \cdot l_{л1}}{l_{cp1}} =$$

$$= (1.212 + 40.679) \cdot \frac{2 \cdot 340}{1570} + (23.458 + 27.228) \cdot \frac{2 \cdot 340}{1570} = 40.1 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

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

$$P'_{\Sigma} = k \cdot \left( P'_{м1} \cdot \frac{2 \cdot l_1}{l_{cp1}} + P_{c\Sigma} \right) + P'_{м1} \cdot \frac{2 \cdot l_{л1}}{l_{cp1}} + P'_{м2} + P_{мх} + P_{доб} =$$

$$= 0.84 \cdot \left( 6059 \cdot \frac{2 \cdot 340}{1570} + 657.386 \right) + 6059 \cdot \frac{2 \cdot 444.943}{1570} + 2467 + 673.693 + 1250 = 10580$$

Середнє перевищення температури повітря усередині двигуна над температурою зовнішнього повітря без охолоджуючих ребер на станині:

$$\Delta t_B = \frac{P'_{\Sigma}}{S_{маш} \cdot \alpha_B} = \frac{10580}{1.321 \cdot 10^6 \cdot 80 \cdot 10^{-5}} = 10.017 \text{ } ^\circ\text{C},$$

де  $\alpha_B = 80 \cdot 10^{-5}$  - коефіцієнт підігріву повітря з [3, рис. 9-25].

Середнє перевищення температури обмотки над температурою зовнішнього повітря:

$$\Delta t_1 = \Delta t' + \Delta t_B = 40.1 + 10.017 = 50.117 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

**Тепловий розрахунок обмотки збудження.**

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. Р01. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 67   |

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

$$S_{n2} = 2 \cdot p \cdot l_{cp.n} \cdot h_{к.н} = 2 \cdot 2 \cdot 999.112 \cdot 97.5 = 389700 \text{ мм}^2.$$

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

$$p_n = k \cdot \frac{P_n}{S_{n2}} = 0.9 \cdot \frac{2467}{389700} = 0.005699 \text{ Вт/мм}^2.$$

Коефіцієнт тепловіддачі котушки:

$$\alpha_T = (2.6 + 0.19 \cdot v_2) \cdot 10^{-5} = (2.6 + 0.19 \cdot 35.754) \cdot 10^{-5} = 9.393 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/мм}^2 \cdot ^\circ\text{C}.$$

Перевищення температури зовнішньої поверхні охолодження обмотки:

$$\Delta t_{n.n} = \frac{p_n}{\alpha_T} = \frac{0.005699}{9.393 \cdot 10^{-5}} = 60.669 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Середнє перевищення температури обмотки над температурою повітря у середині машини:  $\Delta t'_n = \Delta t_{n.n} = 60.669 \text{ } ^\circ\text{C}.$

Середнє перевищення температури обмотки над температурою зовнішнього охолоджуючого повітря:

$$\Delta t_n = \Delta t'_n + \Delta t_B = 60.669 + 10.017 = 70.686 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. Р01. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 68   |

### 1.14. Вентиляційний розрахунок.

Необхідна витрата повітря для охолодження:

$$V_B = \frac{P_{\Sigma}}{c_B \cdot \Delta t_B} = \frac{10580}{1100 \cdot 20.035} = 0.48 \text{ м}^3/\text{с}.$$

де  $c_B = 1100 \text{ Дж}/(\text{°C} \cdot \text{м}^3)$  – теплоємність повітря.

Коефіцієнт, що залежить від частоти обертання  $n_1$ :

$$k_1 = 3.5 \cdot \sqrt[4]{\left(\frac{n_1}{1000}\right)^3} \cdot \frac{n_k \cdot l_k + 100}{100} = 3.5 \cdot \sqrt[4]{\left(\frac{1500}{1000}\right)^3} \cdot \frac{4 \cdot 10 + 100}{100} = 6.641$$

Наближена витрата повітря:

$$V_B = k_1 \cdot \left(\frac{D_{H2}}{100}\right)^2 \cdot 10^{-2} = 6.641 \cdot \left(\frac{455.233}{100}\right)^2 \cdot 10^{-2} = 1.376 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Напір повітря розвиває при радіальній системі:

$$H = 7.85 \cdot \left(\frac{n_1}{1000}\right)^2 \cdot \left(\frac{D_{H2}}{100}\right)^2 = 7.85 \cdot \left(\frac{1500}{1000}\right)^2 \cdot \left(\frac{455.233}{100}\right)^2 = 366.032 \text{ Па}.$$

### 1.15. Характеристики машин.

Регулювальні характеристики генератора.

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

Таблиця 1.2. Регулювальні характеристики

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. Р01. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 69   |

|          |       |      |      |      |      |      |      |
|----------|-------|------|------|------|------|------|------|
|          | U=0.5 |      |      |      |      |      |      |
| $I^*$    | 0     | 0.2  | 0.5  | 0.8  | 1    | 1.2  | 1.4  |
| $I_n, A$ | 9.3   | 15   | 25.1 | 33.6 | 40.4 | 47.5 | 54.5 |
|          | U=0.8 |      |      |      |      |      |      |
| $I^*$    | 0     | 0.2  | 0.5  | 0.8  | 1    | 1.2  | 1.4  |
| $I_n, A$ | 16.1  | 20.6 | 31.5 | 41.2 | 48.6 | 55.8 | 63.3 |
|          | U=1.1 |      |      |      |      |      |      |
| $I^*$    | 0     | 0.2  | 0.5  | 0.8  | 1    | 1.2  | 1.4  |
| $I_n, A$ | 22.4  | 31.5 | 42.2 | 53.2 | 60.2 | 68.2 | 76.7 |

Зобразимо регулювальні характеристики на рис. 1.4.

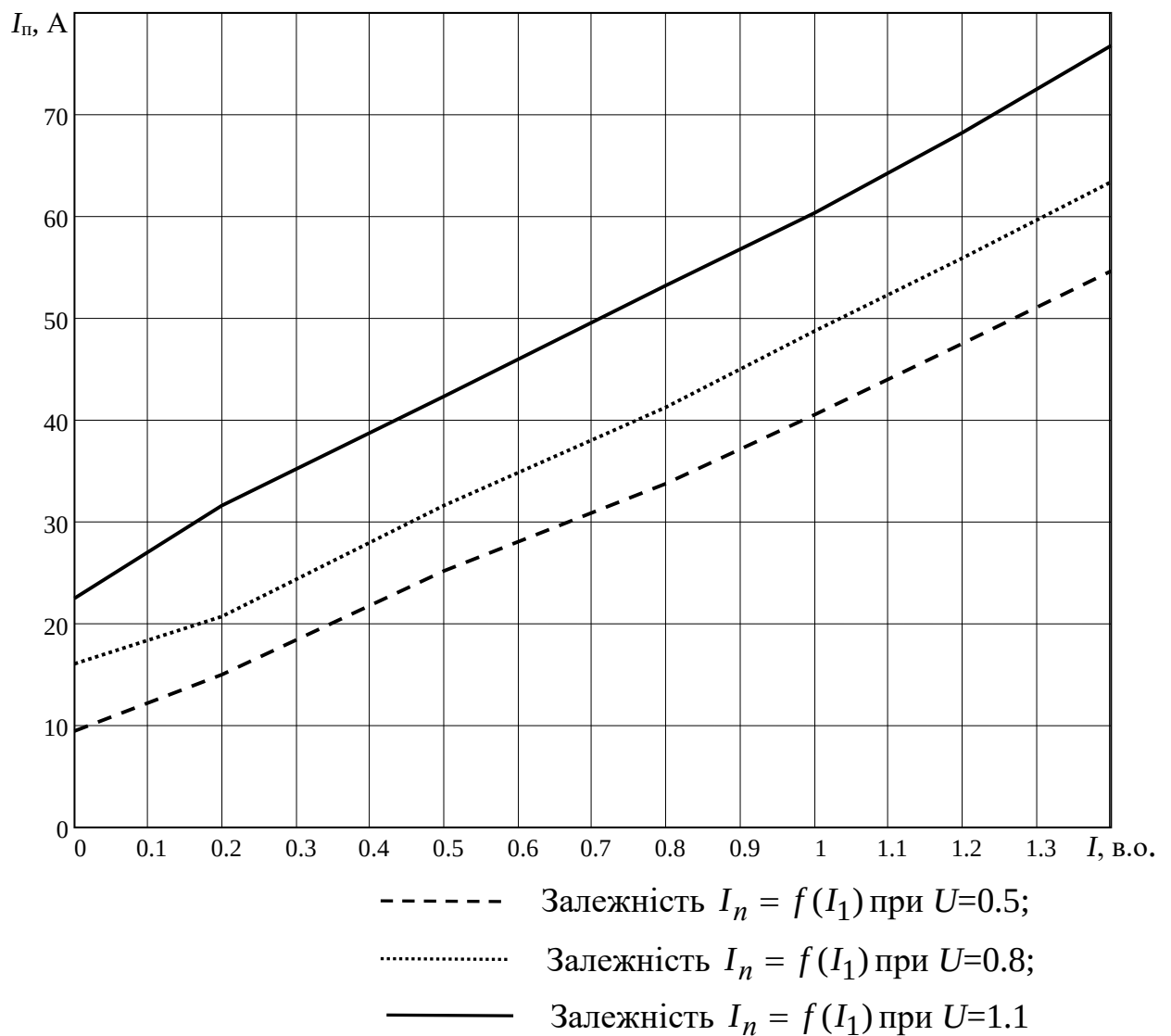


Рис.1.4. Регулювальні характеристики синхронного генератора

### Зовнішні характеристики генератора.

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

При  $I_1=0$ , уже відомі з попередніх розрахунків. Проміжні крапки знаходять по регулювальних характеристиках, побудованим для значень напруги  $U_{I_n}<U<U_0$ .

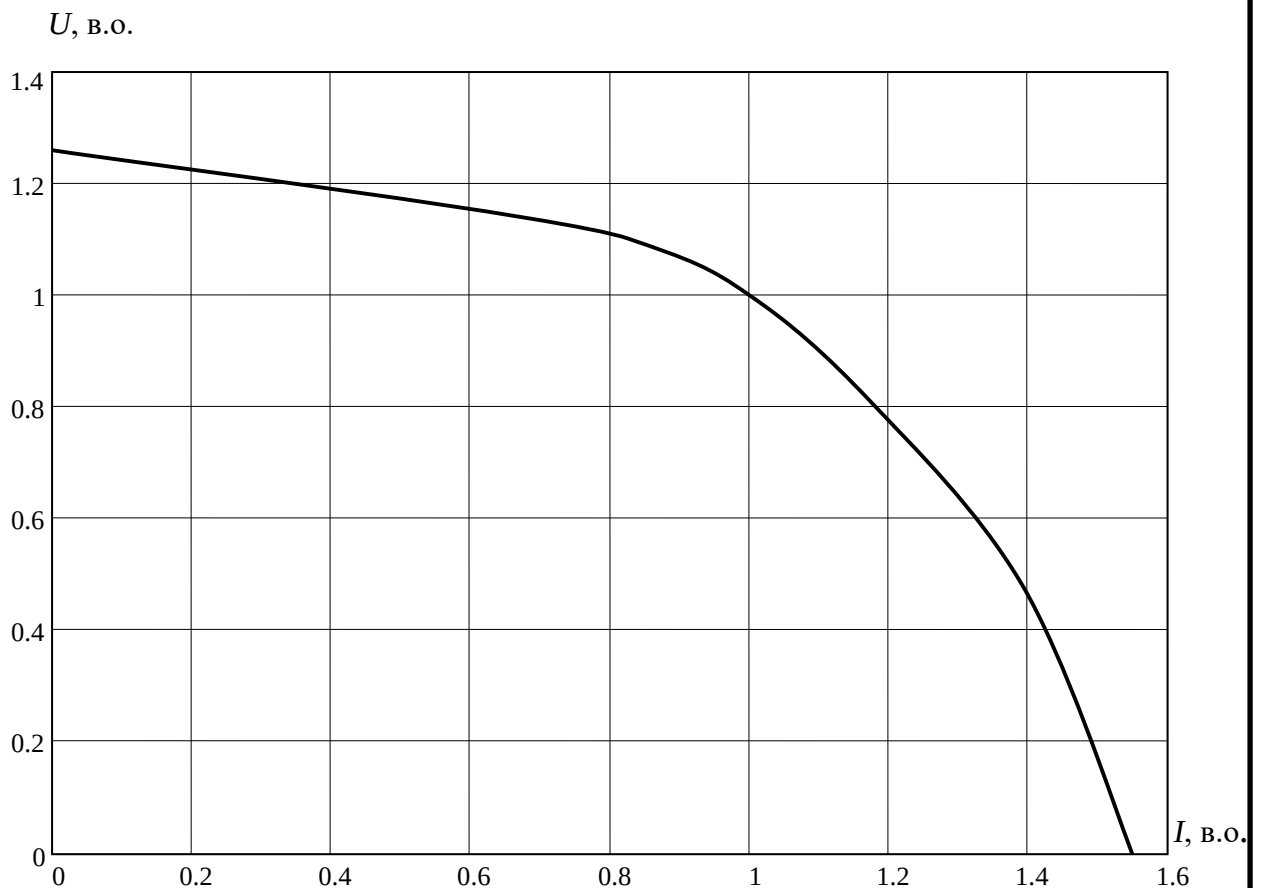


Рис.1.5. Зовнішня характеристика генератора

### Кутові характеристики.

Кутові характеристики синхронних машин виражають залежність активної потужності від кута навантаження  $\theta$  при  $U_1=1$  і  $E_0=const$ . Під кутом навантаження  $\theta$  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  $\Theta$  от 0 до  $\pi$ .

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

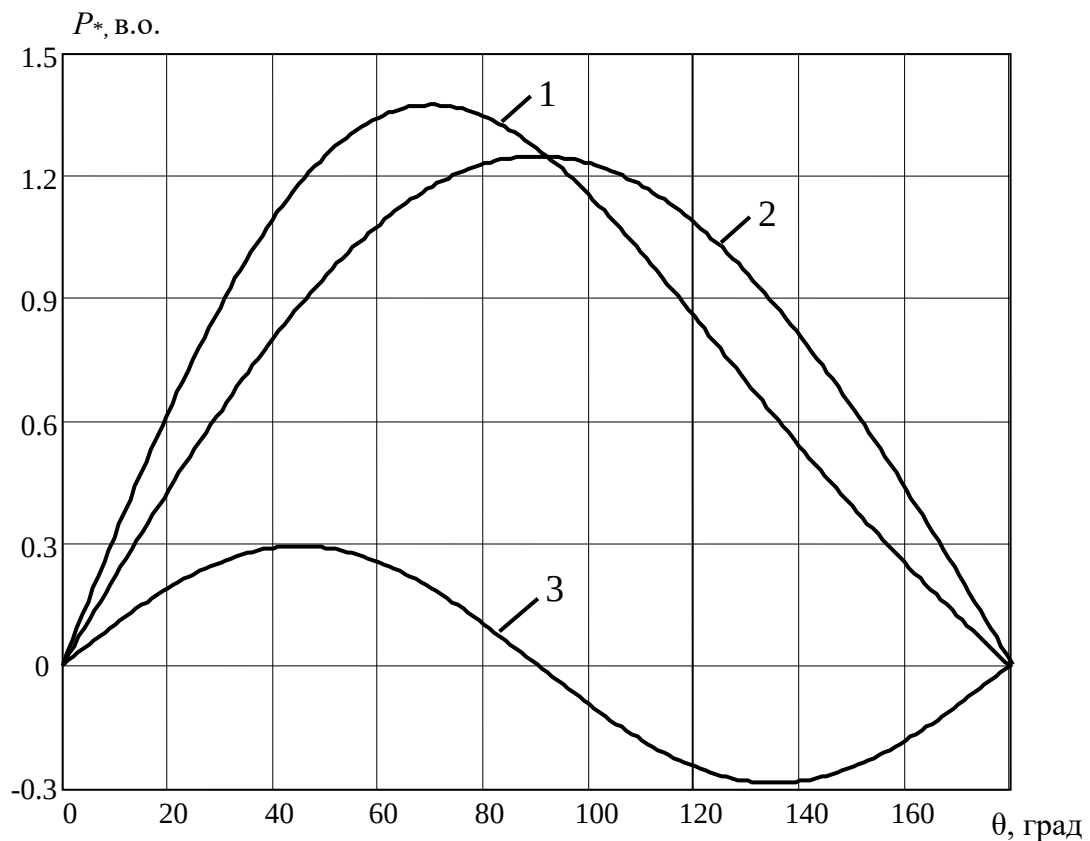


Рис.1.6. Кутова характеристика синхронного генератора, де характеристика «1» –  $1.27 \cdot \sin \Theta + 0.28 \cdot \sin 2\Theta$ , «2» –  $1.27 \cdot \sin \Theta$ , «3» –  $0.28 \cdot \sin 2\Theta$

### 1.16. Маса й динамічні показники.

Маса сталі сердечника статора:

$$m_{c3\Sigma} = m_{31} + m_{c1} = 19.097 + 48.372 = 67.469 \text{ кг.}$$

|       |      |          |        |      |
|-------|------|----------|--------|------|
|       |      |          |        |      |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |

141. 43013. КРБ. ПЗ. Р01.

Лист

72

Маса сталі полюсів:

$$m_{cn} = 7.8 \cdot 10^{-6} \cdot k_c \cdot l_n \cdot (b_n \cdot h_n + k_k \cdot b_{h.n} \cdot h_{h.n}) \cdot 2 \cdot p =$$

$$= 7.8 \cdot 10^{-6} \cdot 0.95 \cdot 315 \cdot (139.654 \cdot 100 + 0.18 \cdot 240.26 \cdot 43.852) \cdot 2 \cdot 2 = 148.096 \text{ кг.}$$

Маса сталі сердечника ротора:

$$m_{c2} = 6.12 \cdot k_c \cdot 10^{-6} \cdot l_1 \cdot \left[ (2.05 \cdot h_{c2} + D_2)^2 - D_2^2 \right] =$$

$$= 6.12 \cdot 0.95 \cdot 10^{-6} \cdot 340 \cdot \left[ (2.05 \cdot 16.901 + 133.728)^2 - 133.728^2 \right] = 55.777 \text{ кг.}$$

Сумарна маса активної сталі статора й ротора:

$$m_{c\Sigma} = m_{c3\Sigma} + m_{cn} + m_{c2} = 67.469 + 148.096 + 55.777 = 271.342 \text{ кг.}$$

Маса міді обмотки статора:

$$m_{m1} = 8.9 \cdot 10^{-6} \cdot m_1 \cdot (a_1 \cdot \omega_1 \cdot l_{cp1} \cdot S \cdot c) =$$

$$= 8.9 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \cdot (1 \cdot 20 \cdot 1570 \cdot 4.825 \cdot 16) = 64.718 \text{ кг.}$$

Маса міді демпферної обмотки (пусковий):

$$m_{m.d} = 8.9 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot p \cdot (N_2 \cdot S_c \cdot l_{cm} + b_{h.n} \cdot S_c + 0.6 \cdot C_n \cdot S_c) =$$

$$= 8.9 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 2 \cdot (10.117 \cdot 141.026 \cdot 412.477 + 228.603 \cdot 198.1 + 0.6 \cdot 2 \cdot 198.1) = 22.572 \text{ кг.}$$

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 43013. КРБ. ПЗ. Р01. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 73   |

де  $C_n = 2$  - кількість перемичок демпферної обмотки на 1 пару полюсів.

Сумарна маса міді:

$$m_{M\Sigma} = m_{M1} + m_{M.n} + m_{M.\partial} = 64.718 + 66.817 + 22.572 = 154.107 \text{ кг.}$$

Сумарна маса ізоляції:

$$\begin{aligned} m_u &= (3.8 \cdot D_{H1}^{1.5} + 0.2 \cdot D_{H1} \cdot l_1) \cdot 10^{-4} = \\ &= (3.8 \cdot 660^{1.5} + 0.2 \cdot 660 \cdot 340) \cdot 10^{-4} = 10.931 \text{ кг.} \end{aligned}$$

Маса конструкційних матеріалів:

$$m_k = A \cdot D_{H1} + B = 0.32 \cdot 660 + 400 = 611.2 \text{ кг,}$$

де  $A=0,32$  и  $B=400$  з [3, § 11-14].

Маса машини:

$$m_{\text{маш}} = m_{c\Sigma} + m_{M\Sigma} + m_u + m_k = 271.342 + 154.107 + 10.931 + 611.2 \approx 1048 \text{ кг.}$$

**Динамічний момент інерції ротора.**

Радіус інерції полюсів з котушками:

$$\begin{aligned} R_{n.cp} &= [0.5 \cdot D_1^2 + 0.85 \cdot (0.5 \cdot D_2 + h_{c2})^2] \cdot 10^{-6} = \\ &= [0.5 \cdot 461.4^2 + 0.85 \cdot (0.5 \cdot 133.728 + 16.901)] \cdot 10^{-6} = 0.056 \text{ м.} \end{aligned}$$

Динамічний момент інерції полюсів з котушками:

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. Р01. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 74   |

$$J_n = (m_{cn} + m_{m.n} + m_{m.o}) \cdot 4 \cdot R_{n.cp}^2 =$$

$$= (243.9 + 120.5 + 49.7) \cdot 4 \cdot 0.094^2 = 3.001 \text{ кг/м}^2.$$

Динамічний момент інерції сердечника ротора:

$$J_{c2} = 0.5 \cdot m_{c2} \cdot 10^{-6} \cdot \left[ (0.5 \cdot D_2 + h_{c2})^2 - (0.5 \cdot D_2)^2 \right] =$$

$$= 0.5 \cdot 55.777 \cdot 10^{-6} \cdot \left[ (0.5 \cdot 133.728 + 16.901)^2 - (0.5 \cdot 133.728)^2 \right] = 0.158 \text{ кг/м}^2$$

Маса вала:

$$m_B = 15 \cdot 10^{-6} \cdot l_1 \cdot D_2^2 = 15 \cdot 10^{-6} \cdot 340 \cdot 133.728^2 = 91.204 \text{ кг.}$$

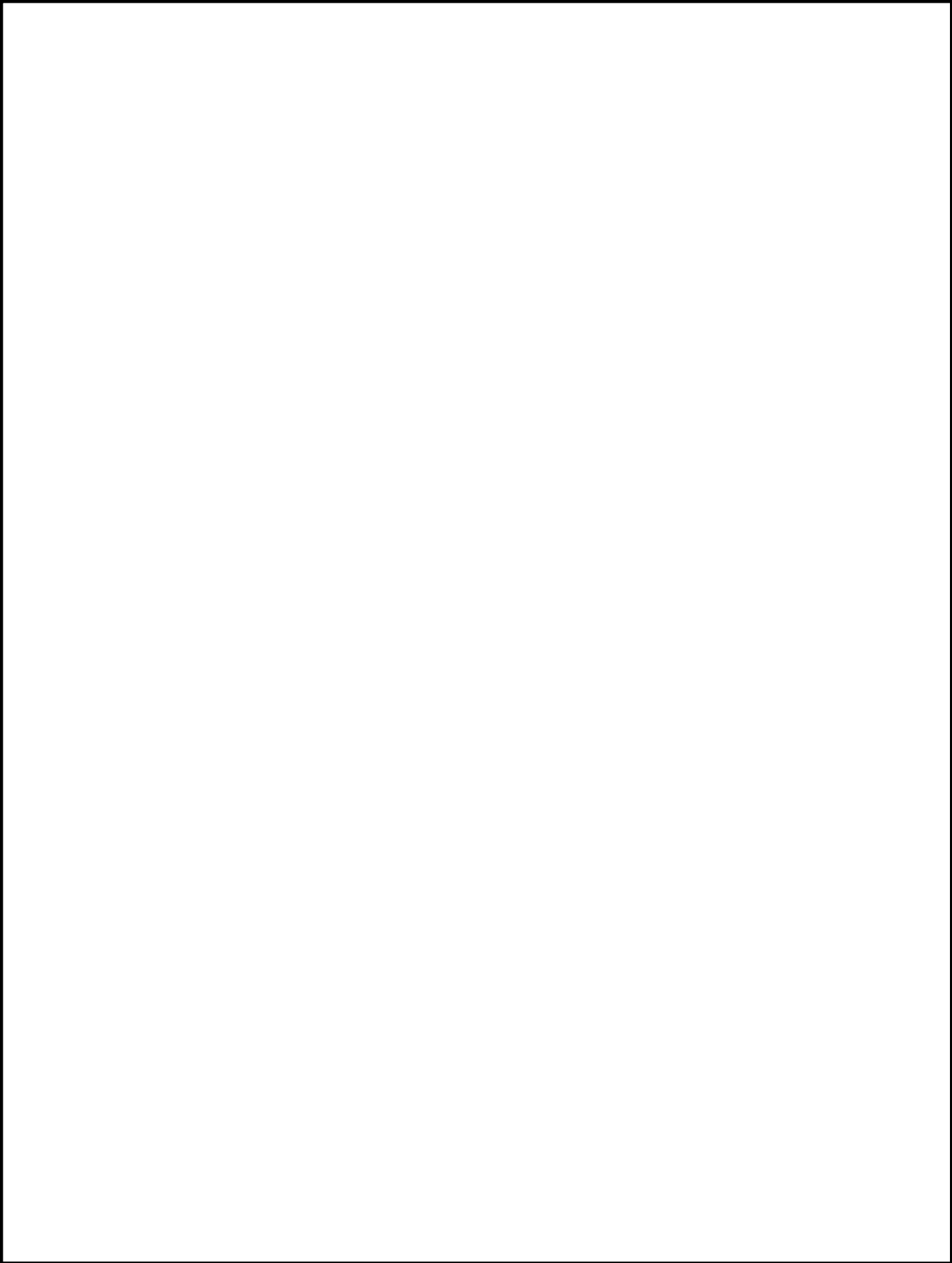
Динамічний момент інерції вала:

$$J_B = 0.5 \cdot m_B \cdot (0.5 \cdot D_2)^2 \cdot 10^{-6} = 0.5 \cdot 91.204 \cdot (0.5 \cdot 133.728)^2 \cdot 10^{-6} =$$

$$= 0.408 \text{ кг/м}^2.$$

Сумарний динамічний момент інерції ротора:

$$J_{u.o} = J_n + J_{c2} + J_B = 3.001 + 0.158 + 0.408 \approx 3.566 \text{ кг/м}^2.$$



|           |      |                   |        |      |                                                                     |           |      |        |
|-----------|------|-------------------|--------|------|---------------------------------------------------------------------|-----------|------|--------|
|           |      |                   |        |      | 141.4301з.КРБ.ПЗ.Р02                                                |           |      |        |
|           |      |                   |        |      |                                                                     |           |      |        |
| Зм.       | Лист | № докум.          | Підпис | Дата | Проектування збудника<br>для безщіткового<br>синхронного генератора | Лім.      | Лист | Листів |
| Розроб.   |      | Юрескул Л.О.      |        |      |                                                                     |           |      |        |
| Керівник  |      | Новозрецький С.М. |        |      |                                                                     |           |      |        |
| Консульт. |      |                   |        |      |                                                                     | ННІАЕ НУК |      |        |
| Н. контр. |      |                   |        |      |                                                                     |           |      |        |
| Зав. каф. |      | Обрубов А.В.      |        |      |                                                                     |           |      |        |

## Розділ 2. Проектування збудника для безщіткового синхронного генератора.

### 2.1. Вихідні дані для розрахунку збудника

В даному розділі проектується автоматичний регулятор збудження. Максимальне значення струму збудження  $I_b=6$  в. о.

Для проектування синхронного генератора задані наступні вихідні дані:

|                                         |                     |
|-----------------------------------------|---------------------|
| Номінальна потужність                   | 250000 Вт           |
| Кількість фаз                           | $m_1 = 3$           |
| Частота напруги                         | $f_1 = 50$ Гц       |
| Номінальна напруга                      | $U_1 = 230$ В       |
| Частота обертання                       | $n_1 = 1500$ об/хв. |
| Ступінь захисту від навколишніх впливів | IP23                |
| Спосіб охолодження                      | IC01                |
| Кількість пар полюсів                   | $p = 2$             |
| Клас нагрівостійкості ізоляції          | F                   |

Опір обмотки збудження  $r_n = 0,77$  в.о.

Струм збудження при номінальному навантаженні:

$$I_{n.n} = \frac{F_{n.n}}{w_n} = \frac{7947}{145} = 54,807 \text{ А,}$$

Після багаторазових перерахунків задаємося намагнічу вальною силою  $F_{n.n} = 7947$  А та кількістю витків  $w_n = 145$

Номінальна напруга збудника:

$$U_{зб.ном} = I_{н.н} \cdot r_n \cdot 1,38 = 54,807 \cdot 0,77 \cdot 1,38 = 58,238 \text{ В.}$$

Максимальна напруга збудника:

$$U_{зб.мах} = \frac{I_{зб.мах} \cdot U_{зб.ном}}{I_{н.н}} = \frac{6 \cdot 58,238}{54,807} = 136,176 \text{ В.}$$

Фазна напруга обмотки збудження:

$$U_{фаз.ов} = \frac{U_{зб.мах}}{2,34} = \frac{136,176}{2,34} = 58,195 \text{ В,}$$

де 2,34 – коефіцієнт випрямача.

Максимальний струм збудника:

$$I_{зб.мах} = \frac{U_{зб.мах}}{r_n \cdot 1,38} = \frac{136,176}{0,77 \cdot 1,38} = 128,153 \text{ А.}$$

Максимальний фазний струм:

$$I_{\phi} = I_{зб.мах} \cdot 0,817 = 128,153 \cdot 0,817 = 104,701 \text{ А.}$$

Номінальна потужність збудника:

$$P_n = 3 \cdot U_{фаз.ов} \cdot I_{\phi} = 3 \cdot 58,195 \cdot 104,701 = 1,828 \cdot 10^4 \text{ Вт.}$$

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. Р02. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 78   |

## 2.2. Розрахунок геометричних параметрів ротора.

З конструктивних міркувань, знову ж таки після багаторазових перерахунків, вибираємо внутрішній діаметр вала збудника  $D_2=120$  мм.

Кількість пазів сердечника ротора:

$$z_2 = 2 \cdot p \cdot m \cdot q_2 = 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 3 = 36$$

Індукція в повітряному зазорі:  $B_\delta = 0,8$  Тл.

Лінійне навантаження:  $A = 300$  А/см.

Висота осі обертання:  $h = 180$  мм.

Попереднє значення довжини сердечника ротора  $l_\delta = l'_2 = 100$  мм.

З [додатка 3 табл.9-2] вибираю значення зовнішнього діаметра сердечника ротора  $D_{H2}=270$  мм.

Попереднє значення магнітного потоку:

$$\Phi = \frac{B_\delta \cdot D_{H2} \cdot l'_2 \cdot 10^{-6}}{p} = \frac{0,8 \cdot 270 \cdot 100 \cdot 10^{-6}}{2} = 0,011 \text{ Вб.}$$

Укорочення обмотки ротора по пазах  $\beta_2 = 0,8$  з [3, § 11-4 ].

Діаметральний крок:

$$y_{n2} = \frac{\beta_2 \cdot z_2}{2 \cdot p} = \frac{0,8 \cdot 36}{2 \cdot 2} = 7,2.$$

Приймаємо  $y_{n2} = 7$

Перераховане значення діаметрального кроку:

$$\beta_2 = \frac{y_{n2} \cdot 2 \cdot p}{z_2} = \frac{7 \cdot 2 \cdot 2}{36} = 0,778$$



Коефіцієнт укорочення:

$$k_{y2} = \sin(\beta_2 \cdot 90^\circ) = \sin(0,778 \cdot 90^\circ) = 0,94$$

Коефіцієнт розподілу дорівнює:

$$k_{p1} = \frac{0,5}{q_2 \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} = \frac{0,5}{4 \cdot \sin\left(\frac{20}{2}\right)} = 0,96,$$

$$\text{де } \alpha = \frac{60}{q_2} = \frac{60}{3} = 20^\circ.$$

Обмотувальний коефіцієнт:

$$k_{o\delta 2} = k_{p2} \cdot k_{y2} = 0,96 \cdot 0,94 = 0,902$$

Попередня кількість витків в обмотці фази:

$$\omega_2 = \frac{k_H \cdot U_{зб. \max}}{222 \cdot k_{o\delta 2} \cdot \frac{f_1}{50} \cdot \Phi} = \frac{0,97 \cdot 136,176}{222 \cdot 0,902 \cdot \frac{50}{50} \cdot 0,011} = 61,084,$$

задаємося попередньо значенням коефіцієнта  $k_H = 0,97$ .

Попередня кількість ефективних провідників у пазу:

$$N_{n2} = \frac{\omega_2 \cdot a_2}{p \cdot q_2} = \frac{61,084 \cdot 1}{2 \cdot 3} = 10,$$

де  $a_2 = 1$  - кількість паралельних витків.

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. Р02. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 80   |

Уточнена кількість витків в обмотці фази:

$$\omega_2 = \frac{N_{n2} \cdot p \cdot q_2}{a_2} = \frac{10 \cdot 2 \cdot 3}{1} = 60.$$

Вибираємо кількість витків  $w_2 = 62$ .

Уточнене значення магнітного потоку:

$$\Phi = \Phi' \cdot \frac{\omega'_2}{\omega_2} = 0,011 \cdot \frac{62}{60} = 0,011 \text{ Вб.}$$

Паралельні гілки обмотки повинні містити однакову кількість витків, а сторони котушок – перебувати в магнітному полі в однакових умовах. Вибравши ціле число  $N_{n2}$ , уточнимо попередньо встановлені параметри.

Уточнене значення індукції в повітряному зазорі:

$$B_\delta = B'_\delta \cdot \frac{\omega'_2}{\omega_2} = 0,8 \cdot \frac{62}{60} = 0,788 \text{ Тл.}$$

Попереднє значення номінального фазного струму:

$$I_2 = \frac{P_n}{3 \cdot U_{\text{фаз.оз}} \cdot \cos \varphi} = \frac{1,828 \cdot 10^4}{3 \cdot 58,195 \cdot 1} = 104,701 \text{ А}$$

Уточнене лінійне навантаження ротора:

$$A_2 = \frac{10 \cdot N_{n2} \cdot z_2 \cdot I_2}{\pi \cdot D_{n2} \cdot a_2} = \frac{10 \cdot 10 \cdot 36 \cdot 104,701}{3,14 \cdot 270 \cdot 1} = 452,397 \text{ А/см.}$$

Попередня висота спинки статора  $B_{c2}=1.5$  Тл. з [3, § 9-4].

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. Р02. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 81   |

Попередня висота спинки статора:

$$h_{c2} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{2 \cdot k_c \cdot l_2 \cdot B_{c2}} = \frac{0,011 \cdot 10^6}{2 \cdot 0,97 \cdot 100 \cdot 1,5} = 36,565 \text{ мм.}$$

Попередня висота пазу:

$$h_{n2} = \frac{D_{H2} - D_2}{2} - h_{c2} = \frac{270 - 120}{2} - 36,565 = 38,435 \text{ мм.}$$

Зубцеве ділення по зовнішньому діаметру ротора:

$$t_2 = \frac{\pi \cdot D_{H2}}{z_2} = \frac{3,14 \cdot 270}{36} = 23,562 \text{ мм.}$$

Магнітна індукція в зубцях статора  $B_{32}=1,7$  Тл.

Ширина зубця:

$$b_{32} = \frac{t_2 \cdot B_\delta}{k_c \cdot B_{32}} = \frac{23,562 \cdot 0,788}{0,97 \cdot 1,7} = 11,262 \text{ мм.}$$

Менша ширина паза:

$$b_1 = \frac{(D_2 + 2 \cdot h_{c2}) \cdot \pi}{z_2} - b_{32} = \frac{(120 + 2 \cdot 36,565) \cdot 3,14}{36} - 11,262 = 5,592 \text{ мм.}$$

Зубцеве ділення статора в найбільш вузькому місці:

$$h_k=1 \text{ мм; } h_{ш2}=0.5 \text{ мм.}$$

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. Р02. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 82   |

Ширина шліца напіввідкритого паза:

$$b_{u2} = \frac{\pi \cdot (D_{n2} - 2 \cdot h_{u2})}{z_2} - b_{32} - 2 \cdot h_k = \frac{3,14 \cdot (270 - 2 \cdot 0,5)}{36} - 11,262 - 2 \cdot 1 = 10,213 \text{ мм.}$$

Ширина паза по більшій стороні:

$$b_2 = \frac{\pi \cdot (D_{n2} - 2 \cdot h_{u2} - 2 \cdot h_k)}{z_2} - b_{32} = \frac{3,14 \cdot (270 - 2 \cdot 0,5 - 2 \cdot 1)}{36} - 11,262 = 12,038 \text{ мм.}$$

Площа поперечного перерізу паза в штампі:

$$S_{n2} = \frac{b_1 + b_2}{2} \cdot (h_{n2} - h_{u2} - \frac{b_2 - b_{u2}}{2}) = \frac{5,592 + 12,038}{2} \cdot (38,435 - 0,5 - \frac{12,038 - 10,213}{2}) = 326,345 \text{ мм}^2.$$

Площа поперечного перерізу паза в світлі:

$$S_{n2}^{\prime} = \left( \frac{b_1 + b_2}{2} - b_c \right) \cdot (h_{n2} - h_{u2} - \frac{b_2 - b_{u2}}{2} - h_c) = \left( \frac{5,592 + 12,038}{2} - 0,2 \right) \cdot (38,435 - 0,5 - \frac{12,038 - 10,213}{2} - 0,2) = 317,217 \text{ мм}^2.$$

Площа поперечного перерізу корпусної ізоляції:

$$S_u = b_{u2} \cdot (2 \cdot h_{n2} + b_1 + b_2) = 0,4 \cdot (2 \cdot 38,435 + 5,592 + 12,038) = 37,8 \text{ мм}^2.$$

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. Р02. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 83   |

Площа поперечного перерізу прокладок між верхньою та нижньою катушками в пазу, на дні паза і під клином:

$$S_{np} = 0,5 \cdot b_1 + 0,75 \cdot b_2 = 0,5 \cdot 5,592 + 0,75 \cdot 12,038 = 11,824 \text{ мм}^2.$$

Площа поперечного перерізу паза, яку займає обмотка:

$$S_{n2}'' = S_{n2}' - S_u - S_{np} = 317,217 - 37,8 - 11,824 = 267,593 \text{ мм}^2.$$

Обираємо  $c_2=30$  з міркувань отримання необхідної площі елементарного провідника.

Коефіцієнт заповнення паза  $k_n=0,72$ .

Діаметр елементарного ізолюваного дроту:

$$d' = \sqrt{\frac{k_n \cdot S_{n2}''}{N_{n2} \cdot c_2}} = \sqrt{\frac{0,72 \cdot 267,593}{10 \cdot 30}} = 0,794 \text{ мм}.$$

Вибираємо ізолюваний дріт з [3], діаметром  $d' = 0,805 \text{ мм}$  та площею поперечного перерізу неізолюваного дроту  $S=0,43 \text{ мм}^2$ .

Уточнюється коефіцієнт заповнення паза:

$$k_n = \frac{N_{n2} \cdot c_2 \cdot d'^2}{S_{n2}''} = \frac{10 \cdot 30 \cdot 0,805^2}{267,593} = 0,74$$

Щільність струму в обмотці ротора:

$$J_2 = \frac{I_2}{c_2 \cdot S_2 \cdot a_2} = \frac{104,701}{30 \cdot 0,43 \cdot 1} = 8,116 \text{ А/мм}^2.$$

Показником, що характеризує питоме теплове навантаження статора, служить добуток лінійного навантаження  $A_2$  на щільність струму в обмотці  $J_2$ : Розраховане значення задовольняє знайденому з [3, рис. 11-12].

$$A_2 \cdot J_2 = 452,397 \cdot 8,116 = 3,672 \cdot 10^3$$

Середній розподіл зубців ротора:

$$t_{cp2} = \frac{\pi \cdot (D_2 + h_{n2})}{z_2} = \frac{\pi \cdot (120 + 38,435)}{36} = 13,826 \text{ мм.}$$

Середня ширина котушки обмотки ротора:

$$b_{cp2} = t_{cp2} \cdot y_{n2} = 13,826 \cdot 7 = 96,782 \text{ мм.}$$

Середня довжина одної лобової частини котушки:

$$l_{л2} = (1,16 + 0,14 \cdot p) \cdot b_{cp2} + 15 = (1,16 + 0,14 \cdot 2) \cdot 96,782 + 15 = 154,366 \text{ мм.}$$

Середня довжина витка обмотки:

$$l_{cp2} = 2 \cdot (l_2 + l_{л2}) = 2 \cdot (100 + 154,366) = 508,733 \text{ мм.}$$

Довжина вильоту лобової частини обмотки:

$$l_{в2} = (0,12 + 0,15 \cdot p) \cdot b_{cp2} + 10 = (0,12 + 0,15 \cdot 2) \cdot 96,782 + 10 = 50,649 \text{ мм.}$$

### 2.3. Розрахунок геометричних параметрів статора.

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

Кількість пазів сердечника статора:

$$z_1 = 2 \cdot p \cdot m_1 \cdot q_1 = 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 = 48$$

Після декількох перерахунків задаємось повітряним зазором  $\delta = 1,5$  мм.

Зубців розподіл по внутрішньому діаметру статора:

$$t_1 = \frac{\pi \cdot (D_{H2} + 2 \cdot \delta)}{z_1} = \frac{3,14 \cdot (270 + 2 \cdot 1,5)}{48} = 17,868 \text{ мм.}$$

Дійсний коефіцієнт полюсної дуги  $\alpha = 0,66$

Попереднє значення  $B_{\delta}=1,05$  Тл.

Ширина паза:

$$b_{\delta 1} = \frac{t_1 \cdot B_{\delta}}{k_c \cdot B_{\delta 1}} = \frac{17,868 \cdot 0,788}{0,97 \cdot 1,05} = 18 \text{ мм.}$$

Попереднє значення магнітної індукції в спинці статора  $B_{c1}=1,1$  Тл.

Висота спинки статора:

$$h_{c1} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{2 \cdot k_c \cdot l_2 \cdot B_{c1}} = \frac{0,011 \cdot 10^6}{2 \cdot 0,97 \cdot 100 \cdot 1,1} = 50 \text{ мм.}$$

Висота паза статора  $h'_{n1} = 20$  мм.

Внутрішній діаметр статора збудника

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. Р02. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 86   |

$$D_1 = D_{H2} + 2 \cdot \delta = 270 + 2 \cdot 1,5 = 273 \text{ мм.}$$

Зовнішній діаметр статора:

$$D_{H1} = D_1 + (h_{c1} + h_{n1}) \cdot 2 = 273 + (50 + 20) \cdot 2 = 413 \text{ мм.}$$

Ширина паза по більшій стороні:

$$b_1 = \frac{\pi \cdot (D_1 + 2 \cdot h_{n1})}{z_1} - b'_{31} = \frac{\pi \cdot (273 + 2 \cdot 20)}{48} - 14 = 6,486 \text{ мм.}$$

Ширина паза по меншій стороні:

$$b_2 = \frac{\pi \cdot (D_1 + 2 \cdot h_{u2} - b_{u2}) - z_1 \cdot b'_{31}}{z_1 - \pi} = \frac{3,14 \cdot (273 + 2 \cdot 0,5 - 10,213) - 48 \cdot 14}{48 - 3,14} = 3,493 \text{ мм.}$$

Ширина шліца:

$$b_{u1} = 0,3 \cdot \sqrt{h} = 0,3 \cdot \sqrt{180} = 4,025 \text{ мм.}$$

#### 2.4. 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 накопичником.

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. Р02. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 87   |



Коефіцієнт, що враховує збільшення магнітного опору повітряного зазору внаслідок зубчатої будови ротору:

$$k_{\delta 1} = 1 + \frac{b_{\text{ш1}}}{\left( t_1 - b_{\text{ш1}} + \frac{5 \cdot \delta \cdot t_1}{b_{\text{ш1}}} \right)} = 1 + \frac{4,025}{\left( 17,868 - 4,025 + \frac{5 \cdot 1,5 \cdot 17,868}{4,025} \right)} = 1,085$$

Коефіцієнт, що враховує збільшення магнітного опору повітряного зазору внаслідок зубчатої будови ротору:

$$k_{\delta 2} = 1 + \frac{b_{\text{ш2}}}{\left( t_2 - b_{\text{ш2}} + \frac{5 \cdot \delta \cdot t_2}{b_{\text{ш2}}} \right)} = 1 + \frac{10,213}{\left( 23,562 - 10,213 + \frac{5 \cdot 1,5 \cdot 23,562}{10,213} \right)} = 1,333.$$

Коефіцієнт, що враховує зменшення магнітного опору повітряного зазору при наявності радіальних каналів на статорі  $k_k = 1$ .

Загальний коефіцієнт повітряного зазору дорівнює:

$$k_{\delta} = k_{\delta 1} \cdot k_{\delta 2} \cdot k_{k1} = 1,085 \cdot 1,333 \cdot 1 = 1,447.$$

Полюсне ділення:

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_1}{2 \cdot p} = \frac{3,14 \cdot 273}{2 \cdot 2} = 214,414 \text{ мм.}$$

Розрахункова площа поперечного перерізу повітряного зазору:

$$S_{\delta} = \alpha \cdot \tau \cdot (l'_2 + 2 \cdot \delta) = 0,66 \cdot 214,414 \cdot (100 + 2 \cdot 1,5) = 1,458 \cdot 10^4 \text{ мм}^2.$$

Уточнене значення магнітної індукції в повітряному зазорі:

$$B_{\delta} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{S_{\delta}} = \frac{0.011 \cdot 10^6}{1,458 \cdot 10^4} = 0,73 \text{ Тл.}$$

МРС для повітряного зазору:

$$F_{\delta} = 0.8 \cdot \delta \cdot k_{\delta} \cdot B_{\delta} \cdot 10^3 = 0.8 \cdot 1,5 \cdot 1,447 \cdot 0.73 \cdot 10^3 = 1,287 \cdot 10^3 \text{ А.}$$

Розрахуємо геометричні параметри зубців ротора.

Розрахункова площа поперечного перерізу зубців ротора:

$$S_{32} = \frac{z_2 \cdot l'_2 \cdot b_{32} \cdot k_c \cdot \alpha}{2 \cdot p} = \frac{36 \cdot 100 \cdot 11,262 \cdot 0,97 \cdot 0,66}{2 \cdot 2} = 6,489 \cdot 10^3 \text{ мм}^2.$$

Магнітна індукція поперечному перетині ротора:

$$B_{32} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{S_{32}} = \frac{0.011 \cdot 10^6}{6,489 \cdot 10^3} = 1,66 \text{ Тл.}$$

Напруженість магнітного поля в зубцях ротора  $H_{32}=16,9$  А/см з [3, додаток 8].

Середня довжина шляху магнітного потоку в зубцях ротора:

$$L_{32} = h_{n2} = 38,435 \text{ мм.}$$

МРС для зубців ротора :

$$F_{32} = 0,1 \cdot L_{32} \cdot H_{32} = 0,1 \cdot 38,435 \cdot 16,9 = 64,955 \text{ А.}$$

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. Р02. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 89   |

Розрахуємо МРС для спинки ротора.

Розрахункова площа поперечного перерізу спинки ротора:

$$S_{c2} = l_2 \cdot h_{c2} \cdot k_c = 100 \cdot 36,565 \cdot 0,97 = 3,547 \cdot 10^3 \text{ мм}^2.$$

Середнє значення індукції в спинці ротора:

$$B_{c2} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{2 \cdot S_{c2}} = \frac{0,011 \cdot 10^6}{2 \cdot 3,547 \cdot 10^3} = 1,52 \text{ Тл.}$$

Напруженість магнітного поля в спинці ротора  $H_{c2}=9,65$  з [3, додаток 11].

Середня довжина шляху магнітного потоку в спинці ротора:

$$L_{c2} = \left[ \frac{\pi \cdot (D_2 + h_{c2})}{4 \cdot p} \right] = \left[ \frac{3,14 \cdot (120 + 36,565)}{4 \cdot 2} \right] = 61,483 \text{ мм.}$$

МРС для спинки ротора:

$$F_{c2} = 0,1 \cdot L_{c2} \cdot H_{c2} = 0,1 \cdot 61,483 \cdot 9,65 = 59,331 \text{ А.}$$

МРС для ротора й повітряного зазору:

$$F_{\delta_{\Sigma c}} = F_{\delta} + F_{\Sigma 2} + F_{c2} = 1,287 \cdot 10^3 + 64,955 + 59,331 = 1,411 \cdot 10^3 \text{ А.}$$

МРС для ротора й повітряного зазору у відносних одиницях:

$$F_{\delta_{\Sigma c}} = \frac{F_{\delta_{\Sigma c}}}{F_{\Sigma 1.0}} = \frac{1,411 \cdot 10^3}{1,145 \cdot 10^3} = 1,232 \text{ в.о.}$$

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. Р02. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 90   |

Ширина паза:

$$b_{n0.33} = \frac{\pi \cdot \left( D_1 + \frac{2 \cdot h'_{n1}}{3} \right)}{z_1} - b'_{s1} = \frac{3,14 \cdot \left( 273 + \frac{2 \cdot 20}{3} \right)}{48} - 14 = 4,74 \text{ мм.}$$

Коефіцієнт магнітної провідності розсіювання зубцевої зони

$$\lambda_{sf} = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{4 \cdot 2 \cdot p \cdot l_2 \cdot 10^{-2}}{z_1} \cdot \left( \frac{h_{n1} - h_{k.л} - h_{np1} - h_{u1}}{2 \cdot b_{n0.33}} + \frac{h_{np1} + h_{k.л} + h_{u1}}{b_{n0.33}} \right) =$$

$$4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{4 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 100 \cdot 10^{-2}}{48} \cdot \left( \frac{20 - 3,5 - 7,1 - 0,5}{2 \cdot 4,74} + \frac{7,1 + 3,5 + 0,5}{4,74} \right) = 1,374 \cdot 10^{-6}.$$

Магнітний потік розсіювання полюсів:

$$\Phi_{\sigma} = \lambda_{sf} \cdot F_{\delta_{3c}} = 1,374 \cdot 10^{-6} \cdot 1,411 \cdot 10^3 = 1,939 \cdot 10^{-3} \text{ Вб.}$$

Магнітний потік розсіювання полюсів у відносних одиницях:

$$\Phi_{\sigma'} = \frac{\Phi_{\sigma}}{\Phi} = \frac{1,939 \cdot 10^{-3}}{0,011} = 0,179 \text{ в.о.}$$

Коефіцієнт розсіювання магнітного потоку:

$$\sigma = 1 + \frac{\Phi_{\sigma}}{\Phi} = 1 + \frac{1,939 \cdot 10^{-3}}{0,011} = 1,179$$

МРС для зубців статора.

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. Р02. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 91   |

Зубцеве ділення ротора в мінімальному перетині зубця:

$$t_{1\min} = \pi \cdot \frac{D_{H2} - 2 \cdot h_{n2}}{z_2} = 3,14 \cdot \frac{270 - 2 \cdot 38,435}{36} = 16,854 \text{ мм.}$$

Ширина зубця:

$$b_{31} = 14 \text{ мм.}$$

Розрахункова площа поперечного перерізу зубців статора:

$$S_{31} = \frac{z_1 \cdot l'_1 \cdot b'_{31} \cdot k_c \cdot \alpha}{2 \cdot p} = \frac{48 \cdot 100 \cdot 14 \cdot 0,97 \cdot 0,66}{2 \cdot 2} = 1,076 \cdot 10^4 \text{ мм}^2.$$

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

$$B_{31cp} = \sigma \cdot \frac{\Phi \cdot 10^6}{S_{31}} = 1,179 \cdot \frac{0,011 \cdot 10^6}{1,076 \cdot 10^4} = 1,18 \text{ Тл.}$$

Напруженість магнітного поля в зубцях статора дорівнює  $H_{31} = 5,7 \text{ А/см з}$  [3, додаток 9].

Середня довжина шляху магнітного потоку:

$$L_{31} = h_{n1} = 20 \text{ мм.}$$

МРС для зубців статора:

$$F_{31} = 0,1 \cdot L_{31} \cdot H_{31} = 0,1 \cdot 20 \cdot 5,7 = 11,4 \text{ А.}$$

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 43013. КРБ. ПЗ. Р02. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 92   |

Розрахуємо МРС для спинки статора.

Розрахункова площа поперечного перерізу спинки статора:

$$S_{c1} = l_2 \cdot h'_{c1} \cdot k_c = 100 \cdot 50 \cdot 0,97 = 4,85 \cdot 10^3 \text{ мм}^2.$$

Середнє значення індукції в спинці статора:

$$B_{c1} = \frac{\sigma \cdot \Phi \cdot 10^6}{2 \cdot S_{c1}} = \frac{1,179 \cdot 0,011 \cdot 10^6}{2 \cdot 4,85 \cdot 10^3} = 1,31 \text{ Тл.}$$

Напруженість магнітного поля в спинці статора  $H_{c1} = 5,21$  з [3, додаток 11].

Середня довжина шляху магнітного потоку в спинці статора:

$$L_{c1} = \left[ \frac{\pi \cdot (D_{n1} - 2 \cdot h'_{c1})}{4 \cdot p} \right] = \left[ \frac{3,14 \cdot (413 - 2 \cdot 50)}{4 \cdot 2} \right] = 142,55 \text{ мм.}$$

МРС для спинки статора:

$$F_{c1} = 0,1 \cdot L_{c1} \cdot H_{c1} = 0,1 \cdot 142,55 \cdot 5,21 = 74,268 \text{ А.}$$

Сумарна МРС магнітного ланцюга( на полюс):

$$F_{\Sigma} = F_{c2} + F_{32} + F_{c1} + F_{31} + F_{\delta} = 59,331 + 64,955 + \\ + 74,268 + 11,4 + 1,287 \cdot 10^3 = 1,497 \cdot 10^3 \text{ А.}$$

Сумарна МРС магнітного ланцюга( на полюс):

$$F'_{\Sigma} = \frac{F_{\Sigma}}{F_{\Sigma}} = \frac{1,497 \cdot 10^3}{1,497 \cdot 10^3} = 1 \text{ в.о.}$$

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. Р02. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 93   |

## 2.5. 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  $\Phi_*$  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.

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.):  $F_{\delta\sigma c*} = \frac{F_{\delta\sigma c}}{F_{\Sigma(1)}}.$

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

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

Магнітний потік у сердечнику полюса (Вб):  $\Phi_{n1} = \Phi + \Phi_\sigma.$

Магнітний потік у сердечнику полюса (в. о.):  $\Phi_{n1*} = \frac{\Phi_{n1}}{\Phi_{(1)}}.$

Сумарна МРС для полюса та спинки ротора (А):

$$F_{n.c.} = F_n + F_{c2} + F_{n2} + F_{32}.$$

Сумарна МРС для полюса та спинки ротора (в. о.):

$$F_{nc*} = \frac{F_{nc}}{F_{\Sigma(1)}}.$$

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

$$F_{\Sigma} = F_{\delta_{3c}} + F_n + F_{c2} + F_{n2} + F_{32}.$$

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 наступнім 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 %.

Згідно даних таблиці 2.1 будують характеристику холостого ходу зображену на рис. 2.1.

## 2.6. Розрахунок опорів розсіювання обмотки статора та розрахунок магнітного кола за номінального навантаження.

Питома електрична провідність міді:  $\gamma_M = 57 \times 10^3 \frac{\text{А}}{\text{мм}}$ .

Активний опір обмотки статора при 20°C:



$$r_2 = \frac{w_2 \cdot l_{cp2}}{\gamma_M \cdot a_1 \cdot c_2 \cdot S_2} = \frac{62 \cdot 508,733}{57 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 30 \cdot 0,43} = 4,3 \cdot 10^{-2} \text{ Ом.}$$

Таблиця 2.1. Дані розрахунку холостого ходу

|                            |                     |                    |                    |                    |                    |
|----------------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| $E_{1*}, \text{В. О.}$     | 0,5                 | 1,0                | 1,1                | 1,2                | 1,3                |
| $E_1, \text{В}$            | 29,097              | 58,195             | 64,014             | 69,834             | 75,653             |
| $\Phi, \text{Вб}$          | $5,4 \cdot 10^{-3}$ | 0,011              | 0,012              | 0,013              | 0,014              |
| $B_\delta, \text{Тл}$      | 0,37                | 0,741              | 0,815              | 0,889              | 0,963              |
| $F_\delta, \text{А}$       | 643,296             | $1,287 \cdot 10^3$ | $1,415 \cdot 10^3$ | $1,544 \cdot 10^3$ | $1,673 \cdot 10^3$ |
| $B_{32}, \text{Тл}$        | 0,83                | 1,66               | 1,83               | 2                  | 2,16               |
| $F_{32}, \text{А}$         | 11,761              | 64,955             | 117,226            | 259,434            | 518,868            |
| $B_{c2}, \text{Тл}$        | 0,76                | 1,52               | 1,67               | 1,83               | 1,98               |
| $F_{c2}, \text{А}$         | 11,067              | 59,331             | 117,433            | 244,088            | 559,496            |
| $F_{\delta 3c}, \text{А}$  | 666,124             | $1,411 \cdot 10^3$ | $1,65 \cdot 10^3$  | $2,047 \cdot 10^3$ | $2,751 \cdot 10^3$ |
| $\Phi_\sigma, \text{В.О.}$ | 0,085               | 0,179              | 0,21               | 0,26               | 0,35               |
| $B_{3lcp}, \text{Тл}$      | 0,59                | 1,18               | 1,32               | 1,47               | 1,66               |
| $F_{3l}, \text{А}$         | 4,04                | 11,4               | 15,1               | 20,8               | 33,8               |
| $B_{c1}, \text{Тл}$        | 0,65                | 1,31               | 1,46               | 1,63               | 1,84               |
| $F_{c1}, \text{А}$         | 20,527              | 74,268             | 112,472            | 226,654            | 590,156            |
| $F_\Sigma, \text{А}$       | 690,296             | $1,497 \cdot 10^3$ | $1,777 \cdot 10^3$ | $2,295 \cdot 10^3$ | $3,375 \cdot 10^3$ |
| $F_\Sigma^*, \text{В.О.}$  | 0,462               | 1                  | 1,188              | 1,533              | 2,255              |

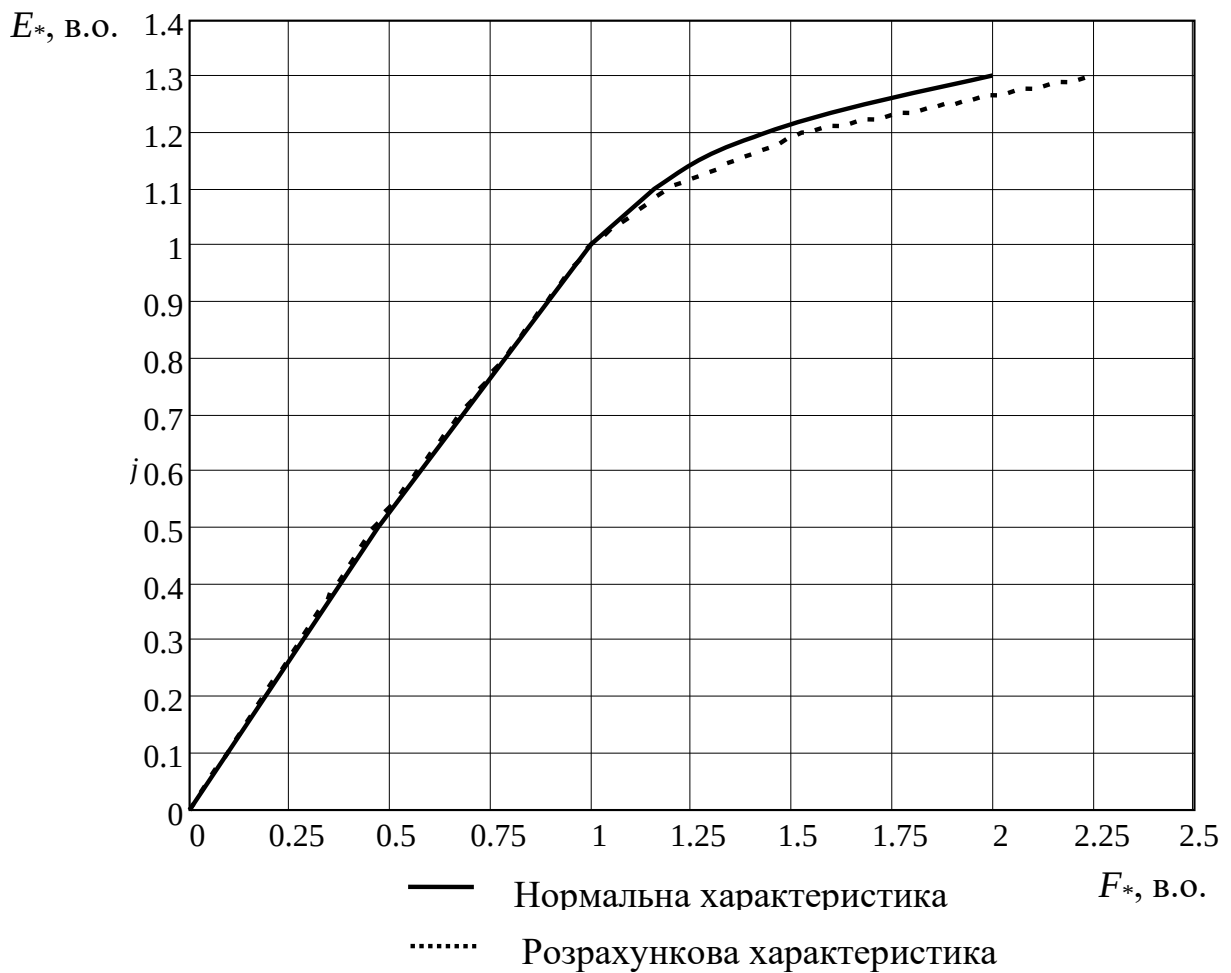


Рис. 2.1. Характеристика холостого ходу синхронного генератора

Те ж саме у відносних одиницях:

$$r'_2 = r_2 \cdot \frac{I_\phi}{U_{\text{фаз.ов}}} = 4,3 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{104,701}{58,195} = 0,077 \text{ в.о.}$$

Перевірка отриманого значення:

$$r''_2 = \frac{\pi \cdot D_{H2} \cdot A_2 \cdot l_{\text{ср2}} \cdot J_2}{114 \cdot 10^4 \cdot m \cdot I_\phi \cdot U_{\text{фаз.ов}}} = \frac{3,14 \cdot 270 \cdot 452,397 \cdot 508,733 \cdot 8,116}{114 \cdot 10^4 \cdot 3 \cdot 104,701 \cdot 58,195} = 0,076 \text{ в.о.}$$

Коефіцієнти, що враховують укорочення шагу:

$$k_{\beta 2} = 0,4 + 0,6 \cdot \beta_1 = 0,4 + 0,6 \cdot 0,778 = 0,867;$$

$$k_{\beta'2} = 0,2 + 0,8 \cdot \beta_1 = 0,2 + 0,8 \cdot 0,778 = 0,822.$$

Необхідні розміри паза:

$$h_{к2} = 1 \text{ мм}; \quad h_2 = 0,6 \text{ мм}; \quad h_3 = 0,4 \text{ мм}; \quad h_4 = 0,4 \text{ мм};$$

$$h_{n2} = h_{n1} = 20 \text{ мм}; \quad h_{ш1} = h_{ш2} = 0,5 \text{ мм}.$$

$$h_{22} = h'_{п2} - h_{ш2} - h_{к2} - h_2 - h_4 = 20 - 0,5 - 1 - 0,6 - 0,4 = 17,5 \text{ мм}.$$

Коефіцієнти провідності розсіювання:

$$\begin{aligned} \lambda_{п2} &= \frac{h_{22}}{3 \cdot b_2} \cdot k_{\beta2} + \left( 3 \cdot \frac{h_{к2}}{b_2 + 2 \cdot b_{ш2}} + \frac{h_{ш2}}{b_{ш2}} + \frac{h_2}{b_2} \right) \cdot k_{\beta'2} = \\ &= \frac{17,5}{3 \cdot 12,038} \cdot 0,867 + \left( 3 \cdot \frac{1}{12,038 + 2 \cdot 10,213} + \frac{0,5}{10,213} + \frac{0,6}{12,038} \right) \cdot 0,822 = 0,577. \end{aligned}$$

Коефіцієнт, що враховує вплив відкритості пазів статора на провідність диференційного розсіювання:

$$k_{ш2} = 1 - \frac{0,033 \cdot b_{ш2}^2}{t_2 \cdot \delta} = 1 - \frac{0,033 \cdot 10,213^2}{23,562 \cdot 1,5} = 0,903.$$

Коефіцієнти для визначення диференційної провідності:

$$k_{p1} = 0,96; \quad k_{д1} = 0,0062.$$

Коефіцієнт провідності диференційного розсіювання:

$$\begin{aligned} \lambda_{д2} &= 0,9 \cdot t_2 \cdot (q_2 \cdot k_{о62})^2 \cdot k_{p1} \cdot k_{ш2} \cdot \frac{k_{д1}}{\delta \cdot k_{\delta}} = \\ &= 0,9 \cdot 23,562 \cdot (4 \cdot 0,902)^2 \cdot 0,96 \cdot 0,903 \cdot \frac{0,0062}{1,5 \cdot 1,447} = 0,384. \end{aligned}$$

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 43013. КРБ. ПЗ. Р02. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 98   |

Коефіцієнт провідності розсіювання лобових частин обмотки:

$$\lambda_{л2} = 0,34 \cdot \frac{q_2}{l'_2} \cdot (l_{л2} - 0,64 \cdot \beta_1 \cdot \tau) = 0,34 \cdot \frac{3}{100} \cdot (154,366 - 0,64 \cdot 0,778 \cdot 214,414) = 1,343.$$

Коефіцієнт зубцевої зони статора:

$$k_{в\delta} = \frac{b_{ш2}}{\delta \cdot k_\delta} = \frac{10,213}{1,5 \cdot 1,447} = 4,705.$$

Коефіцієнт впливу відкриття пазів статора:  $k_K = -0,08$ .

Коефіцієнт розсіювання поміж коронками зубців:

$$\lambda_K = 0,04 + k_K + 0,07 \cdot \sqrt{\frac{t_2 - b_{ш2}}{b_{ш2}}} = 0,04 - 0,08 + 0,07 \cdot \sqrt{\frac{23,562 - 10,213}{10,213}} = 0,04.$$

Сумарний коефіцієнт магнітної провідності потоку розсіювання обмотки статора:

$$\lambda_2 = \lambda_{ш2} + \lambda_{л2} + \lambda_{л2} + \lambda_K = 0,577 + 0,384 + 0,486 + 0,04 = 1,487.$$

Індуктивний опір обмотки фази статора:

$$x'_\sigma = \frac{1,58 \cdot l_2 \cdot f_1 \cdot w_2^2 \cdot \lambda_2}{p \cdot q_2 \cdot 10^8} = \frac{1,58 \cdot 100 \cdot 50 \cdot 62^2 \cdot 1,487}{2 \cdot 3 \cdot 10^8} = 0,075 \text{ Ом.}$$

Індуктивний опір обмотки фази статора у відносних одиницях:

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. Р02. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 99   |

$$x_{\sigma} = \frac{x'_{\sigma} \cdot I_{\phi}}{U_{\text{фаз.ов}}} = \frac{0,075 \cdot 104,701}{58,195} = 0,135 \text{ в.о.}$$

Перевірка отриманого значення індуктивного опору:

$$\begin{aligned} x''_{\sigma} &= \frac{0,39 \cdot (D_{H2} \cdot A_2)^2 \cdot l_2 \cdot \lambda_2 \cdot 10^{-7}}{m \cdot z_2 \cdot I_{\phi} \cdot U_{\text{фаз.ов}}} = \\ &= \frac{0,39 \cdot (270 \cdot 452,397)^2 \cdot 100 \cdot 1,487 \cdot 10^{-7}}{3 \cdot 36 \cdot 104,701 \cdot 58,195} = 0,132. \end{aligned}$$

Вихідні дані для розрахунку у відносних одиницях наступні:

$$U'_2 = 1; \quad I'_2 = 1; \quad \cos \varphi = 1; \quad \sin \varphi = 0;$$

$$x_{\sigma} = 0,135; \quad \varphi = 0.$$

ЕРС, індукована магнітним полем повітряного зазору:

$$\begin{aligned} E_{\delta} &= \sqrt{(U'_2 + I'_2 \cdot \cos \varphi \cdot x_{\sigma})^2 + (I'_2 \cdot \sin \varphi \cdot x_{\sigma})^2} = \\ &= \sqrt{(1 + 1 \cdot 1 \cdot 0,135)^2 + (1 \cdot 0 \cdot 0,135)^2} = 1,135. \end{aligned}$$

МРС для магнітного кола повітряного зазору та статора:

$$F'_{\delta_{\Sigma}} = \frac{F_{\delta_{\Sigma}}(E_{\delta})}{F_{\Sigma}(\Phi'_1)} = \frac{1784}{1497} = 1,192.$$

МРС для повітряного зазору:

$$F'_{\delta} = \frac{F_{\delta}(E_{\delta})}{F_{\Sigma}(\Phi'_1)} = \frac{1440}{1497} = 0,962.$$

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. Р02. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 100  |

Попередній коефіцієнт насичення магнітного кола статора:

$$k_{\text{нас}} = \frac{F'_{\delta 3c}}{F'_{\delta}} = \frac{1,192}{0,962} = 1,239.$$

Обираємо коефіцієнт, що враховує насичення магнітної системи:

$$\chi_d = 0,94.$$

Коефіцієнт реакції якоря:  $k_a = k_f^{-1} = 1,05^{-1} = 0,952.$

Коефіцієнт форми поля реакції якоря:  $k_{\text{фа}} = 1.$

Зобразимо часткові характеристики синхронного генератора.

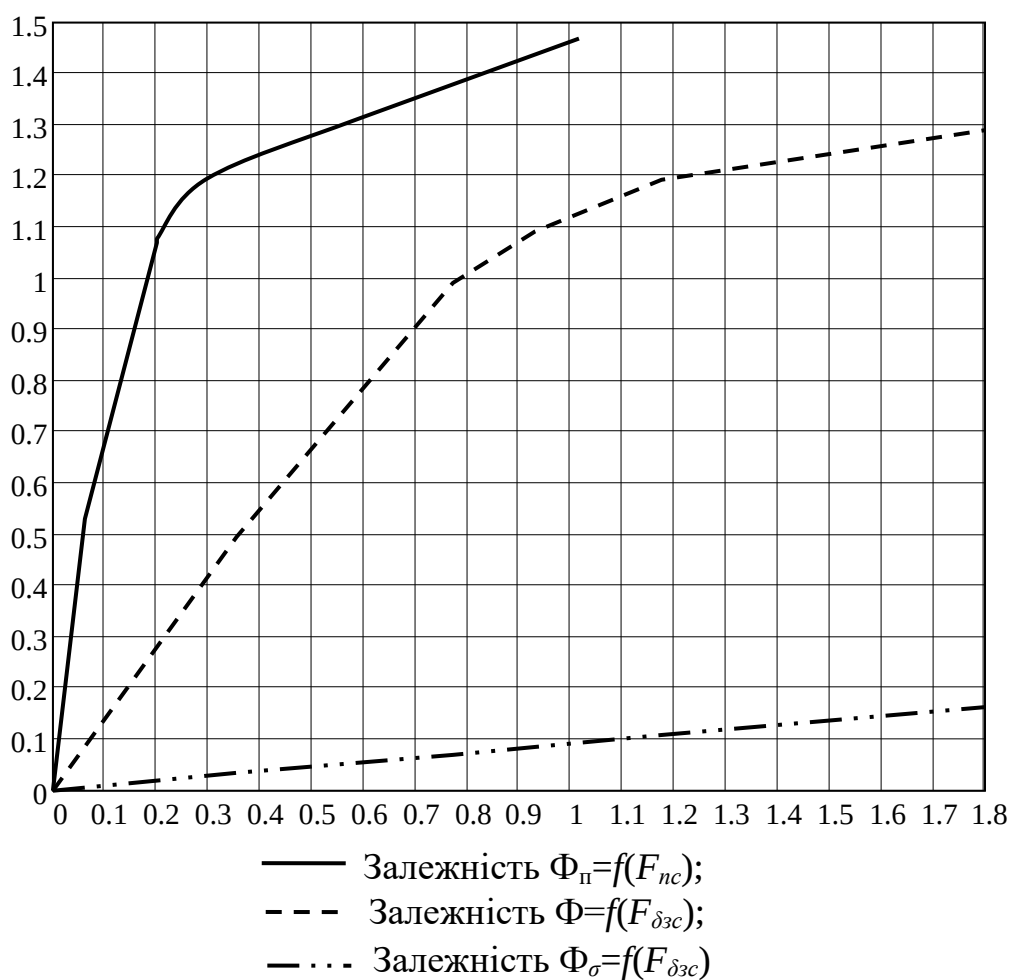


Рис.2.2. Часткові характеристики намагнічування для

|       |      |          |        |      |
|-------|------|----------|--------|------|
|       |      |          |        |      |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |

141. 4301з. КРБ. ПЗ. Р02.

Лист

101

синхронного генератору

Амплітуда МРС реакції якоря:

$$F_a = 0,45 \cdot m \cdot w_2 \cdot k_{об2} \cdot I_{\phi} \cdot k_{\phi a} \cdot p^{-1} = 0,45 \cdot 3 \cdot 62 \cdot 0,902 \cdot 104,701 \cdot 1 \cdot 2^{-1} = 3,952 \cdot 10^3 \text{ А.}$$

Амплітуда МРС у відносних одиницях:

$$F'_a = \frac{F_a}{F_{\Sigma}(\Phi_1'')} = \frac{3952}{1497} = 2,641.$$

МРС з урахуванням насичення:

$$F''_a = \chi_d \cdot k_a \cdot F'_a = 0,94 \cdot 0,952 \cdot 2,641 = 1,408.$$

ЕРС обмотки статора, що зумовлена МРС реакції якоря:

$$E''_a = \text{root} \left( \frac{F_{\delta}(\text{xx})}{F_{\Sigma}(1)} - F''_{a,\text{xx},0,5} \right); E''_a = 1,638.$$

Кут навантаження:

$$\begin{aligned} \Psi &= \frac{180}{\pi} \cdot \arctg \left( \frac{(I'_2 \cdot x_{\sigma} + E''_a) + U'_2 \cdot \sin \varphi}{U'_2 \cdot \cos \varphi} \right) = \\ &= \frac{180}{3,14} \cdot \arctg \left( \frac{(1 \cdot 0,135 + 1,638) + 1 \cdot 0}{1 \cdot 1} \right) = 60,582. \end{aligned}$$

Визначаємо кут між вектором струму статора та віссю  $q$ :

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. Р02. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 102  |

$$\Theta = \Psi - \phi = 60,582 - 0 = 60,582.$$

Подовжня МРС реакції якоря:

$$F_{ad} = \chi_d \cdot k_a \cdot F'_a \cdot \sin\left(\psi \cdot \frac{\pi}{180}\right) = 0,94 \cdot 0,952 \cdot 2,642 \cdot \sin\left(60,582 \cdot \frac{3,14}{180}\right) = 2,059$$

Подовжня складова ЕРС, що наводиться в обмотці статора результирующим потоком у подовжній осі:

$$\begin{aligned} E_{\delta d} &= U'_2 \cdot \cos\left(\Theta \cdot \frac{\pi}{180}\right) + I'_2 \cdot x_\sigma \cdot \sin\left(\psi \cdot \frac{\pi}{180}\right) = \\ &= 1 \cdot \cos\left(60,582 \cdot \frac{3,14}{180}\right) + 1 \cdot 0,135 \cdot \sin\left(60,582 \cdot \frac{3,14}{180}\right) = 0,609. \end{aligned}$$

МРС по подовжній вісі, що необхідна для створення ЕРС  $E_{\delta d}$ :

$$F'_{\delta d} = \frac{F_{\delta zc}(E_{\delta d})}{F_\Sigma(\Phi'_1)} = \frac{820}{1497} = 0,548.$$

Результуюча МРС по подовжній вісі:

$$F_{pd} = F_{ad} + F'_{\delta d} = 2,059 + 0,548 = 2,607.$$

Магнітний потік розсіювання:

$$\Phi'_\sigma = \frac{1}{\Phi} \cdot \Phi_\sigma(F_{pd}); \quad \Phi'_\sigma = 0,467.$$

Результуючий магнітний потік:

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. Р02. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 103  |



$$\Phi'_{\text{пз}} = E_{\delta d} + \Phi'_{\sigma} = 0,609 + 0,467 = 1,067.$$

МРС, необхідна для створення штучного магнітного потоку:

$$F_{\text{мс}} = \frac{F_{\text{п}}(\Phi'_{\text{пз}})}{F_{\Sigma}(\Phi''_1)} = \frac{F_{32}(\Phi'_{\text{пз}}) + F_{\text{с2}}(\Phi'_{\text{пз}})}{F_{\Sigma}(\Phi''_1)} = \frac{11,4 + 74,268}{1497} = 0,057.$$

МРС збудження при навантаженні:

$$F'_{\text{ф}} = F_{\text{pd}} + F_{\text{мс}} = 2,607 + 0,057 = 2,664;$$

$$F_{\text{ф}} = F'_{\text{ф}} \cdot F_{\Sigma}(\Phi''_1) = 2,664 \cdot 1497 = 3987 \text{ А}.$$

## 2.7. Розрахунок обмотки збудження, параметрів обмоток та сталих часу.

Напівзакриті пази статора звичайно мають трапецеїдальну форму. Постійність магнітної індукції по висоті зубця зменшує МДС на ділянці зубця. Крім того, при напіввідкритих пазах коефіцієнт повітряного зазору і додаткові втрати менші, чим при відкритих пазах чи напіввідкритих.

Недолік напівзакритих трапецеїдальних пазів заключається в тому, що в них вкладають всипну обмотку із круглого проводу. Це знижує коефіцієнт заповнення паза і надійність обмотки.

Розміри трапецеїдальних пазів визначають в такій послідовності:

Більша ширина паза:

$$b_1 = \left[ \frac{\pi \cdot (D_1 + 2 \cdot h'_{n1})}{z_1} \right] - b'_{31} = \left[ \frac{\pi \cdot (0,273 + 2 \cdot 20)}{48} \right] - 14 = 6,486 \text{ мм}.$$

Менша ширина паза:

$$b_2 = \left[ \frac{\pi \cdot (D_1 + 2 \cdot h_{u1} - b_{u1}) - z_1 \cdot \pi}{z_1 - \pi} \right] = \left[ \frac{\pi \cdot (0,273 + 2 \cdot 20 - 4,025) - 48 \cdot 3,14}{48 - 3,14} \right] = 3,927 \text{ мм.}$$

Перевірка правильності визначення  $b_1$  та  $b_2$ :

$$z_1 \cdot (b_1 - b_2) + \pi \cdot (b_2 - b_{u1}) - 2 \cdot \pi \cdot (h'_{n1} - h_{u1}) = 48 \cdot (6,486 - 3,927) + 3,14 \cdot (3,927 - 4,025) - 2 \cdot 3,14 \cdot (20 - 0,5) \approx 0.$$

Площа поперечного перерізу паза в штампі:

$$S_{n1} = \frac{b_1 + b_2}{2} \cdot \left( h'_{n1} - h_{u1} - \frac{b_2 - b_{u1}}{2} \right) = \frac{6,486 + 3,927}{2} \cdot \left( 20 - 0,5 - \frac{3,927 - 4,025}{2} \right) = 101,779 \text{ мм}^2.$$

Площа поперечного перерізу паза в світлі:

$$S'_{n1} = \left( \frac{b_1 + b_2}{2} - b_c \right) \cdot \left( h'_{n1} - h_{u1} - \frac{b_2 - b_{u1}}{2} - h_c \right) = \left( \frac{6,486 + 3,927}{2} - 0,2 \right) \cdot \left( 20 - 0,5 - \frac{3,927 - 4,025}{2} - 0,2 \right) = 96,868 \text{ мм}^2.$$

Площа поперечного перерізу корпусної ізоляції:

$$S_{u1} = b_{u1} \cdot (2 \cdot h'_{n1} + b_1 + b_2) = 0,4 \cdot (2 \cdot 20 + 6,486 + 3,927) = 20,165 \text{ мм}^2.$$

Площа поперечного перерізу прокладок між верхньою та нижньою котушками в пазу, на дні паза і під клином:

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. Р02. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 105  |

$$S_{np1} = 0,5 \cdot b_1 + 0,75 \cdot b_2 = 0,5 \cdot 6,486 + 0,75 \cdot 3,927 = 6,188 \text{ мм}^2.$$

Площа поперечного перерізу, зайнятою обмоткою:

$$S''_{n1} = S'_{n1} - S_{u1} - S_{np1} = 96,868 - 20,165 - 6,188 = 70,514 \text{ мм}^2.$$

Знайдемо намагнічуючу силу однієї фази обмотки:

$$F_{\phi} = \frac{1}{2} \cdot F_{fH} = \frac{1}{2} \cdot 3,987 \cdot 10^3 = 1,994 \cdot 10^3 \text{ А.}$$

Після багаторазових перерахунків задаємось кількістю витків обмотки статора  $w_f=240$

Струм обмотки статора:

$$I_1 = \frac{F_{\phi}}{w_f} = \frac{1,994 \cdot 10^3}{240} = 8,307 \text{ А.}$$

Кількість ефективних провідників в пазу:

$$N_{n1} = \frac{w_f \cdot a_1}{p \cdot q_1} = \frac{240 \cdot 1}{2 \cdot 4} = 30.$$

Діаметр елементарного ізольованого проводу:

$$d' = \sqrt{k_{n1} \cdot \frac{S''_{n1}}{N_{n1} \cdot c_1}} = \sqrt{0,72 \cdot \frac{70,514}{30 \cdot 4}} = 0,65 \text{ мм},$$

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. Р02. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 106  |

де  $k_{n1}=0,72$  – коефіцієнт заповнення паза,  $c_1=4$  – кількість елементарних проводів в ефективному.

Вибираємо діаметр ізолюваного проводу  $d_1=0,645$  мм і відповідно площу  $S_1=0,273$  мм<sup>2</sup>.

Щільність струму в обмотці статора:

$$J_1 = \frac{I_1}{c_1 \cdot S_1 \cdot a_1} = \frac{8,307}{4 \cdot 0,273 \cdot 1} = 7,607 \text{ А/мм}^2.$$

Уточнена лінійна загрузка:

$$A_1 = \frac{10 \cdot N_n \cdot z_1 \cdot I_1}{\pi \cdot D_1 \cdot a_1} = \frac{10 \cdot 30 \cdot 48 \cdot 8,307}{3,14 \cdot 273 \cdot 1} = 139,477 \text{ А/см.}$$

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

$$A_1 \cdot J_1 = 139,477 \cdot 7,607 = 1,061 \cdot 10^3 \text{ А}^2/(\text{см} \cdot \text{мм}^2).$$

Допустиме значення задовольняє знайденому.

Середнє зубцеве ділення статора:

$$t_{cp1} = \frac{\pi \cdot (D_1 + h'_{n1})}{z_1} = \frac{3,14 \cdot (273 + 20)}{48} = 19,177 \text{ мм.}$$

Середня ширина котушки обмотки статора:

$$b_{cp1} = t_{cp1} \cdot y_{n1} = 19,177 \cdot 7 = 134,238 \text{ мм,}$$

Середня довжина однієї лобової частини котушки:

$$l_{л1} = (1,16 + 0,14 \cdot p) \cdot b_{cp1} + 15 = (1,16 + 0,14 \cdot 2) \cdot 134,238 + 15 = 208,302 \text{ мм.}$$

Середня довжина витка обмотки:

$$l_{cp1} = 2 \cdot (l'_1 + l_{л1}) = 2 \cdot (100 + 208,302) = 616,604 \text{ мм.}$$

Активний опір обмотки фази статора при 20° С:

$$r_1 = \frac{w_f \cdot l_{cp1}}{\rho_{м20} \cdot a_1 \cdot c_1 \cdot S_1 \cdot 10^3} = \frac{240 \cdot 616,604}{57 \cdot 1 \cdot 4 \cdot 0,273 \cdot 10^3} = 2,377 \text{ Ом,}$$

де  $\rho_{м20} = 57 \text{ См / мкм}$  питома електрична провідність міді при 20° С.

Номінальна напруга збудження:

$$U_1 = I_1 \cdot r_1 = 8,307 \cdot 2,377 = 19,75 \text{ В.}$$

Знаходимо опір обмотки статора для усталеного режиму.

Коефіцієнт насичення при  $E=0,5$

$$k_{нас1} = \frac{F_{\Sigma 0,5}}{F_{\delta 0,5} + F_{n0,5}} = \frac{690,691}{643,296 + 24,567} = 1,034.$$

Індуктивний опір поздовжньої реакції якоря:

$$x_{ad} = k_a \cdot \frac{F_a}{k_{нас1} \cdot F_{\delta 1,0}} = 0,952 \cdot \frac{3,952 \cdot 10^3}{1,034 \cdot 1,287 \cdot 10^3} = 2,828 \text{ в.о.}$$

Індуктивний опір поперечної реакції якоря:  $x_{aq} = x_{ad} = 2,828 \text{ в.о.}$

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. Р02. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 108  |

Синхронний індуктивний опір по подовжній осі:

$$x_d = x_{ad} + x_{\sigma} = 2,828 + 0,135 = 2,963 \text{ в.о.}$$

Синхронний індуктивний опір по поперечній осі:  $x_q = x_d = 2,963 \text{ в.о.}$

За виконанням обмотка збудження подібна до трифазної обмотки фазного ротора звичайного асинхронного двигуна, дві фази якої включені паралельно та виконують роль подовжньої обмотки, а третя фаза відсутня. Вважаючи укорочення шагу 60 електричних градусів, при обчислюванні індуктивного опору розсіювання з достатньою точністю можна використати методику розрахунку опорів фазного ротору асинхронних двигунів.

Укорочення шагу:  $\beta_2 = 0,8 \text{ в.о.}$

Коефіцієнт розподілення:

$$k_{p2} = \frac{0,5}{\frac{z_2}{2 \cdot p \cdot m} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot p \cdot m_1}{3 \cdot z_2}\right)} = \frac{0,5}{\frac{36}{2 \cdot 2 \cdot 3} \cdot \sin\left(\frac{3,14 \cdot 2 \cdot 3}{3 \cdot 36}\right)} = 0,96.$$

Коефіцієнт укорочення:

$$k_{y2} = \sin\left(\beta_2 \cdot \frac{\pi}{2}\right) = \sin\left(0,8 \cdot \frac{3,14}{2}\right) = 0,951.$$

Обмотковий коефіцієнт:

$$k_{o622} = k_{y2} \cdot k_{p2} = 0,951 \cdot 0,96 = 0,913.$$

Коефіцієнти, що враховують вкорочення шагу:

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. Р02. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 109  |

$$k_{\beta 2} = 0,4 + 0,6 \cdot \beta_2;$$

$$k_{\beta 2} = 0,4 + 0,6 \cdot 0,8 = 0,88;$$

$$k_{\beta' 2} = 0,2 + 0,8 \cdot \beta_2;$$

$$k_{\beta' 2} = 0,2 + 0,8 \cdot 0,8 = 0,84.$$

Необхідні розміри паза [3, с. 148]:

$$h_{к2} = 1 \text{ мм}; \quad h_2 = 0,6 \text{ мм}; \quad h_3 = 0,4 \text{ мм}; \quad h_4 = 0,4 \text{ мм};$$

$$h_{21} = h_{п2} - h_{к2} - h_2 - h_{ш2} - h_4 = 38,435 - 1 - 0,6 - 0,5 - 0,4 = 35,935 \text{ мм}.$$

Коефіцієнт провідності розсіювання паза:

$$\begin{aligned} \lambda_{п22} &= \frac{h_3}{4 \cdot b_{п2}} + \frac{(h_{21} - h_3) \cdot k_{\beta 2}}{3 \cdot b_{п2}} + \left( \frac{h_2}{b_{п2}} + \frac{3 \cdot h_{к2}}{b_{п2} + 2 \cdot b_{ш2}} + \frac{h_{ш2}}{b_{ш2}} \right) = \\ &= \frac{0,4}{4 \cdot 4,72} + \frac{(35,935 - 0,4) \cdot 0,88}{3 \cdot 4,72} + \left( \frac{0,6}{4,72} + \frac{3 \cdot 1}{4,72 + 2 \cdot 10,213} + \frac{0,5}{10,213} \right) = 2,515. \end{aligned}$$

Полюсне ділення:

$$\tau_2 = \frac{\pi \cdot D_{п2}}{2 \cdot p} = \frac{3,14 \cdot 270}{2 \cdot 2} = 212,058 \text{ мм}.$$

Коефіцієнт провідності розсіювання лобових частин обмотки:

$$\begin{aligned} \lambda_{л22} &= 0,34 \cdot \frac{q_2}{l_2} \cdot (l_{п2} - 0,64 \cdot \beta_2 \cdot \tau_2) = 0,34 \cdot \frac{3}{100} \cdot (154,366 - 0,64 \cdot 0,8 \cdot 212,058) = \\ &= 0,467. \end{aligned}$$

Коефіцієнт провідності розсіювання обмотки збудження:

$$\lambda_{\sigma 2} = \lambda_{л22} + \lambda_{п22} = 0,467 + 2,515 = 2,982.$$

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. Р02. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 110  |

Коефіцієнт розсіювання обмотки збудження з урахуванням приведення до обмотки статора:

$$\sigma_{22} = 1 + \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot F_{\delta 1,0} \cdot L_{f0} \cdot 10^{-3} \cdot \lambda_{\sigma 2}}{2 \cdot \Phi_{1,0} \cdot k_{\sigma 22} \cdot w_f} =$$

$$= 1 + \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 1287 \cdot 183100 \cdot 10^{-3} \cdot 2.982}{2 \cdot 0,011 \cdot 0,913 \cdot 240} = 1,187.$$

Індуктивний опір обмотки розсіювання у в. о.:

$$x_{f\sigma} = x_{ad} \cdot (\sigma_{22} - 1) = 2,828 \cdot (1,187 - 1) = 0.528.$$

Активний опір обмотки збудження, приведений до обмотки статора у відносних одиницях:

$$R'_{fd} = \frac{r_1 \cdot m_T \cdot I_{\phi}}{U_{\text{фаз.ов}}} \cdot \left( \frac{w_2 \cdot k_{\sigma 62}}{w_a \cdot k_{\sigma 22}} \right)^2 =$$

$$= \frac{2,377 \cdot 1,38 \cdot 104,701}{58,195} \cdot \left( \frac{62 \cdot 0,902}{240 \cdot 0,913} \right)^2 = 1,507,$$

де  $m_T=1,38$  – температурний коефіцієнт.

Постійна часу обмотки збудження при розімкненій обмотці статора:

$$T_{fd} = \frac{\sigma_{22} \cdot x_{f\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot R'_{fd} \cdot (\sigma_{22} - 1)} = \frac{1,187 \cdot 0,528}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 1,507 \cdot (1,187 - 1)} = 0,00709 \text{ с.}$$

Перехідний індуктивний опір статора по поздовжній осі:

$$x'_d = x_{\sigma} + \frac{x_{ad} \cdot x_{f\sigma}}{x_{ad} + x_{f\sigma}} = 0,135 + \frac{2,828 \cdot 0,528}{2,828 + 0,528} = 0,58.$$

Перехідний індуктивний опір статора по поперечній осі:



$$x'_q = x_\sigma + \frac{x_{aq} \cdot x_{f\sigma}}{x_{aq} + x_{f\sigma}} = 0,135 + \frac{2,828 \cdot 0,528}{2,828 + 0,528} = 0,58.$$

## 2.8. Масові показники.

Маса ізолюваних проводів обмотки статора:

$$m_{m1} = \left[ 7,55 + 1,35 \cdot \left( \frac{d'}{d} \right)^2 \right] \cdot z_1 \cdot \frac{N_n}{2} \cdot l_{cp1} \cdot c_1 \cdot S_1 \cdot 10^{-6} = \left[ 7,55 + 1,35 \cdot \left( \frac{0,645}{0,59} \right)^2 \right] \cdot 48 \cdot \frac{30}{2} \cdot 616,6 \cdot 4 \cdot 0,273 \cdot 10^{-6} = 4,442 \text{ кг},$$

де  $d = 0,59$  – номінальний діаметр неізолюваного дроту статора, мм, а  
 $d' = 0,645$  – діаметр ізолюваного дроту статора, мм;

Маса ізолюваних проводів обмотки ротора:

$$m_{m2} = \left[ 7,55 + 1,35 \cdot \left( \frac{d'}{d} \right)^2 \right] \cdot z_2 \cdot \frac{N_{n1}}{2} \cdot l_{cp2} \cdot c_2 \cdot S_2 \cdot 10^{-6} = \left[ 7,55 + 1,35 \cdot \left( \frac{0,805}{0,74} \right)^2 \right] \cdot 36 \cdot \frac{10,2}{2} \cdot 508,733 \cdot 30 \cdot 0,43 \cdot 10^{-6} = 11,001 \text{ кг},$$

де  $d = 0,74$  – номінальний діаметр неізолюваного дроту ротора, мм, а  
 $d' = 0,805$  – діаметр ізолюваного дроту ротора, мм;

Маса сталі сердечника ротора:

$$m_{c2} = 7,8 \cdot l'_2 \cdot k_c \cdot \left[ 0,785 \cdot (D_{n2}^2 - D_2^2) - z_2 \cdot S_{n2} \right] \cdot 10^{-6} = 7,8 \cdot 100 \cdot 0,97 \cdot \left[ 0,785 \cdot (270^2 - 120^2) - 36 \cdot 326,345 \right] \cdot 10^{-6} = 25,856 \text{ кг}.$$

Маса сталі сердечника статора:

$$m_{c1} = 7,8 \cdot l'_1 \cdot k_c \cdot \left[ 0,785 \cdot (D_{n1}^2 - D_1^2) - z_1 \cdot S_{n1} \right] \cdot 10^{-6} = 7,8 \cdot 100 \cdot 0,97 \cdot \left[ 0,785 \cdot (413^2 - 273^2) - 48 \cdot 101,779 \right] \cdot 10^{-6} = 53,345 \text{ кг}.$$

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 43013. КРБ. ПЗ. Р02. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 112  |

Сумарна маса сердечника статора й ротора:

$$m_{c\Sigma} = m_{c1} + m_{c2} = 53,345 + 25,856 = 79,201 \text{ кг.}$$

Маса ізоляції статора:

$$m_{u1} = 1,35 \cdot (l'_1 + 20) \cdot (2 \cdot h'_{n1} + 3 \cdot b_{n0,33}) \cdot b_{u1} \cdot z_1 \cdot 10^{-6} = 1,35 \cdot (100 + 20) \cdot (2 \cdot 20 + 3 \cdot 4,74) \cdot 0,4 \cdot 48 \cdot 10^{-6} = 0,169 \text{ кг.}$$

Маса ізоляції ротора:

$$m_{u2} = 1,35 \cdot z_2 \cdot \left[ (l'_2 + 20) \cdot (2 \cdot b_{u2} \cdot h'_{n2} + h'_{u2} \cdot b_{n2}) + l_{л2} \cdot \left( \frac{2 \cdot b_{uл2} \cdot h'_{n2} + h_{uл2} \cdot b_{n2}}{2} \right) \right] \cdot 10^{-6} = 1,35 \cdot 36 \cdot \left[ \frac{(100 + 20) \cdot (2 \cdot 0,4 \cdot 20 + 1,5 \cdot 4,74) + 154,366 \cdot (2 \cdot 0,8 \cdot 20 + 0,8 \cdot 4,74)}{2} \right] \cdot 10^{-6} = 0,283 \text{ кг,}$$

де  $2 \cdot b_{n2} = 2 \cdot b_{n2} = 0,4 \text{ мм}$  – двостороння товщина корпусної ізоляції,  
 $2 \cdot b_{uл2} = 0,4 \text{ мм}$  – двостороння товщина ізоляції по ширині в лобовій частині обмотки статора,  $h'_{n2} = 1,5 \text{ мм}$  – технологічні зазори на укладку обмотки і товщина всіх ізоляційних прокладок.

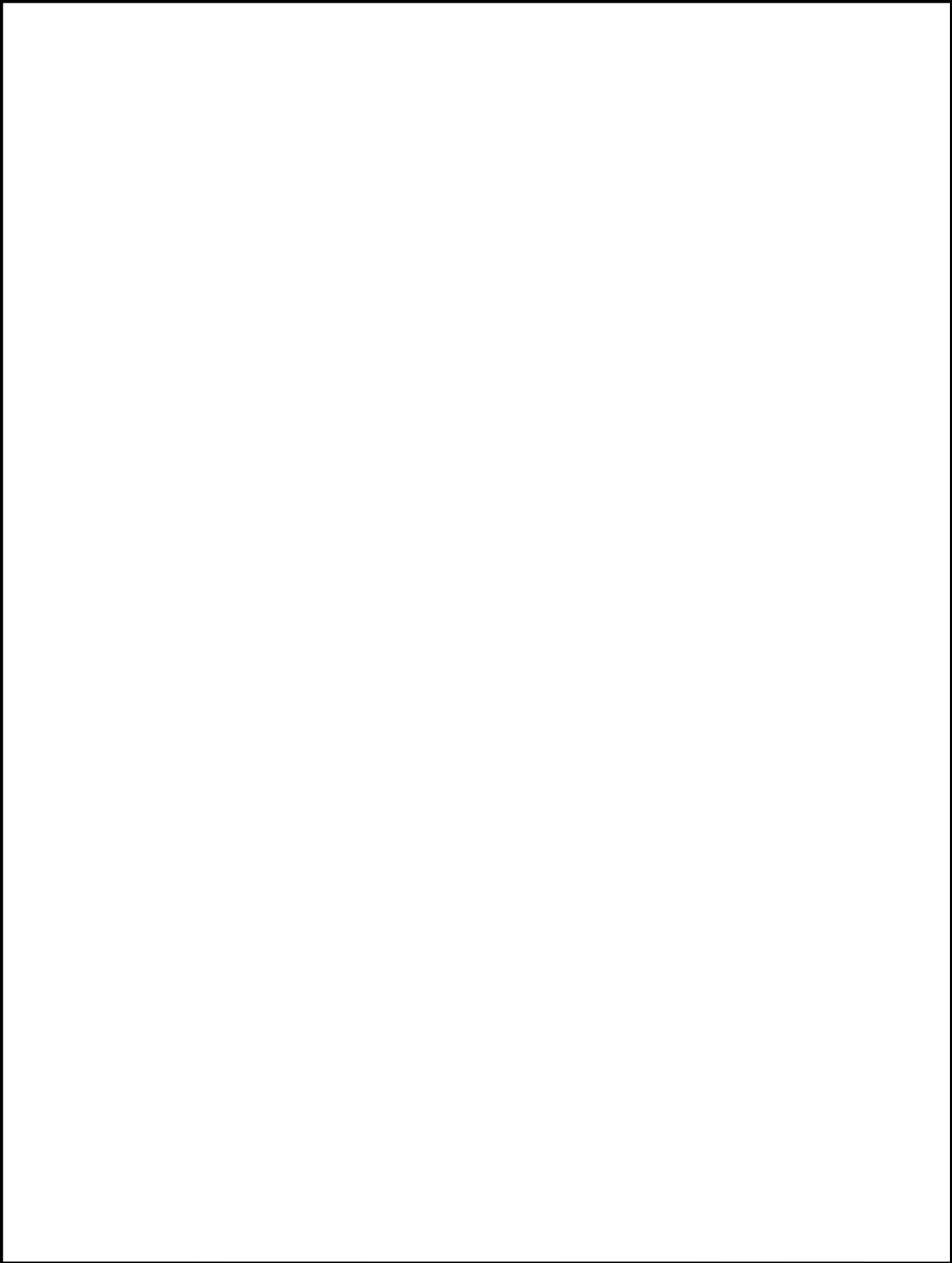
Маса конструкційних матеріалів:

$$m_k = 0,9 \cdot D_{n2}^2 \cdot l'_2 \cdot 10^{-6} + 12 \cdot D_{n2}^{1,6} \cdot 10^{-3} = 0,9 \cdot 270^2 \cdot 100 \cdot 10^{-6} + 12 \cdot 270^{1,6} \cdot 10^{-3} = 99,75 \text{ кг.}$$

Маса генератора з фазним ротором:

$$m_{\text{маш}} = m_{\text{м1}} + m_{\text{м2}} + m_{c\Sigma} + m_{u1} + m_{u2} + m_k = 4,442 + 11,001 + 79,201 + 0,283 + 99,75 = 194,846 \text{ кг.}$$

|       |      |          |        |      |                           |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. Р02. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 113  |



|           |                    |          |        |      |                                               |  |  |  |
|-----------|--------------------|----------|--------|------|-----------------------------------------------|--|--|--|
|           |                    |          |        |      | 141.4301з.КРБ.ПЗ.Р03                          |  |  |  |
|           |                    |          |        |      |                                               |  |  |  |
| Зм.       | Лист               | № докум. | Підпис | Дата | <div>Охорона праці</div> <div>ННІАЕ НУК</div> |  |  |  |
| Розроб.   | Юрескул Л.О.       |          |        |      |                                               |  |  |  |
| Керівник  | Новозарецький С.М. |          |        |      |                                               |  |  |  |
| Консульт. |                    |          |        |      |                                               |  |  |  |
| Н. контр. |                    |          |        |      |                                               |  |  |  |
| Зав. каф. | Обрубов А.В.       |          |        |      |                                               |  |  |  |

### Розділ 3. Охорона праці

#### Вступ

Метою управління охороною праці є забезпечення безпеки, збереження здоров'я та працездатності людини в процесі праці. Ця мета досягається виконанням відповідних функцій управління, тобто комплексом взаємопов'язаних видів, що здійснюються суб'єктом управління цілеспрямовано на об'єкт управління.

Об'єктом управління в системі управління охороною праці є діяльність функціональних служб і структурних підрозділів конкретних керівників та інженерно-технічних робітників підприємств із метою забезпечення безпечних, нешкідливих та сприятливих умов праці на робочих місцях, виробничих ланках, У цехах і на підприємстві в цілому.

Мета впровадження системи управління охороною праці (УОП) — це всебічне сприяння виконанню вимог, які повністю ліквідують, нейтралізують або знижують до допустимих норм вплив на працюючих небезпечних та шкідливих факторів виробничого середовища, забезпечують усунення джерел небезпеки, ізолювання від них персоналу, використання засобів, що усувають небезпечні ситуації та підвищують технічну безпеку, створюють надійні санітарно-гігієнічні та ергономічні умови. УОП передбачає встановлення конкретних кількісних показників діяльності виробничих підрозділів, підтримування котрих в заданих межах забезпечує досягнення основної мети щодо організації безпечних та нешкідливих умов праці.

Власник зобов'язаний створити в кожному структурному підрозділі і на робочому місці умови праці відповідно до вимог нормативних актів, а також забезпечити дотримання прав працівників, гарантованих законодавством про охорону праці.

|       |      |          |        |      |                          |      |
|-------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. Р03 | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                          | 115  |

З цією метою власник забезпечує функціонування системи управління охороною праці, для чого:

- створює відповідні служби і призначає посадових осіб, які забезпечують вирішення конкретних питань охорони праці, затверджує інструкції про їх обов'язки, права та відповідальність за виконання покладених на них функцій;
- забезпечує усунення причин, що призводять до нещасних випадків, професійних захворювань і виконання профілактичних заходів, визначених комісіями за підсумками розслідування цих причин;
- організовує проведення лабораторних досліджень умов праці, атестації робочих місць на відповідність нормативним актам про охорону праці в порядку і строки, що встановлюються законодавством, вживає за їх підсумками заходів щодо усунення небезпечних і шкідливих для здоров'я виробничих факторів;
- організовує пропаганду безпечних методів праці та співробітництво з працівниками в галузі, охорони праці.

У випадку відсутності в нормативних актах про охорону праці вимог, які необхідно виконати для забезпечення безпечних і нешкідливих умов праці на певних роботах, власник зобов'язаний вжити погоджених з органами державного нагляду заходів, що забезпечують безпеку працівників.

Небезпечним виробничим фактором називається такий вплив на працюючого, який в визначених умовах призводить до травми та іншого раптового погіршення здоров'я.

Результат впливу небезпечного виробничого фактору називається нещасним випадком. До таких належать: ураження електричним струмом, механічна травма внаслідок несправного обладнання і т.д. Вплив шкідливого виробничого фактору призводить до професійних захворювань або зниженню працездатності. До шкідливих факторів належать шуми, вібрації, шкідливі випромінювання, газу, пилю і т.д.

|       |      |          |        |      |                          |      |
|-------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. Р03 | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                          | 116  |

Організація роботи в галузі управління охороною праці полягає у виборі і формуванні такої структури управління охороною праці на виробництві, котра якнайкраще відповідає б основній меті — забезпеченню безпеки і здорових умов праці.

Метою управління охороною праці є керування і координація роботи підрозділів та відділів в галузі охорони праці, планомірний і цілеспрямований вплив на фактори та умови, що визначають безпеку, нешкідливість, ступінь важкості та напруженості праці на всіх етапах формування виробничого процесу. Управління охороною праці організовується на основі: щоденного контролю умов праці на робочих місцях; щомісячної оцінки рівня безпеки праці в об'єднанні, підприємстві, цеху, на ділянці; щомісячної оцінки рівня безпеки праці в структурних підрозділах галузі.

Велике значення у забезпеченні високого рівня охорони праці має пропаганда знань, передового досвіду, новітніх досягнень науки і техніки в цій галузі. Основними методами та формами такої пропаганди є лекції, бесіди та консультації, плакати і навчально-наочні посібники, тематичні виставки, конкурси, кінофільми, діафільми та ін.

### **3.1. Небезпечні та шкідливі виробничі фактори, які впливають 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 части-

ни 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:

а) Висока температура поверхонь дизель-генераторів. В виробничій обстановці працівники, знаходячись поблизу нагрітого металу, полум'я, гарячих поверхонь, піддаються дії тепла, що випромінюють ці джерела. Як наслідок підвищується температура шкіри та глибше лежачих тканин на ділянці що опромінюється.

б) Підвищений рівень статичної напруги.

в) Підвищений рівень шуму. 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.

г) Небезпека ураження електричним струмом. Проходячи через організм, електричний струм робить термічну, електролітичну і біологічну дію. Випадки

|       |      |          |        |      |                          |      |
|-------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. Р03 | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                          | 118  |

ураження людини струмом можливі 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.

д) Підвищений рівень вібрації. 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.

е) Електромагнітні випромінювання. 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

|       |      |          |        |      |                          |      |
|-------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. Р03 | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                          | 119  |



### 3.2 Розрахунок освітлення машинного відділення

Машинне відділення має такі габарити:

довжина  $A = 15$  м;

ширина  $B = 11$  м;

висота  $H = 4$  м.

Штучне освітлення – освітлення приміщень штучним світлом за допомогою електричних ламп – газорозрядних чи розжарювання. За конструктивним виконанням штучне освітлення може бути трьох систем – загальне, місцеве та комбіноване. В даному випадку використовується загальне освітлення.

В якості світильників вибираємо судові світильники типу 15А з трьома люмінесцентними лампами типу ЛБ-15 потужністю 15 Вт кожна з робочою напругою 127 В. Світильник має опаловий ковпак, лампа має світловий потік  $\Phi_{\text{л}} = 780$  лм. Світильник має водозахисне виконання і є світильником прямого світла.

Норма освітлення в машинному відділенні (загального) на рівні  $h_p = 1$  м від настилу при загальному освітленні лампами розжарювання  $E_{\text{min}} = 75$

Відстань від стелі до робочої поверхні:

$$H_0 = H - h_p = 4 - 1 = 3 \text{ м};$$

Відстань від стелі до світильника:

$$h_c = (0.2 \div 0.25) \cdot H_0 = 0.2 \cdot 3 = 0.6 \text{ м};$$

Висота підвішування світильника над освітлюваною поверхнею:

$$h = H_0 - h_c = 3 - 0.6 = 2.4 \text{ м};$$

Висота підвішування світильника над підлогою:

$$H_n = h + h_p = 2.4 + 1 = 3.4 \text{ м};$$

Індекс приміщення:

$$i = \frac{A \cdot B}{h_0 \cdot (A + B)} = \frac{15 \cdot 11}{4 \cdot (15 + 11)} = 1.59;$$

Даному індексу відповідає коефіцієнт використання світильника  $\eta = 50\%$

Знайдемо площу машинного відділення:

$$S = A \cdot B = 15 \cdot 11 = 165 \text{ м}^2;$$

Так як висота світильника більш 2,5м, то коефіцієнт запасу при використанні люмінесцентних ламп для приміщень з малим виділенням пилу, диму та копоти  $k_{\text{зап}} = 1,3$ . Коефіцієнт нерівномірності освітлення для ламп  $z = 1,1$ . Кількість ламп у світильнику  $n = 3$ .

Далі визначимо необхідну кількість світильників:

$$N = \frac{E_{\text{min}} \cdot S \cdot k_z \cdot z}{n \cdot \Phi_{\text{л}} \cdot \eta} = \frac{75 \cdot 165 \cdot 1,3 \cdot 1,1}{3 \cdot 780 \cdot 0,5} \approx 15 \text{ штук}$$

Розташувати світильники необхідно таким чином щоб у кожній точці приміщення було приблизно однакове освітлення. На рисунку 5.1 представлена схема розташування світильників, кількість яких дорівнює 15 (3 ряди по 5 штук). Розміри на малюнку  $L_1 = 4,5 \text{ м}$ ;  $L_2 = 4 \text{ м}$ ;  $L_3 = 1,34 \text{ м}$ ;  $L_4 = 1,5 \text{ м}$ . Зобразимо схематично

|       |      |          |        |      |                          |      |
|-------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. Р03 | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                          | 121  |

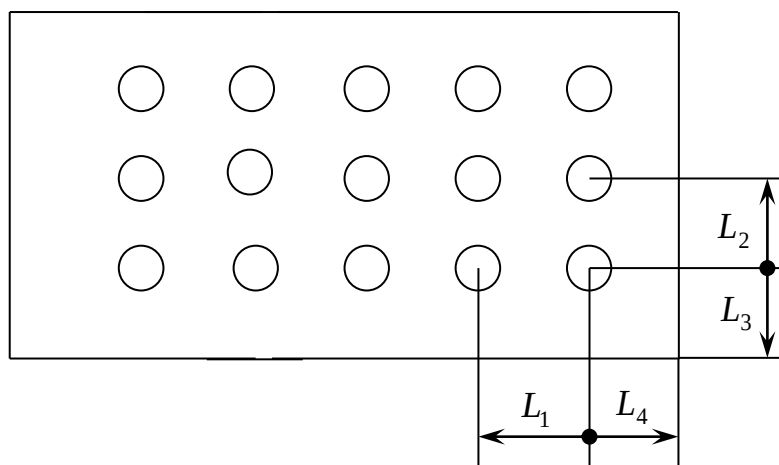


Рис.5.1 Розташування світильників в машинному відділенні.

### 3.3 Заходи щодо 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 механізмів, які наприклад не надійно закріплені і т. д. Щоб цього не відбулося потрібно дотримуватися заходів наведених нижче:

- Струмоведучі частини судового обладнання, що є джерелами небезпеки, мають бути надійно ізольовані або знаходитися в недоступних для людей місцях, а електрообладнання, що має відкриті струмоведучі частини, має бути розміщене всередині блоків із дверима, що закриваються, або закриті захисними кожухами при розміщенні в доступних для людей місцях;

- Надійне закріплення обладнання.

- Металеві частини судового обладнання, які внаслідок пошкодження ізоляції можуть опинитися під електричною напругою небезпечної величини, повинні бути заземлені;

- Проведення своєчасних оглядів і ремонтів обладнання;

- У схемі електричного ланцюга необхідно передбачати пристрій централізованого відключення від мережі живлення всього електричного ланцюга;

- Вентиляція і фільтрація повітря приміщень, так як існують приміщення в яких підвищена ступінь забруднення повітря (пил, газ), наприклад, в машинному відділенні;

- Раціональне освітлення судових приміщень, його завданням полягає полягає перш за все в створенні на робочих місцях рівня освітленості, відповідно нормам; необхідно забезпечити правильне розміщення джерел світла, а також не допускати надмірної яскравості;

- Обладнання місць психологічного відпочинку членів команди;

- Застосовування звукоізоляційних кожухів, екранів, кабін для зменшення рівня шуму, амортизуючи пристроїв;

- Проведення своєчасних оглядів і ремонтів обладнання

|       |      |          |        |      |                          |      |
|-------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. Р03 | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                          | 123  |

## Висновки.

В результаті дипломного проектування розрахований явнополюсний безконтактний синхронний генератор потужністю 250 кВт та синхронний збудник до нього потужністю 18,3 кВт, коефіцієнтом корисної дії 0,96 та 0,95 відповідно та масою 1243 кг.

Безконтактні синхронні генератори мають вищу безвідмовність і більший термін служби, ніж машини з щітково-контактними вузлами. Окрім цього, важливою перевагою всіх безконтактних синхронних машин є те, що вони можуть працювати у вибухонебезпечному і хімічно активному середовищі, тому вимоги до умов експлуатації істотно спрощуються. Всі названі обставини мають велике значення при рішенні питань вибору типу суднового генератора.

Безконтактні синхронні генератори із збудником змінного струму і випрямлячами, що обертаються, найбільш придатні для застосування їх у якості загальносуднових джерел електроенергії нормальної і підвищеної частоти (до 400 Гц) в діапазоні потужностей від декількох десятків кіловат до декількох мегават і частотах обертання від декількох сотень оборотів в хвилину до 12 000 об/хв.

Розроблений безконтактний синхронний генератор має прийнятні маса-габаритні показники. Впровадження його в суднову електростанцію дозволить підвищити надійність судової електроенергетичної системи в цілому.

|       |      |          |        |      |                      |      |
|-------|------|----------|--------|------|----------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                      | 124  |

## Література

1. Осін І.Л., Шакарян Ю.Г. Електричні машини: Синхронні машини: Учебний посібник для вузів по спец. "Електромеханіка".– М.: Вища школа, 1990.
2. Гольдберг О.Д., Гурин Я.С., Свириденко І.С. Проектування електричних машин. : Підручник для вузів – М.: Вища школа, 2001.
3. Ахматов М.Г. Синхронні машини. Спеціальний курс: Учебний посібник для вузів по спец. "Електричні машини".– М.: Вища школа, 1984.
4. Іванов-Смоленський А.В. Електричні машини.: Підручник для вузів – М.: Енергія, 1980.
5. Вольдек А.І. Електричні машини. Підручник для вузів.– Л.: Енергія, 1974.– 840 с.
6. Подимака В.І. Проектування автоматичних судових електроенергетичних систем. –Миколаїв: МКІ, 1980.
7. Краснов В.В., Мещанінов П.А. "Основи теорії розрахунків СЕЕС" – Л. Суднобудування, 1989.
8. Китаєнко Г.І. Довідник судового електротехніка Т.1 Судові електроенергетичні системи та пристрої. Ленінград, Суднобудування, 1980.
9. Мещанінов П.А., Подимака В.І. "Суднові електроенергетичні системи": Навчальний посібник. – Миколаїв: НКІ, 1989.
10. Сухарєв Е.М. "Суднові електричні станції, сіті, та їх експлуатація": Підручник: – Л.: Суднобудування, 1986.
11. Коваленко В.П. Автоматичне регулювання збудження та стійкість судових синхронних генераторів. – Л., "Судостроение", 1976.
12. Фомін П.А. "Основи техніки безпеки в електроустановках": Навчальний посібник. –М.: Енергоіздат.
13. Волошин В.А. "Охорона морського середовища": Навчальний посібник. – Л.: Суднобудування, 1987.

|       |      |          |        |      |                      |      |
|-------|------|----------|--------|------|----------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. КРБ. ПЗ. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                      | 125  |