

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ**  
**ім. адмірала Макарова**

**Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки**

**Кафедра Суднових електроенергетичних систем**

«Допущений до захисту»

в.о. зав. кафедри СЕЕС

 Обрубов А.В.

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»**

на тему РОЗРОБКА СИНХРОННОГО  
ЗБУДНИКА

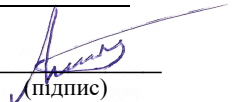
Виконав: здобувач вищої освіти  
IV курсу, групи 4301з  
спеціальності 141 – Електроенергетика,  
(шифр і назва спеціальності)

електротехніка та електромеханіка

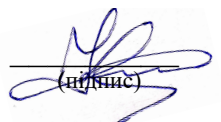
освітньої програми Електромеханіка та  
(назва ОП)

електроенергетика

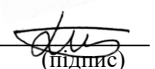
Лісіцин К.О.  
(прізвище та ініціали)

  
(підпис)

Керівник Кімстач О.Ю.  
(прізвище та ініціали)

  
(підпис)

Рецензент Білюк І.С.  
(прізвище та ініціали)

  
(підпис)

Миколаїв – 2026 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки

Кафедра Суднових електроенергетичних систем

спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(шифр і назва спеціальності)

освітньої програми Електромеханіка та електроенергетика  
(назва ОП)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Гарант освітньої програми

 Волянська Я.Б.

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 р.

**ЗАВДАННЯ**  
**на кваліфікаційну роботу**  
**на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»**

Здобувачу вищої освіти Лісіцину Костянтину Олександровичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка синхронного збудника

Керівник роботи Кімстач Олег Юрійович, к.т.н., доц.  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом НУК від «22» квітня 2026 р. № 286-УЧ

2. Термін подання роботи «10» червня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи Розробити синхронний збудник, якій має наступні данні напруга 50 В, кількість фаз 3, номінальна потужність 1 кВА і синхронна частота обертання 1500 об/хв.

4. Перелік питань, що належать до розробки (найменування розділів)  
Огляд і аналіз СГ; синтез синхронного збудника; розрахунок його характеристик; розгляд питань охорони праці

5. Перелік презентаційних матеріалів

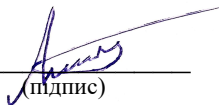
1. Конструкція збудника; 2. Схема обмотки якоря;  
3, 4. Характеристики збудника.

6. Дата видачі завдання «17» лютого 2026 р.

### **КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

| № з/п | Назва етапу роботи                                | Строк виконання | Примітка |
|-------|---------------------------------------------------|-----------------|----------|
| 1.    | Виконання огляду і аналізу СГ і систем збудження. | 15.03.2026      | Виконано |
| 2.    | Розробка синхронного збудника.                    | 01.04.2026      | Виконано |
| 3.    | Розрахунок характеристик синхронного збудника.    | 15.04.2026      | Виконано |
| 4.    | Виконання розділу з охорони праці.                | 01.05.2026      | Виконано |
| 5.    | Оформлення розрахунково-пояснювальної записки.    | 15.05.2026      | Виконано |
| 6.    | Оформлення графічної частини.                     | 10.06.2026      | Виконано |

Здобувач вищої освіти

  
(підпис)

Лісіцин К.О.  
(прізвище та ініціали)

Керівник

  
(підпис)

Кімстач О.Ю.  
(прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

У бакалаврській роботі виконано розробку синхронного збудника (СЗ), котрий являється частиною суднової дизель-генераторної установки аварійної електростанції.

Виконано огляд і аналіз типів суднових синхронних генераторів (СГ), систем автоматичного регулювання збудження та захисту.

Розрахункова частина містить: розрахунок збудника і його характеристик. Крім того, виконано розгляд питань охорони праці.

**Ключові слова:** автоматичний регулятор збудження, збудник, обмотка, синхронний генератор, характеристика.

## SUMMARY

In the bachelor's thesis, the development of a synchronous exciter (SE), which is part of a ship's diesel-generator of an emergency power plant, was carried out.

A review and analysis of types of ship's synchronous generators (SG), automatic excitation control and protection systems were carried out.

The calculation part contains: calculation of the exciter and its characteristics. In addition, consideration of labour protection issues was carried out.

**Keywords:** automatic excitation regulator, exciter, winding, synchronous generator, characteristic.

|       |       |          |        |      |                     |      |
|-------|-------|----------|--------|------|---------------------|------|
|       |       |          |        |      | 141. 4301з. БР. ПЗ. | Лист |
| Змін. | Лист. | № докум. | Підпис | Дата |                     | 4    |

## ЗМІСТ

|                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>ВСТУП</i> .....                                                            | 6  |
| <i>РОЗДІЛ 1. Огляд систем збудження синхронних генераторів.</i> .....         | 9  |
| 1.1. Системи збудження СГ .....                                               | 10 |
| 1.2. Елементи пристроїв захисту СГ .....                                      | 16 |
| 1.3. Синхронні збудники.....                                                  | 17 |
| <i>РОЗДІЛ 2. Розрахунок синхронного збудника.</i> .....                       | 20 |
| 2.1. Розробка і обґрунтування конструктивної схеми синхронного збудника ..... | 21 |
| 2.2. Розрахунок синхронного збудника.....                                     | 22 |
| <i>РОЗДІЛ 3. Розрахунок характеристик синхронного збудника</i> .....          | 38 |
| <i>РОЗДІЛ 4. Охорона праці.</i> .....                                         | 45 |
| Вступ .....                                                                   | 46 |
| 4.1. Основні причини електротравматизму .....                                 | 48 |
| 4.2. Електробезпека встановлення електроустановок .....                       | 49 |
| 4.3. Електрозахисні засоби .....                                              | 51 |
| 4.4. Перша допомога потерпілим від електричного струму .....                  | 53 |
| 4.5. Безпека при експлуатації синхронних машин .....                          | 54 |
| ВИСНОВКИ .....                                                                | 58 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....                                           | 59 |

|                |              |          |                                                                                     |      |                        |      |        |
|----------------|--------------|----------|-------------------------------------------------------------------------------------|------|------------------------|------|--------|
|                |              |          |                                                                                     |      | 141. 4301з. БР. ПЗ. В. |      |        |
|                |              |          |                                                                                     |      |                        |      |        |
| Зм.            | Лист         | № докум. | Підпис                                                                              | Дата |                        |      |        |
| Розроб.        | Лісіцин К.О. |          |  |      | ВСТУП                  |      |        |
| Керівник       | Кімстач О.Ю. |          |  |      |                        |      |        |
|                |              |          |                                                                                     |      |                        |      |        |
| Н. контр.      |              |          |                                                                                     |      |                        |      |        |
| В.о. зав. каф. | Обрубов А.В. |          |  |      |                        |      |        |
|                |              |          |                                                                                     |      | Лім.                   | Лист | Листів |
|                |              |          |                                                                                     |      |                        | 6    | 3      |
|                |              |          |                                                                                     |      | НУК                    |      |        |

## ВСТУП

Як джерела електроенергії на судах використовуються генератори постійного і змінного струму, що мають привод від турбін або дизелів, а також акумуляторні батареї. Частіше в якості приводного двигуна суднових електростанцій застосовується дизель, особливо для генераторів потужністю менше 1000 кВт.

Електророзподільний щит, до якого підключені основні джерела електроенергії і суднова силова електрична мережа, називається *головним розподільним щитом* (ГРЩ).

Електророзподільний щит, до якого підключено аварійне джерело електроенергії й аварійна мережа, називається *аварійним розподільним щитом* (АРЩ) [6]. Сукупність аварійного джерела електроенергії з аварійним розподільним щитом прийнято називати *аварійною судною електростанцією*.

Основна електростанція (ОЕ) призначена для забезпечення судна електроенергією у всіх нормальних експлуатаційних режимах роботи.

Аварійна електростанція (АЕ) забезпечує судно електроенергією в аварійних режимах роботи (наприклад, при затопленні основної електростанції).

Відповідно до вимог Регістра, аварійна електростанція розміщається в приміщенні, що знаходиться поза зоною затоплення судна (на головній палубі або вище). Основна електростанція звичайно знаходиться в районі машинного відділення судна [6].

Електрична енергія є продукцією, що виробляється і розподіляється СЕЕС по приймачах. У зв'язку з цим *якість електричної енергії* визначається сукупністю властивостей, що обумовлюють придатність її для використання приймачами. Дані властивості вважаються *ідеальними* при наступних умовах: на затисках приймачів електроенергії напруга і частота дорівнюють номінальним значенням; форма кривої напруги перемінного струму являє собою синусоїду, період якого відповідає номінальній частоті; напруга постійного струму є незмінним у часі; напруги трифазного змінного струму симетричні.

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

Відповідно до Правил Регістра, тривале відхилення напруги на затисках приладів освітлення повинне бути не більш  $\pm 5\%$ , на затисках електродвигунів і інших приймачів електроенергії  $\pm 10\%$ . Короткочасне зниження напруги повинне бути не більш  $30\%$ . Тривале зниження частоти не більш  $5\%$ , короткочасне не більш  $10\%$ . Асиметрія напруг залежить від нерівномірності розподілу навантаження по окремих фазах трифазної системи. Ця нерівномірність повинна бути в межах  $\pm 15\%$  [6].

Коефіцієнт перекручування форми кривій напруги повинний бути не більш  $10\%$  (це визначається як відношення суми амплітуд вищих гармонік до амплітуди першої – основної гармоніки у відсотках). Значення інших коефіцієнтів регламентуються конкретними особливостями системи і приймачів електроенергії.

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

|                |      |              |                                                                                     |      |                                                  |      |      |
|----------------|------|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------|--------------------------------------------------|------|------|
|                |      |              |                                                                                     |      | 141. 4301з. БР. ПЗ. Р1.                          |      |      |
|                |      |              |                                                                                     |      |                                                  |      |      |
| Зм.            | Лист | № докум.     | Підпис                                                                              | Дата |                                                  |      |      |
| Розроб.        |      | Лісіцин К.О. |  |      | ОГЛЯД СИСТЕМ ЗБУДЖЕННЯ<br>СИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ | Лім. | Лист |
| Керівник       |      | Кімстач О.Ю. |  |      |                                                  |      | 9    |
|                |      |              |                                                                                     |      |                                                  |      | 11   |
| Н. контр.      |      |              |                                                                                     |      |                                                  | НУК  |      |
| В.о. зав. каф. |      | Обрубов А.В. |  |      |                                                  |      |      |

# РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД СИСТЕМ ЗБУДЖЕННЯ СИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ

## 1.1. Системи збудження СГ

Система збудження призначена для живлення обмотки збудження синхронної машини постійним струмом і відповідного регулювання струму збудження.

Систему збудження прийнято характеризувати номінальною напругою збудження  $U_{\text{фном}}$  на виводах обмотки збудження і номінальним струмом  $I_{\text{фном}}$  в обмотці збудження, які відповідають номінальному режиму роботи електричної машини; номінальною потужністю збудження, що звичайно становить 0,2...0,6 % номінальної потужності машини; здатністю форсування (кратністю форсування); швидкодією, системи збудження під час аварій в енергосистемі та швидкістю разбудження генератора у випадках його ушкоджень.

Вибір номінальної напруги збудження визначається: потужністю збудження; граничними струмами, які можуть бути пропущені через контактні кільця і щітки; граничними напругами, при яких збудники працюють надійно, і т.д. Номінальна напруга збудження сучасних генераторів становить 80...600 В. Нижня межа характерна для генераторів малої потужності, верхня – для генераторів великої потужності. Номінальний струм збудження також залежить від потужності генератора. Для генераторів невеликої потужності він становить до сотень ампер, а для генераторів потужністю більше 200 МВт досягає 2000...8000 А.

Під здатністю форсування по напрузі розуміють відношення найбільшої сталої напруги  $U_f$  збудника (приєднаного до обмотки збудження генератора) до номінальної напруги збудника  $U_{\text{фном}}$ , а під здатністю форсування по струму розуміють відношення граничного струму збудження  $I_f$ , що забезпечується збудником у режимі форсування, до номінального струму збудження  $I_{\text{фном}}$ .

До системи збудження синхронних машин пред'являються високі вимоги. Вона повинна забезпечувати: надійне живлення обмотки збудження у нор-

мальних і аварійних режимах; стійке регулювання струму збудження при зміні навантаження генератора від нуля до номінального; максимальне збудження протягом певного часу, необхідного для відновлення режиму після ліквідації аварії. Крім того, вона повинна бути досить швидкодіючою та мати кратність форсування по напрузі не менш 2,0 (часто її збільшують до 3...4 і більше).

Кратність форсування по напрузі та відповідно гранична напруга збудника обмежуються напругою пробою ізоляції обмотки ротора. Граничний струм збудження та тривалість роботи з таким струмом обмежуються припустимим нагріванням ротора та залежать від типу системи охолодження.

Номінальна швидкість наростання напруги збудження повинна бути не менш  $2 \text{ с}^{-1}$ , а для генераторів, до яких пред'являються підвищені вимоги відносно стійкості, вона може бути значно вище (більше  $7...9 \text{ с}^{-1}$ ).

Залежно від джерела енергії, який використовується для збудження синхронної машини, всі системи збудження можна підрозділити на дві основні групи:

1) системи збудження, у яких джерелом енергії є генератор змінного струму (збудник). Змінний струм цього генератора перетворюється в постійний струм за допомогою напівпровідникових керованих або некерованих випрямлячів;

2) системи збудження, у яких використовується енергія самої збудженої машини (самозбудження). Ця енергія перетворюється за допомогою спеціальних трансформаторів і напівпровідникових випрямлячів.

Системи збудження першої групи є незалежною, а друга – залежною від напруги збудженої машини.

**Система збудження зі збудником підвищеної частоти та нерухливими напівпровідниковими випрямлячами.** Цю систему звичайно називають «високочастотною», тому що для зменшення розмірів збудника та магнітних підсилювачів системи регулювання збудник змінного струму виконують високочастотним (звичайно 500 Гц). Високочастотна система (рис. 1.1) була вста-

новлена на деяких турбогенераторах потужністю 160...320 МВт.

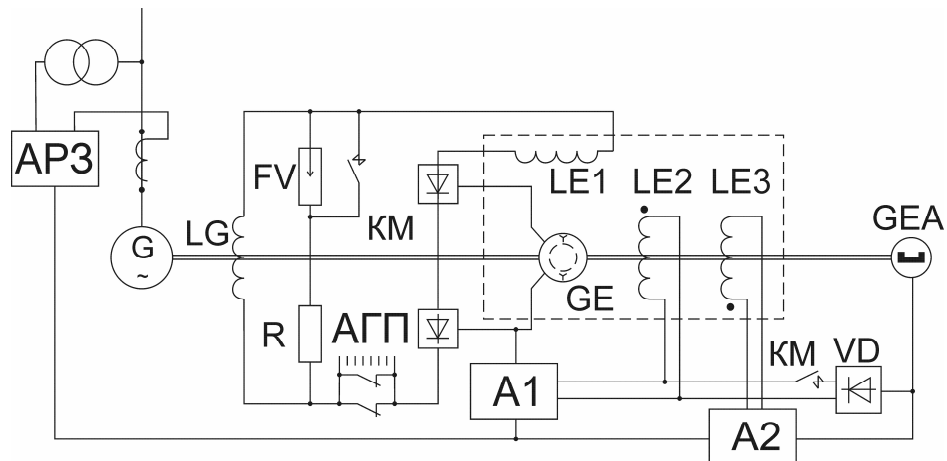


Рис. 1.1. Високочастотна система збудження:

*FV* – розрядник; *R* – розрядний резистор; *АГП* – автомат гасіння поля;

*KM* – контакти контактора; *LG* – обмотка збудження генератора;

*LE* – обмотка збудження збудника; *GEA* – підзбудник; *A* – магнітний підсилювач

По своїй швидкодії вона еквівалентна електромашинній системі збудження. Тому надалі передбачається заміна цієї системи більше швидкодіючими системами.

**Система збудження зі збудником 50 Гц і статичними випрямлячами (статична тиристорна система незалежного збудження).** У цій системі збудження (рис. 1.2) група статичних випрямлячів перетворює змінний струм збудника *GE* із частотою 50 Гц у постійний.

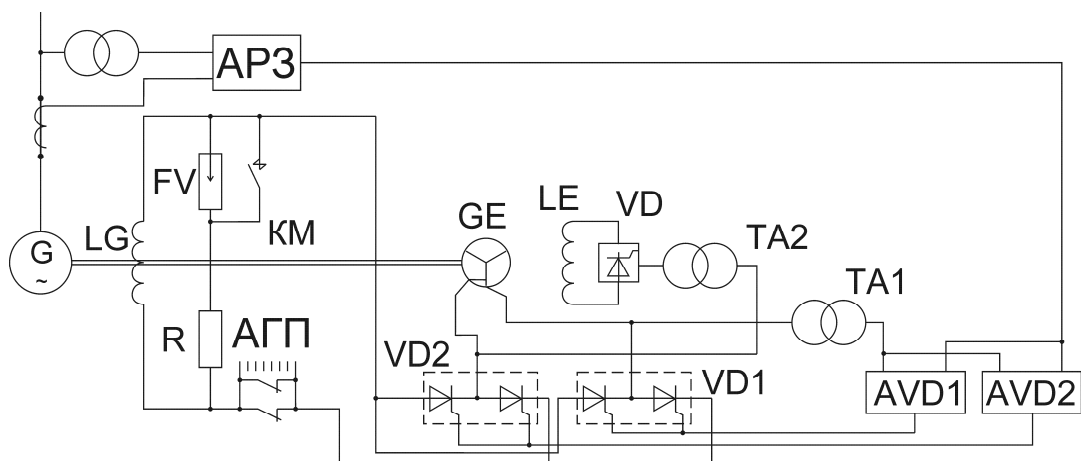


Рис. 1.2. Статична тиристорна система незалежного збудження:

*TA1* – трансформатор, що живить системи керування вентилями робочої групи *AVD2* і форсировочної групи *AVD1*;

*TA2* – трансформатор самозбудження збудника;

*VD* – вентилі системи збудження збудника

Збудником є синхронний генератор, розташований на одному валу зі

збудженим генератором (незалежне збудження). Статична випрямна установка складається з керованих напівпровідникових кремнієвих випрямлячів – тиристорів.

Якщо необхідні невеликі максимуми збудження (порядку  $2U_{fном}$ ), можливе застосування однієї групи тиристорів. У системах збудження з високими максимумами збудження (більше  $2U_{fном}$ ) і одною групою тиристорів після комутації струму з одного вентиля на іншій виникає великий стрибок напруги на погаслому тиристорі. Це збільшує ймовірність пробоя тиристорів, перекидає форму кривій випрямленої напруги та створює перенапруги в обмотці ротора. Тому при високих максимумах збудження звичайно застосовують дві групи тиристорів – робочу  $VD2$  і форсування  $VD1$ . Обидві групи з'єднують паралельно по трифазній мостовій схемі. За рахунок комутації тиристора однієї групи на тиристор іншої групи зворотна напруга тиристорів робочої групи зменшується. Робоча група тиристорів забезпечує основне збудження генератора в нормальному режимі, група форсування – форсування та гасіння поля генератора в аварійних режимах, тому в нормальному режимі вона працює з невеликими струмами (20...30 % номінального струму ротора); при форсуванні група форсування (повністю або частково) відкривається та забезпечує весь струм форсування, а робоча група тиристорів захищається більш високою напругою групи форсування.

Для живлення двох груп тиристорів обмотку кожної фази збудника виконують із двох частин: частини низької напруги, перетин провідників якої розраховано на тривале проходження робочого струму, і частини високої напруги, перетин провідників якої розраховано на короткочасне проходження струму форсування.

Незалежна система збудження зі збудником змінного струму та статичних перетворювачів має високу швидкодію ( $\nu \approx 50 \text{ с}^{-1}$ ), тому що вона має високі максимуми збудження (до  $4U_{fном}$ ) і, внаслідок безінерційності тиристорів, малі постійні часу ( $T < 0,02 \text{ с}$ ). Крім того, система дозволяє робити заміну ти-

ристорів, що вийшли з ладу, без зупинки генератора та здійснювати гасіння поля генератора шляхом переведення тиристорів в інверторний режим.

**Система збудження зі збудником 50 Гц і обертовими випрямлячами (безщіткова система).** В цій системі (рис. 1.3) як збудник *GE* використовується синхронний генератор частотою 50 Гц особливої конструкції: його обмотка збудження *LE* розташована на нерухливому статорі, а трифазна обмотка змінного струму – на обертовому роторі. Обмотка *LE* одержує живлення через випрямлячі *VDE* від підзбудника *GEA* індукторного типу з постійними магнітами.

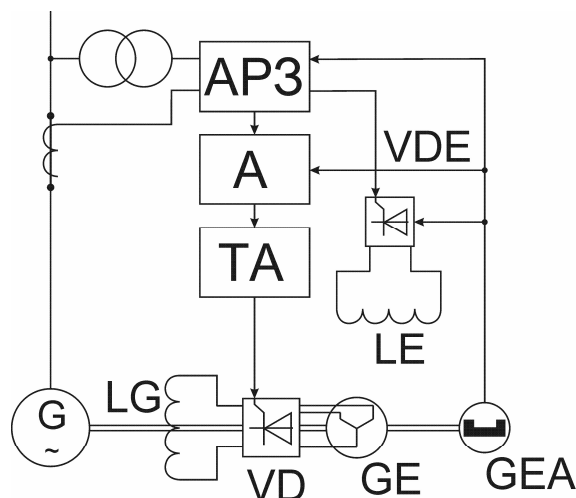


Рис. 1.3. Безщіткова система збудження:

*LG* – обмотка збудження генератора; *LE* – обмотка збудження збудника;  
*GE* – збудник; *GEA* – підзбудник.

Змінний струм трифазної обмотки якоря збудника випрямлюється за допомогою обертових з тією же частотою обертання випрямлячів, у якості яких використовують некеровані напівпровідникові (кремнієві) випрямлячі – діоди та керовані – тиристори. Кількість тиристорів обрана з таким розрахунком, щоб при виході з роботи частини їх (близько 20 %) залишені в роботі могли забезпечити збудження в режимі форсування. Оскільки обмотка змінного струму збудника, тиристори та обмотка збудження генератора обертаються з одною частотою обертання то їх можна з'єднати між собою твердим струмопроводом без застосування контактних кілець і щіток. Регулювання струму збудження збудженої машини здійснюється від AP3 шляхом впливу на тири-

тори через імпульсний пристрій *A* і обертовий трансформатор *TA*.

Перевагою безщіткової системи збудження є відсутність колекторів, контактних кілець і щіток, завдяки чому значно підвищується надійність її роботи та полегшується експлуатація. Недоліком цієї системи збудження є необхідність зупинки машини для підключення резервного збудження та заміни випрямлячів, що вийшли з ладу, і перегорілих запобіжників.

Безщіткова система використовується для збудження синхронних компенсаторів потужністю до 50 МВА та турбогенераторів потужністю до 800 МВт і більше.

*Системи самозбудження зі статичними випрямлячами.* Ці системи є швидкодіючими. На рис. 1.4 показана одна з таких систем – статична тиристорна система самозбудження. В останній використані тиристори, на які подається напруга від статора генератора через спеціальний випрямний трансформатор *TA1*, підключений до виводів обмотки статора, і послідовний трансформатор *TA2*, первинна обмотка якого включена послідовно в коло статора з боку нульових виводів генератора. Застосовуються також схеми тільки з випрямним трансформатором.

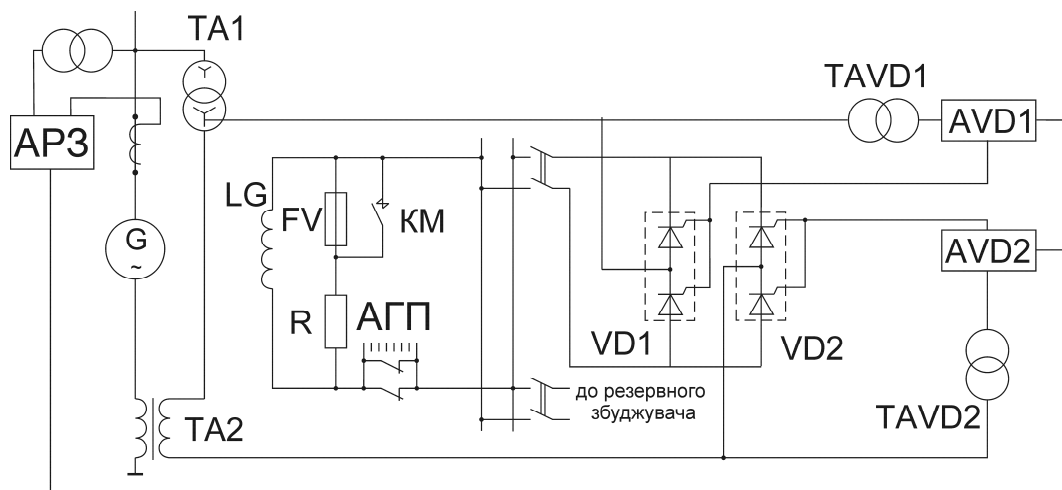


Рис. 1.4. Статична тиристорна система збудження

Випрямна установка складається із двох груп тиристорів: робочої групи *VD1*, що забезпечує основне збудження в нормальному режимі, і групи форсування *VD2*, що забезпечує збудження синхронної машини при форсуванні. Ро-

бочі тиристори підключені до низьковольтної частини обмотки випрямного трансформатора, а тиристори форсування – через послідовний трансформатор – до високовольтної частини обмотки випрямного трансформатора.

Керування тиристорами здійснюється від систем керування *AVD1* і *AVD2* через трансформатори власних потреб *TAVD1* і *TAVD2*. Початкове збудження генератор одержує від резервного збудника.

Достоїнством схеми тільки з випрямним трансформатором є її простота. Однак при КЗ поблизу генератора напруга на його виводах знижується, що приводить до зниження напруги на тиристорах. Послідовний трансформатор забезпечує більше надійне збудження при близьких КЗ. Наявність тільки статичних елементів обумовлює високу надійність систем самозбудження. Система без послідовного трансформатора застосовується для збудження турбогенераторів потужністю до 220 МВт і гідрогенераторів до 300 МВт включно; система з випрямним і послідовним трансформаторами – для турбогенераторів потужністю 320...800 МВт і гідрогенераторів потужністю до 400 МВт.

## 1.2. Елементи пристроїв захисту СГ.

**Система захистів.** У системах збудження як мінімум передбачені наступні захисти:

- кіл ротора від замикання на землю (зниження ізоляції);
- кіл ротора від перенапруг за допомогою тиристорного розрядника;
- максимальні токові захисти випрямного трансформатора (допоміжного генератора);
- від короткого замикання на шинах постійного струму;
- перевищення припустимої температури випрямного трансформатора;
- від втрати збудження;
- від неприпустимої тривалості форсування;
- при відмовленні обмеження максимального струму;
- при неуспішному інвертуванні;

- при пробі діодів обертового випрямляча безщіткових систем.

**Автомати гасіння поля.** Автомати гасіння поля призначені для комутації кіл обмоток збудження турбо- і гідрогенераторів, а також для гасіння поля цих машин.

Оптимальні умови для інтенсивного зниження струму ротора до нульового значення забезпечуються при розряді обмотки збудження на нелінійний резистор, опір якого змінюється обернено пропорційно величині струму.

Завдяки спеціальній конструкції кільцевий дугогасильної решітки автомата гасіння поля, що горить у ній дуга має вольт-амперну характеристику нелінійного резистора, що забезпечує мінімальний час гасіння поля і безпечний рівень напруги на кільцях ротора.

Таблиця 1.1. Апарати гасіння поля

| Тип ви-<br>микача | Номинальний<br>струм голов-<br>ного кола, А | Номинальна<br>напруга голов-<br>ного кола, В | Габаритні розміри |        |         | Маса, кг |
|-------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------|--------|---------|----------|
|                   |                                             |                                              | Висота            | Ширина | Глибина |          |
| АГП12             | 1250                                        | 660                                          | 730               | 420    | 239     | 50       |
| АГП16             | 1600                                        |                                              | 940               | 512    | 313     | 140      |
| АГП30             | 3200                                        |                                              | 940               | 630    | 313     | 150      |
| АГП40             | 4000                                        |                                              | 1063              | 820    | 405     | 288      |
| АГП60             | 6300                                        |                                              | 1063              | 820    | 405     | 300      |

### 1.3. Синхронні збудники.

У цей час найпоширеніші безконтактні синхронні машини (БСМ) із синхронним збудником. Синхронний збудник (СЗ) являє собою звичайний синхронний генератор з полюсами на статорі. Полюси охоплені обмоткою збудження збудника *ОЗЗ*, що живиться постійним струмом, а багатозафна обмотка якоря збудника *ОЯЗ* зі своїм сердечником перебуває на роторі й приєднується до *ОЗ* через обертовий випрямляч. Очевидно, що *СЗ*, як і звичайний синхронний генератор, є підсилювачем електричної потужності, тому що потужність статорної обмотки *ОЗЗ* становить лише незначну частину (4...8 %) потужності роторної обмотки *ОЯЗ* і відповідно потужності основний *ОЗ*. Різниця між потужностями *ОЯЗ* і *ОЗЗ* визначається механічною потужністю, що за-

трачується на обертання *ОЯЗ*. Таким чином, БСМ із синхронним збудником мають найменші потужності керуючих і регулюючих кіл. Недолік СЗ – підвищені електромагнітні постійні часу й інерційність регулювання.

Синхронні збудники, як правило, не мають демпферних обмоток на полюсах на відміну від звичайних синхронних генераторів, оскільки демпферні обмотки знижують швидкодію регулювання машини.

У всіх схемах БСМ доцільно мати в збуднику ненасичені сталеві сердечники, щоб залежність струму збудження БСМ від струму первинного кола збудника (струму керування) була близька до лінійної.

В автономних енергоустановках (в авіації, на транспорті й т.п.), для котрих характерне високі частоти обертання електромеханічних перетворювачів, у більшості випадків застосовуються БСМ зі СЗ. Потужні сучасні турбогенератори (300 МВт і більш) також часто виконуються безконтактними з використанням СЗ. Схема збудження СЗ прийнята й у ряді розроблювальних перспективних потужних надпровідникових генераторів.

Для синхронних генераторів зі СЗ істотне значення набуває проблема самозбудження. Принципове самозбудження може здійснюватися за рахунок залишкового намагнічування сталевих сердечників. Однак у багатьох випадках надійність такого виду збудження виявляється низкою, а інерційність виходу на режим – неприпустимо великою. Тому в безконтактних генераторах зі СЗ уводиться додатковий елемент – підзбудник (П), що забезпечує швидке й надійне збудження СЗ. Підзбудник являє собою синхронний генератор з постійними магнітами на роторі. Загальний компоновальний ескіз генератора зі СЗ і П наведений на рис. 1.5. На статорі машини перебуває основна обмотка якоря *ОЯ*, обмотка збудження збудника *ОЗЗ* і обмотка якоря підзбудника *ОЯП*. На роторі розташовуються основна обмотка збудження *ОЗ*, обмотка якоря збудника *ОЯЗ* випрямляч, що обертається, СЗ і індуктор підзбудника з постійними магнітами.

У генераторному режимі БСМ із СЗ працює в такий спосіб. При обер-

танні ротора наводиться ЕРС в ОЯП і створюється струм, який випрямлюється й живить ОЗЗ. Остання забезпечує наведення ЕРС в ОЯЗ. Струм ОЯЗ випрямлюється за допомогою обертових випрямлячів і живить ОЗ, завдяки чому наводиться основна ЕРС в ОЯ. Система оснащена автоматичним регулятором збудження (АРЗ). Параметри генератора допускають плавне й глибоке регулювання за рахунок зміни струму в ОЗЗ.

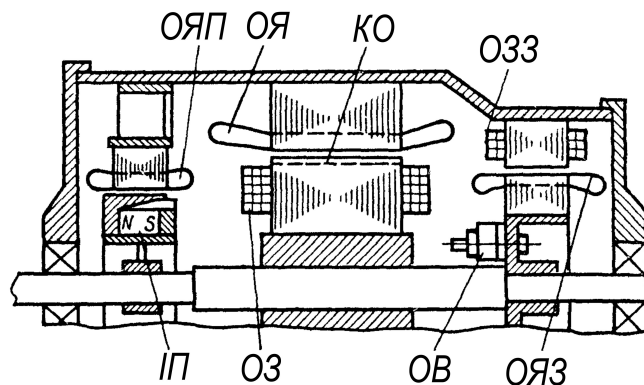


Рис. 1.5. Конструктивне виконання безконтактного синхронного генератора з синхронними збудником і підзбудником

Обертовий випрямляч виконується на основі кремнієвих напівпровідникових вентилів з підвищеною механічною міцністю (вентилів таблеткового типу зі спеціальними міцними гнучкими мембранами), називаних *роторними вентилями* й розрахованих на роботу при відцентрових прискореннях 5000g і більш. У ряді випадків їх надійність, вимірювану інтенсивністю відмов, можна довести до рівня надійності короткозамкненої білячої клітки в асинхронних двигунах, що дає підстави вважати, що, наприклад, БСМ із СЗ по своїй надійності не уступають асинхронним двигунам.

|                |              |          |        |      |                                    |      |      |
|----------------|--------------|----------|--------|------|------------------------------------|------|------|
|                |              |          |        |      | 141. 4301з. БР. ПЗ. Р2.            |      |      |
|                |              |          |        |      |                                    |      |      |
| Зм.            | Лист         | № докум. | Підпис | Дата |                                    |      |      |
| Розроб.        | Лісіцин К.О. |          |        |      | РОЗРАХУНОК СИНХРОННОГО<br>ЗБУДНИКА | Лім. | Лист |
| Керівник       | Кімстач О.Ю. |          |        |      |                                    |      | 20   |
|                |              |          |        |      |                                    |      | 18   |
| Н. контр.      |              |          |        |      |                                    | НУК  |      |
| В.о. зав. каф. | Обрубов А.В. |          |        |      |                                    |      |      |

## РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК СИНХРОННОГО ЗБУДНИКА

### 2.1. Розробка і обґрунтування конструктивної схеми синхронного збудника

Синхронний збудник виконано з неявно полюсним індуктором 4, обмотка котрого живиться від джерела постійного струму. Використання неявно полюсного індуктора дозволяє отримати поліпшені масо-габаритні показники, що для умов судна корисно. З'єднання трифазної обмотки якорю, що закріплені у пазу на валу збудника.

Керування СЗ виконується за рахунок зміни напруги живлення обмотки індуктора.

Для підключення збудника мається клемна коробка 3. Охолодження збудника – повітряне, досягається за рахунок природної вентиляції скрізь отвори у підшипникових щитах.

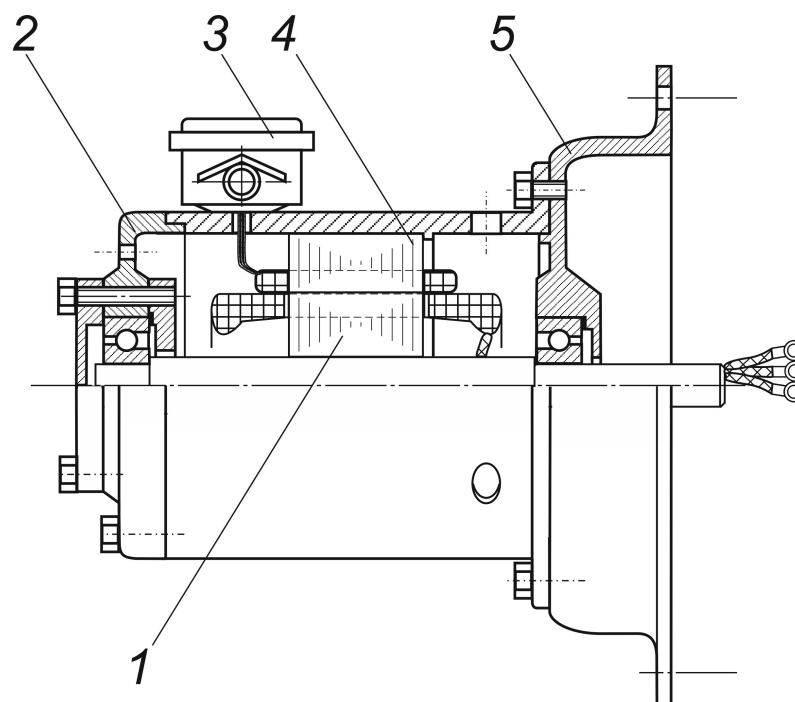


Рис. 2.1. Конструктивна схема СЗ:

1 – якор збудника; 2 – підшипниковий щит; 3 – клемна коробка;  
4 – індуктор; 5 – підшипниковий щит-фланець.

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

141. 4301з. БР. ПЗ. Р2

Лист

21

## 2.2. Розрахунок синхронного збудника

### Вихідні дані для розрахунку:

- напруга  $U_1 = 50 \text{ В}$  ;
- частота напруги  $f = 50 \text{ Гц}$  ;
- кількість фаз  $m_1 = 3$  ;
- потужність  $S_{2H} = 1000 \text{ ВА}$  ;
- кількість пар полюсів  $p = 2$  .

### РОЗРАХУНОК ГОЛОВНИХ РОЗМІРІВ

Синхронна частота обертання магнітного полю

$$n_1 = f \cdot \frac{60}{p} = 50 \cdot \frac{60}{2} = 1.5 \times 10^3 \frac{\text{об}}{\text{хв}} .$$

Індуктивний опір розсіювання якорю

$$x_{\sigma} = 0.08 \text{ в.о.}$$

Коефіцієнт потужності

$$\cos \phi = 0.8 .$$

Коефіцієнт ЕРС

$$k_H = \sqrt{\cos^2 \phi + \left( \sqrt{1 - \cos^2 \phi} + x_{\sigma} \right)^2} = \sqrt{0.8^2 + \left( \sqrt{1 - 0.8^2} + 0.08 \right)^2} = 1.05 .$$

Розрахункове значення ККД

$$\eta = 0.8 .$$

Активна потужність

$$P_{2H} = S_{2H} \cdot \cos \phi = 1 \times 10^3 \cdot 0.8 = 800 \text{ Вт} .$$

Розрахункове значення потужності

$$P_p = \frac{k_H \cdot P_{2H}}{\cos \phi} = \frac{1.05 \cdot 800}{0.8} = 1.049 \times 10^3 \text{ ВА} .$$

Висота обертання ротора

$$h = 71 \text{ мм} .$$

Товщина корпусу

$$h_2 = 4 \text{ мм} .$$

Діаметр магнітопроводу статора

$$D_{2n} = 122 \text{ мм} .$$

Висота від корпусу до опорної поверхні

$$h_1 = h - h_2 - \frac{D_{2n}}{2} = 71 - 4 - \frac{122}{2} = 6 \text{ мм} .$$

Діаметр корпусу

$$D_k = 2 \cdot h_2 + D_{2n} = 2 \cdot 4 + 122 = 130 \text{ мм} .$$

Діаметр активної частини статора

$$D'_2 = 0.69 \cdot D_{2n} = 0.69 \cdot 122 = 84.2 \text{ мм} .$$

Приймається  $D_2 = 84 \text{ мм} .$

Лінійне навантаження

$$A_1 = 104 \frac{\text{А}}{\text{см}} .$$

Індукція у повітряному зазорі

$$B_\delta = 0.7 \text{ Тл} .$$

Індукція у повітряному зазорі у неробочому режимі

$$B_{\delta 0} = \frac{B_\delta}{k_H} = \frac{0.7}{1.05} = 0.667 \text{ Тл} .$$

Полосне ділення

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_2}{2p} = \frac{\pi \cdot 84}{2 \cdot 2} = 66 \text{ мм} .$$

Опір по подовжній осі

$$x_d = 1 \text{ в.о.}$$

Опір реакції якорю

$$x_{ad} = x_d - x_\sigma = 1 - 0.08 = 0.92 \text{ в.о.}$$

Коефіцієнт зазорів у магнітопроводі ротору

$$k = 1.0 .$$

Повітряний зазор

$$\delta' = \frac{36 \cdot 10^{-6} \cdot \tau \cdot A_1}{x_{ad} \cdot B_{\delta 0} \cdot k} = \frac{36 \cdot 10^{-6} \cdot 66 \cdot 104}{0.92 \cdot 0.667 \cdot 1} = 0.403 \text{ мм} .$$

Приймається  $\delta = 0.42$  мм .

Коефіцієнт магнітного опору

$$\alpha = 0.64 .$$

Коефіцієнт форми полю збудження

$$k_B = 1.15 .$$

Коефіцієнт обмотки якорю

$$k_{o1} = 0.95 .$$

Довжина активної частини

$$l'_\delta = \frac{6.1 \cdot 10^7 \cdot P_p}{D_2^2 \cdot n_1 \cdot A_1 \cdot B_\delta \cdot k_{o1}} = \frac{6.1 \cdot 10^7 \cdot 1.049 \times 10^3}{84^2 \cdot 1.5 \times 10^3 \cdot 104 \cdot 0.7 \cdot 0.95} = 87.42 \text{ мм} .$$

Приймається  $l_\delta = 87$  мм .

Кількість пазів на полюс і фазу для обмотки якорю

$$q_1 = 2 .$$

Кількість зубців якоря

$$z_1 = 2p \cdot m_1 \cdot q_1 = 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 2 = 24 .$$

Діаметр магніторповоду ротора

$$D_1 = D_2 - 2\delta = 84 - 2 \cdot 0.42 = 83.16 \text{ мм} .$$

Кількість пазів на полюс і фазу (рис.2.2)

$$q_2 = 5 .$$

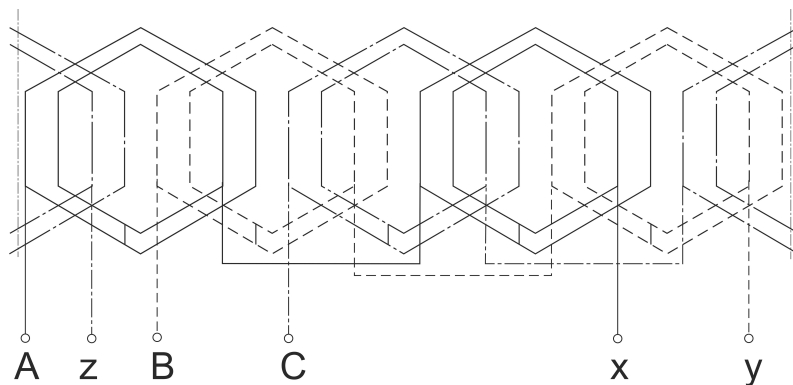


Рис.2.2. Обмотка якоря збудника

Кількість зубців індуктора

$$z_2 = 2p \cdot (q_2 - 1) = 2 \cdot 2 \cdot (5 - 1) = 16 \quad .$$

Розрахунковий момент на валу

$$M_p = \frac{P_p \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot n_1} = \frac{1.049 \times 10^3 \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot 1.5 \times 10^3} = 6.678 \quad \text{Нм} \quad .$$

Розміри вала (рис.2.3):

$$l_1 = 40 \quad \text{мм}.$$

$$d_1 = 19 \quad \text{мм}.$$

$$d_2 = 20 \quad \text{мм}.$$

$$d_3 = 26 \quad \text{мм}.$$

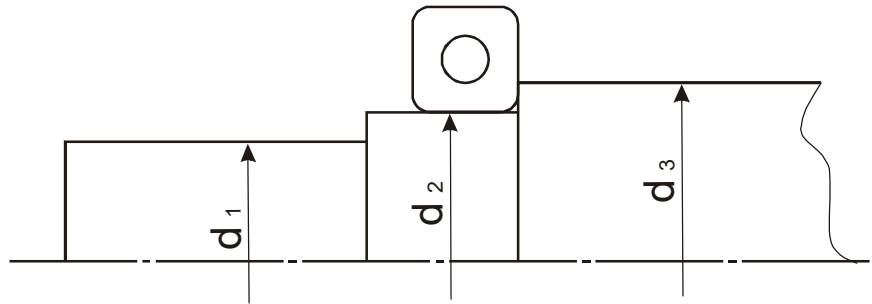


Рис.2.3. Вал збудника

Внутрішній діаметр магнітопроводу ротора

$$D_{1B} = d_3 = 26 \quad \text{мм}.$$

Магнітний потік

$$\Phi = \frac{\pi \cdot B_\delta \cdot D_1 \cdot l_\delta \cdot 10^{-6}}{2p} = \frac{\pi \cdot 0.7 \cdot 83.16 \cdot 87 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 2} = 3.98 \times 10^{-3} \quad \text{Вб} \quad .$$

Коефіцієнт заповнення сталі

$$k_c = 0.97 \quad .$$

Індукція у спинці статора

$$B_{c2} = 1.35 \quad \text{Тл} \quad .$$

Розрахункове значення висоти спинки статора

$$h_{c2p} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{2B_{c2} \cdot l_\delta \cdot k_c} = \frac{3.98 \times 10^{-3} \cdot 10^6}{2 \cdot 1.35 \cdot 87 \cdot 0.97} = 17.5 \quad \text{мм}.$$

Висота спинки статора

$$h_{c2} = h_{c2p} - h_2 = 17.5 - 4 = 13.5 \text{ мм.}$$

Діаметр зубцевої зони статора

$$D_{2z} = D_{2n} - 2 \cdot h_{c2} = 122 - 2 \cdot 13.5 = 95 \text{ мм.}$$

Висота зубців статора

$$h_{z2} = \frac{D_{2z} - D_2}{2} = \frac{95 - 84}{2} = 5.5 \text{ мм.}$$

Зубцеве ділення статора у основі зубців

$$t_{22} = \frac{\pi \cdot D_{2z}}{z_2 + 2p} = \frac{\pi \cdot 95}{16 + 2 \cdot 2} = 14.9 \text{ мм.}$$

Зубцеве ділення статора

$$t_2 = \frac{\pi \cdot D_2}{z_2 + 2p} = \frac{\pi \cdot 84}{16 + 2 \cdot 2} = 13.2 \text{ мм.}$$

Максимальна індукція у зубцях статора

$$B_{z2\max} = 1.35 \text{ Тл.}$$

Мінімальна ширина зубців статора

$$b_{z2\min} = \frac{\Phi}{5B_{z2\max} \cdot k_c \cdot l_\delta \cdot 10^{-6}} - \frac{t_2}{5} = \frac{3.98 \times 10^{-3}}{5 \cdot 1.35 \cdot 0.97 \cdot 87 \cdot 10^{-6}} - \frac{13.2}{5} = 4.35 \text{ мм.}$$

Ширина паза статора

$$b_p = t_2 - b_{z2\min} = 13.2 - 4.35 = 8.85 \text{ мм.}$$

Максимальна ширина зубця статора

$$b_{z2\max} = t_{22} - b_p = 14.9 - 8.85 = 6.05 \text{ мм.}$$

Мінімальна індукція у зубцях статора

$$B_{z2\min} = B_{z2\max} \cdot \frac{b_{z2\min}}{b_{z2\max}} = 1.35 \cdot \frac{4.35}{6.05} = 0.971 \text{ Тл.}$$

Середня індукція у зубцях статора

$$B_{z2c} = \frac{B_{z2\min} + B_{z2\max}}{2} = \frac{0.971 + 1.35}{2} = 1.16 \text{ Тл.}$$

## ОБМОТКА ЯКОРЮ

Струм якорю

$$I_{1n} = \frac{P_{2H}}{\cos\phi \cdot U_1 \cdot m_1} = \frac{800}{0.8 \cdot 50 \cdot 3} = 6.67 \text{ А.}$$

Щільність струму у обмотці якорю

$$\Delta_1 = 5.2 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}.$$

Кількість витків у обмотці якорю

$$w'_1 = \frac{U_1}{k_H \cdot 4.44 \cdot \Phi \cdot f \cdot k_{o1}} = \frac{50}{1.05 \cdot 4.44 \cdot 3.98 \times 10^{-3} \cdot 50 \cdot 0.95} = 56.7.$$

Приймається  $w_1 = 60$ .

Перетин ефективного провідника обмотки якорю

$$q_{ef1} = \frac{I_{1n}}{\Delta_1} = \frac{6.67}{5.2} = 1.28 \text{ мм}^2.$$

Кількість елементарних провідників

$$N_{e1} = 3.$$

Перетин елементарного провідника якірної обмотки

$$q'_{e1} = \frac{q_{ef1}}{N_{e1}} = \frac{1.28}{3} = 0.43 \text{ мм}^2.$$

Обирається провід марки ПЕТ-155  $q_{e1} = 0.43 \text{ мм}^2$ .

Кількість елементарних провідників пазу

$$u_1 = \frac{w_1 \cdot N_{e1}}{p \cdot q_1} = \frac{60 \cdot 3}{2 \cdot 2} = 45.$$

Коефіцієнт заповнення паза

$$k_Z = 0.65.$$

Площина паза статора

$$S_{p1} = q_{e1} \cdot \frac{u_1}{k_Z} = 0.43 \cdot \frac{45}{0.65} = 29.77 \text{ мм}^2.$$

Індукція у спинці якорю

$$B_{c1} = 1.2 \text{ Тл} .$$

Висота спинці якорю

$$h_{c1} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{B_{c1} \cdot 2 \cdot l_{\delta} \cdot k_c} = \frac{3.98 \times 10^{-3} \cdot 10^6}{1.2 \cdot 2 \cdot 87 \cdot 0.97} = 19.7 \text{ мм} .$$

Діаметр зубцевої зони якорю

$$D_{1z} = D_{1B} + 2 \cdot h_{c1} = 26 + 2 \cdot 19.7 = 65.4 \text{ мм} .$$

Висота паза якорю

$$h_{z1} = \frac{D_1 - D_{1z}}{2} = \frac{83.16 - 65.4}{2} = 8.88 \text{ мм} .$$

Ширина паза якорю

$$b_{p1} = \frac{S_{p1}}{h_{z1}} = \frac{29.77}{8.88} = 3.352 \text{ мм} .$$

Висота і ширина шліца, відповідно:

- якорю  $h_{k1} = 1.5 \text{ мм} . \quad b_{h1} = 2 \text{ мм} .$

- індуктора  $h_{k2} = 1.5 \text{ мм} . \quad b_{h2} = 2 \text{ мм} .$

Зубцеве ділення

$$t_1 = \frac{\pi D_1}{z_1} = \frac{\pi \cdot 83.16}{24} = 10.89 \text{ мм} .$$

Максимальна ширина зубців

$$b_{z1\max} = t_1 - b_{p1} = 10.89 - 3.352 = 7.54 \text{ мм} .$$

Мінімальна індукція у зубцах

$$B_{z1\min} = \frac{B_{\delta} \cdot t_1}{b_{z1\max} \cdot k_c} = \frac{0.7 \cdot 10.89}{7.54 \cdot 0.97} = 1.04 \text{ Тл} .$$

Мінімальна ширина зубця

$$b_{z1\min} = \frac{\pi \cdot (D_1 - 2 \cdot h_{z1})}{z_1} - b_{p1} = \frac{\pi \cdot (83.16 - 2 \cdot 8.88)}{24} - 3.352 = 5.209 \text{ мм} .$$

Максимальна індукція у зубцях

$$B_{z1\max} = \frac{B_{\delta} \cdot t_1}{b_{z1\min} \cdot k_c} = \frac{0.7 \cdot 10.89}{5.209 \cdot 0.97} = 1.51 \quad \text{Тл}.$$

Середня індукція у зубцях

$$B_{zc1} = \frac{B_{z1\max} + B_{z1\min}}{2} = \frac{1.51 + 1.04}{2} = 1.27 \quad \text{Тл}.$$

## РОЗРАХУНОК МАГНІТНОГО КОЛА

Коефіцієнт зубчасті якорю

$$K_{\delta 1} = 1 + \frac{b_{h1}^2}{b_{h1} \cdot t_1 - b_{h1}^2 + 5 \cdot t_1 \cdot \delta} = 1 + \frac{2^2}{2 \cdot 10.89 - 2^2 + 5 \cdot 10.89 \cdot 0.42} = 1.1.$$

Коефіцієнт зубчасті індуктора

$$K_{\delta 2} = 1 + \frac{b_{h2}^2}{b_{h2} \cdot t_2 - b_{h2}^2 + 5 \cdot t_2 \cdot \delta} = 1 + \frac{2^2}{2 \cdot 13.2 - 2^2 + 5 \cdot 13.2 \cdot 0.42} = 1.08.$$

Загальний коефіцієнт зубчасті

$$K_{\delta} = K_{\delta 1} \cdot K_{\delta 2} = 1.1 \cdot 1.08 = 1.19.$$

МРС повітряного зазору

$$F_{\delta} = 0.8 \cdot \delta \cdot K_{\delta} \cdot B_{\delta} \cdot 10^3 = 0.8 \cdot 0.42 \cdot 1.19 \cdot 0.7 \cdot 10^3 = 280 \quad \text{А}.$$

Напруженість у зубцях якорю

$$H_{z1} = 4.67 \quad \frac{\text{А}}{\text{см}}.$$

МРС зубців якорю

$$F_{z1} = 0.1 \cdot H_{z1} \cdot h_{z1} = 0.1 \cdot 4.67 \cdot 8.88 = 4.15 \quad \text{А}.$$

Напруженість у зубцях індуктора

$$H_{z2} = 4.01 \quad \frac{\text{А}}{\text{см}}.$$

МРС зубців індуктора

$$F_{z2} = 0.1 \cdot H_{z2} \cdot h_{z2} = 0.1 \cdot 4.01 \cdot 5.5 = 2.21 \quad \text{А}.$$

Напруженість у спілці якорю

$$H_{c1} = 2.62 \frac{A}{cm}.$$

Напруженість у спілці індуктора

$$H_{c2} = 3.57 \frac{A}{cm}.$$

Середня довжина силової лінії у спілці якорю

$$L_{c1} = \frac{\pi \cdot (D_{1z} - h_{c1})}{4 \cdot p} = \frac{\pi \cdot (65.4 - 19.7)}{4 \cdot 2} = 17.9 \text{ мм}.$$

МРС у спілці якорю

$$F_{c1} = 0.1 \cdot H_{c1} \cdot L_{c1} = 0.1 \cdot 2.62 \cdot 17.9 = 4.69 \text{ А}.$$

Середня довжина силової лінії у спілці індуктора

$$L_{c2} = \frac{\pi \cdot (D_{2z} + h_{c2})}{4 \cdot p} + \frac{h_{c2p}}{2} = \frac{\pi \cdot (95 + 13.5)}{4 \cdot 2} + \frac{17.5}{2} = 51.4 \text{ мм}.$$

МРС у спілці індуктора

$$F_{c2} = 0.1 \cdot H_{c2} \cdot L_{c2} = 0.1 \cdot 3.57 \cdot 51.4 = 18.3 \text{ А}.$$

Загальна МРС

$$F_{\Sigma} = F_{\delta} + F_{c1} + F_{z1} + F_{z2} + F_{c2} = 280 + 4.69 + 4.15 + 2.21 + 18.3 = 309.3 \text{ А}.$$

Кофіцієнт намагнічування

$$k_{\mu} = \frac{F_{\Sigma}}{F_{\delta}} = \frac{309.3}{280} = 1.1.$$

## РОЗРАХУНОК КРИВОЇ ХОЛОСТОГО ХОДУ

Задається ряд значень потоку у в.о.

$$\Phi_x = (0 \ 0.5 \ 0.75 \ 1 \ 1.1 \ 1.25 \ 1.4 \ 1.55).$$

Індукція у повітряному зазорі

$$B_{\delta x} = B_{\delta} \cdot \Phi_x.$$

$$B_{\delta x} = (0 \ 0.35 \ 0.525 \ 0.7 \ 0.77 \ 0.875 \ 0.98 \ 1.085).$$

МРС повітряного зазору

$$F_{\delta x} = 0.8 \cdot \delta \cdot K_{\delta} \cdot B_{\delta x} \cdot 10^3.$$

$$F_{\delta x} = (0 \ 139.944 \ 209.916 \ 279.888 \ 307.877 \ 349.86 \ 391.843 \ 433.826).$$

Середня індукція у зубцях якорю

$$B_{zclx} = B_{zc1} \cdot \Phi_x.$$

$$B_{zclx} = (0 \ 0.635 \ 0.953 \ 1.27 \ 1.397 \ 1.587 \ 1.778 \ 1.969).$$

Напруженість у зубцях якорю

$$H_{z1x} = (0 \ 2.37 \ 3.77 \ 6.9 \ 9.5 \ 18.1 \ 47 \ 145).$$

МРС зубців якорю

$$F_{z1x} = 0.1 \cdot H_{z1x} \cdot h_{z1}.$$

$$F_{z1x} = (0 \ 2.105 \ 3.348 \ 6.127 \ 8.436 \ 16.073 \ 41.736 \ 128.76).$$

Середня індукція у зубцях індуктора

$$B_{z2cx} = B_{z2c} \cdot \Phi_x.$$

$$B_{z2cx} = (0 \ 0.58 \ 0.87 \ 1.16 \ 1.276 \ 1.45 \ 1.624 \ 1.798).$$

Напруженість у зубцях індуктора

$$H_{z2x} = (0 \ 1.82 \ 2.8 \ 4.07 \ 4.78 \ 6.64 \ 9.62 \ 16).$$

МРС зубців індуктора

$$F_{z2x} = 0.1 \cdot H_{z2x} \cdot h_{z2}.$$

$$F_{z2x} = (0 \ 1.001 \ 1.54 \ 2.239 \ 2.629 \ 3.652 \ 5.291 \ 8.8).$$

Індукція у спинці якорю

$$B_{c1x} = \Phi_x \cdot B_{c1}.$$

$$B_{c1x} = (0 \ 0.6 \ 0.9 \ 1.2 \ 1.32 \ 1.5 \ 1.68 \ 1.86).$$

Напруженість у спинці якорю

$$H_{c1x} = (0 \ 0.8 \ 1.52 \ 2.62 \ 3.34 \ 5.2 \ 10.7 \ 29.6).$$

Індукція у спинці індуктора

$$B_{c2x} = B_{c2} \cdot \Phi_x.$$

$$B_{c2x} = (0 \ 0.675 \ 1.013 \ 1.35 \ 1.485 \ 1.688 \ 1.89 \ 2.093).$$

Напруженість у спілці індуктора

$$H_{c2x} = (0 \ 0.94 \ 1.89 \ 3.57 \ 4.99 \ 11 \ 34.2 \ 99) .$$

МРС у спілці якорю

$$F_{c1x} = 0.1 \cdot H_{c1x} \cdot L_{c1} .$$

$$F_{c1x} = (0 \ 1.432 \ 2.721 \ 4.69 \ 5.979 \ 9.308 \ 19.153 \ 52.984) .$$

МРС у спілці індуктора

$$F_{c2x} = 0.1 \cdot H_{c2x} \cdot L_{c2} .$$

$$F_{c2x} = (0 \ 4.832 \ 9.715 \ 18.35 \ 25.649 \ 56.54 \ 175.788 \ 508.86) .$$

Загальна МРС

$$F_{\Sigma x} = \frac{F_{\delta x} + F_{c1x} + F_{z1x} + F_{z2x} + F_{c2x}}{F_{\Sigma}} .$$

$$F_{\Sigma x} = (0 \ 0.483 \ 0.735 \ 1.006 \ 1.133 \ 1.408 \ 2.049 \ 3.664) .$$

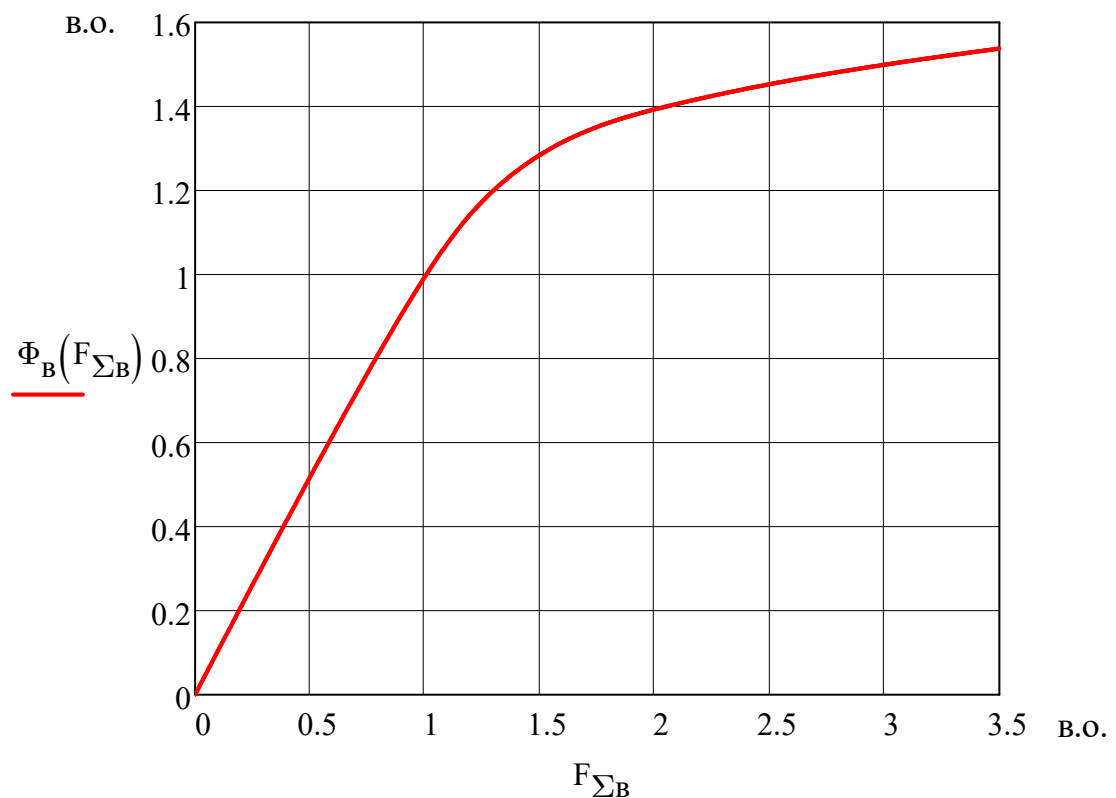


Рис.2.4. Характеристика холостого ходу збудника

## РОЗРАХУНОК ОПОРІВ ОБМОТКИ ЯКОРЯ

Середнє пазове ділення якорю

$$t_{cp1} = \frac{\pi \cdot (D_1 - h_{z1})}{z_1} = \frac{\pi \cdot (83.16 - 8.88)}{24} = 9.72 \text{ мм} .$$

Шаг обмотки

$$y_1 = \frac{z_1}{2 \cdot p} = \frac{24}{2 \cdot 2} = 6 .$$

Середня ширина витка обмотки

$$b_{c1} = t_{cp1} \cdot y_1 = 9.72 \cdot 6 = 58.3 \text{ мм} .$$

Довжина лобової частини обмотки

$$l_{л1} = b_{c1} + 8 \cdot h_{z1} = 58.3 + 8 \cdot 8.88 = 129 \text{ мм} .$$

Середня довжина витка обмотки

$$l_{cp1} = 2 \cdot l_{\delta} + 2 \cdot l_{л1} = 2 \cdot 87 + 2 \cdot 129 = 432 \text{ мм} .$$

Коефіцієнт пазового розсіювання обмотки якорю

$$\lambda_{п1} = \frac{3h_{k1}}{b_{p1} + 2 \cdot b_{h1}} + \frac{h_{z1}}{3 \cdot b_{p1}} = \frac{3 \cdot 1.5}{3.352 + 2 \cdot 2} + \frac{8.88}{3 \cdot 3.352} = 1.5 .$$

Коефіцієнт лобового розсіювання обмотки якорю

$$\lambda_{л1} = \frac{0.34 \cdot q_1 \cdot (l_{л1} - 0.64 \cdot \tau)}{l_{\delta}} = \frac{0.34 \cdot 2 \cdot (129 - 0.64 \cdot 66)}{87} = 0.678 .$$

Коефіцієнт динамічного розсіювання якірної обмотки

$$\lambda_{д1} = \frac{0.005 \cdot \tau \cdot \alpha b_{h1}}{\delta \cdot K_{\delta} \cdot q_1} = \frac{5 \times 10^{-3} \cdot 66 \cdot 0.64 \cdot 2}{0.42 \cdot 1.19 \cdot 2} = 0.423 .$$

Повне розсіювання обмотки якорю

$$\lambda_1 = \lambda_{п1} + \lambda_{л1} + \lambda_{д1} = 1.5 + 0.678 + 0.423 = 2.6 .$$

Індуктивний опір обмотки якорю

$$X_{\sigma} = \frac{1.58 \cdot f \cdot l_{\delta} \cdot w_1^2 \cdot \lambda_1}{p \cdot q_1 \cdot 10^8} = \frac{1.58 \cdot 50 \cdot 87 \cdot 60^2 \cdot 2.6}{2 \cdot 2 \cdot 10^8} = 0.161 \text{ Ом} .$$

Питомий опір для міді

$$\rho_M = 24.4 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{мм} .$$

Активний опір якорної обмотки

$$R_1 = \rho_m \cdot \frac{w_1 \cdot l_{cp1}}{N_{e1} \cdot q_{e1}} = 24.4 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{60 \cdot 432}{3 \cdot 0.43} = 0.49 \text{ Ом}.$$

## РОЗРАХУНОК МАГНІТНОГО КОЛА ПРИ НАВАНТАЖЕННІ

Складові ЕРС при навантаженні:

$$E_d = U_1 \cdot \cos\phi + I_{1n} \cdot R_1 = 50 \cdot 0.8 + 6.67 \cdot 0.49 = 43.3 \text{ В}.$$

$$E_q = I_{1n} \cdot X_\sigma + U_1 \cdot \sqrt{1 - \cos^2\phi} = 6.67 \cdot 0.161 + 50 \cdot \sqrt{1 - 0.8^2} = 31.1 \text{ В}.$$

ЕРС при навантаженні

$$E = \sqrt{E_d^2 + E_q^2} = \sqrt{43.3^2 + 31.1^2} = 53.3 \text{ В}.$$

ЕРС при навантаженні у відносних одиницях

$$E_x = \frac{E}{U_1} = \frac{53.3}{50} = 1.07 \text{ в.о.}$$

Результуюча МРС при навантаженні у відносних одиницях

$$F_{рез} = F_{xx}(E_x) = 1.092 \text{ в.о.}$$

МРС реакції якорю при навантаженні

$$F_a = 0.45 \cdot m_1 \cdot w_1 \cdot k_{o1} \cdot \frac{I_{1n}}{p} = 0.45 \cdot 3 \cdot 60 \cdot 0.95 \cdot \frac{6.67}{2} = 257 \text{ А}.$$

МРС реакції якорю при навантаженні у відносних одиницях

$$F_{ax} = \frac{F_a}{F_\Sigma} = \frac{257}{309.3} = 0.831 \text{ в.о.}$$

Кут у трикутнику МРС

$$\beta = \pi - \arccos\left(\frac{E_q}{E}\right) = \pi - \arccos\left(\frac{31.1}{53.3}\right) = 2.19.$$

Складові МРС збудження при навантаженні у відносних одиницях:

$$F_{31} = F_{рез}^2 + F_{ax}^2 = 1.092^2 + 0.831^2 = 1.88.$$

$$F_{32} = 2 \cdot F_{рез} \cdot F_{ax} \cdot \cos(\beta) = 2 \cdot 1.092 \cdot 0.831 \cdot \cos(2.19) = -1.05.$$

МРС збудження при навантаженні у відносних одиницях

$$F_3 = \sqrt{F_{31} - F_{32}} = \sqrt{1.88 - -1.05} = 1.71 \text{ .}$$

ЕРС неробочого режиму у відносних одиницях

$$E_0 = \Phi_B(F_3) = 1.343 \text{ в.о.}$$

Складова індуктивного опору реакції якорю

$$X_{af} = E_0 \cdot E_x \cdot \frac{F_3^2 + F_{рез}^2 - F_{ax}^2}{2 \cdot F_{рез} \cdot F_3} = 1.343 \cdot 1.07 \cdot \frac{1.71^2 + 1.092^2 - 0.831^2}{2 \cdot 1.092 \cdot 1.71} = 1.318 \text{ .}$$

Індуктивний опір реакції якорю

$$X_a = \frac{U_1 \cdot \sqrt{E_0^2 + E_x^2 - 2 \cdot X_{af}}}{I_{1n}} = \frac{50 \cdot \sqrt{1.343^2 + 1.07^2 - 2 \cdot 1.318}}{6.67} = 4.19 \text{ Ом .}$$

## РОЗРАХУНОК ОБМОТКИ ЗБУДЖЕННЯ

Коефіцієнт заповнення пазів індуктору

$$k_{z2} = 0.62 \text{ .}$$

Площина обмотки збудження на полюс

$$S_{o2} = b_p \cdot h_{z2} \cdot k_{z2} \cdot \frac{z_2}{2p} = 8.85 \cdot 5.5 \cdot 0.62 \cdot \frac{16}{2 \cdot 2} = 121 \text{ мм}^2 \text{ .}$$

Щільність струму у обмотці індуктору

$$\Delta_2 = \frac{F_3 \cdot F_\Sigma}{S_{o2}} = \frac{1.71 \cdot 309.3}{121} = 4.37 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2} \text{ .}$$

Площина елементарного провідника індуктору

$$q_{e2} = 0.132 \text{ мм}^2 \text{ .}$$

Кількість витків у обмотці збудження

$$w'_2 = \frac{S_{o2}}{q_{e2}} = \frac{121}{0.132} = 917 \text{ .}$$

Приймається  $w_2 = 918 \text{ .}$

Струм у обмотці індуктору

$$I_3 = \frac{F_3 \cdot F_\Sigma}{w_2} = \frac{1.71 \cdot 309.3}{918} = 0.576 \text{ А} .$$

Середній діаметр пазової зони індуктору

$$D_{c2} = D_2 + h_{z2} = 84 + 5.5 = 89.5 \text{ мм} .$$

Середня довжина лобової частини обмотки індуктору

$$l_{л2} = 4 \cdot \frac{1.15 \cdot \pi \cdot D_{c2}}{z_2 + 2p} = 4 \cdot \frac{1.15 \cdot \pi \cdot 89.5}{16 + 2 \cdot 2} = 64.7 \text{ мм} .$$

Середній довжина витка обмотки індуктору

$$l_{cp2} = 2 \cdot (l_\delta + l_{л2}) = 2 \cdot (87 + 64.7) = 303 \text{ мм} .$$

Активний опір обмотки індуктору

$$R_3 = \rho_m \cdot \frac{w_2 \cdot l_{cp2}}{q_{e2}} = 24.4 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{918 \cdot 303}{0.132} = 51.4 \text{ Ом} .$$

Напруга обмотки збудження

$$U'_3 = R_3 \cdot I_3 = 51.4 \cdot 0.576 = 29.6 \text{ В} .$$

Приймається  $U_3 = 26 \text{ В}$  .

## РОЗРАХУНОК ККД

Площина зубцевої зони якорю

$$S_{z11} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_1^2 - D_{1z}^2) = \frac{\pi}{4} \cdot (83.16^2 - 65.4^2) = 2.072 \times 10^3 \text{ мм}^2 .$$

Площина зубців якорю

$$S_{z12} = z_1 \cdot h_{z1} \cdot b_{p1} = 24 \cdot 8.88 \cdot 3.352 = 714 \text{ мм}^2 .$$

Об'єм зубців якорю

$$V_{z1} = (S_{z11} - S_{z12}) \cdot l_\delta = (2.072 \times 10^3 - 714) \cdot 87 = 1.181 \times 10^5 \text{ мм}^3 .$$

Маса зубців якорю

$$m_{z1} = 7.8 \cdot 10^{-6} \cdot k_c \cdot V_{z1} = 7.8 \cdot 10^{-6} \cdot 0.97 \cdot 1.181 \times 10^5 = 0.894 \text{ кг} .$$

Площина спинки статора

$$S_{c1} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{1z}^2 - D_{1B}^2) = \frac{\pi}{4} \cdot (65.4^2 - 26^2) = 2.828 \times 10^3 \text{ мм}^2.$$

Маса спілки якорю

$$m_{c1} = 7.8 \cdot 10^{-6} \cdot S_{c1} \cdot l_{\delta} \cdot k_c = 7.8 \cdot 10^{-6} \cdot 2.828 \times 10^3 \cdot 87 \cdot 0.97 = 1.86 \text{ кг}.$$

Втрати потужності у зубцях якорю

$$P_{z1} = 4.4 \cdot B_{zc1}^2 \cdot m_{z1} = 4.4 \cdot 1.27^2 \cdot 0.894 = 6.34 \text{ Вт}.$$

Втрати потужності у спинці якорю

$$P_{c1} = 4.4 \cdot B_{c1}^2 \cdot m_{c1} = 4.4 \cdot 1.2^2 \cdot 1.86 = 11.8 \text{ Вт}.$$

Загальні втрати потужності у сталі

$$P_{ст} = P_{z1} + P_{c1} = 6.34 + 11.8 = 18.1 \text{ Вт}.$$

Втрати потужності:

- у обмотці якорю

$$P_{e1} = m_1 \cdot I_{1n}^2 \cdot R_1 = 3 \cdot 6.67^2 \cdot 0.49 = 65.4 \text{ Вт}.$$

- у обмотці індуктору

$$P_{e2} = p \cdot I_3^2 \cdot R_3 = 2 \cdot 0.576^2 \cdot 51.4 = 34.1 \text{ Вт}.$$

- загальні електричні

$$P_e = P_{e1} + P_{e2} = 65.4 + 34.1 = 99.5 \text{ Вт}.$$

- механічні

$$P_{\text{мех}} = 8 \cdot \left( \frac{n_1}{1000} \right)^2 \cdot \left( \frac{D_1}{100} \right)^3 = 8 \cdot \left( \frac{1.5 \times 10^3}{1 \times 10^3} \right)^2 \cdot \left( \frac{83.16}{100} \right)^3 = 10.4 \text{ Вт}.$$

- додаткові

$$P_{\text{доб}} = 0.005 \cdot P_{2H} = 5 \times 10^{-3} \cdot 800 = 4 \text{ Вт}.$$

- загальні

$$P_s = P_e + P_{ст} + P_{\text{мех}} + P_{\text{доб}} = 99.5 + 18.1 + 10.4 + 4 = 132 \text{ Вт}.$$

ККД

$$\eta_H = 1 - \frac{P_s}{P_{2H} + P_s} = 1 - \frac{132}{800 + 132} = 0.858.$$

|                |      |              |                                                                                     |      |                                                  |  |  |      |      |        |
|----------------|------|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------|--------------------------------------------------|--|--|------|------|--------|
|                |      |              |                                                                                     |      | 141. 4301з. БР. ПЗ. РЗ.                          |  |  |      |      |        |
| Зм.            | Лист | № докум.     | Підпис                                                                              | Дата | РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК<br>СИНХРОННОГО ЗБУДНИКА |  |  | Лім. | Лист | Листів |
| Розроб.        |      | Лісіцин К.О. |  |      |                                                  |  |  |      |      |        |
| Керівник       |      | Кімстач О.Ю. |  |      |                                                  |  |  |      | 38   | 7      |
| Н. контр.      |      |              |                                                                                     |      |                                                  |  |  | НУК  |      |        |
| В.о. зав. каф. |      | Обрубов А.В. |  |      |                                                  |  |  |      |      |        |

### РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК СИНХРОННОГО ЗБУДНИКА

#### Регулювальна характеристика

Задаючись рядом значень струму якорю у відносних одиницях від 0 до 1,5 розраховується регулювальна характеристика.

Струм якорю у абсолютних одиницях

$$I_1(I_{1o}) = I_{1o} \cdot I_{1n} \quad .$$

ЕРС

$$E(I_{1o}) = \sqrt{(U_1 \cdot \cos\phi + I_1(I_{1o}) \cdot R_1)^2 + (I_1(I_{1o}) \cdot X_\sigma + U_1 \cdot \sin\phi)^2} \quad .$$

ЕРС у відносних одиницях

$$E_x(I_{1o}) = \frac{E(I_{1o})}{U_1} \quad .$$

Результуюча МРС у відносних одиницях

$$F_{рез}(I_{1o}) = F_{xx}(E_x(I_{1o})) \quad .$$

МРС реакції якорю

$$F_a(I_{1o}) = 0.45 \cdot m_1 \cdot w_1 \cdot k_{o1} \cdot \frac{I_1(I_{1o})}{p} \quad .$$

МРС реакції якорю у відносних одиницях

$$F_{ax}(I_{1o}) = \frac{F_a(I_{1o})}{F_\Sigma} \quad .$$

Кут у трикутнику МРС

$$\beta(I_{1o}) = \pi - \arccos\left(\frac{I_1(I_{1o}) \cdot X_\sigma + U_1 \cdot \sin\phi}{E(I_{1o})}\right) \quad .$$

МРС збудження у відносних одиницях

$$F_2(I_{1o}) = \sqrt{F_{рез}(I_{1o})^2 + F_{ax}(I_{1o})^2 - 2 \cdot F_{рез}(I_{1o}) \cdot F_{ax}(I_{1o}) \cdot \cos(\beta(I_{1o}))} \quad .$$

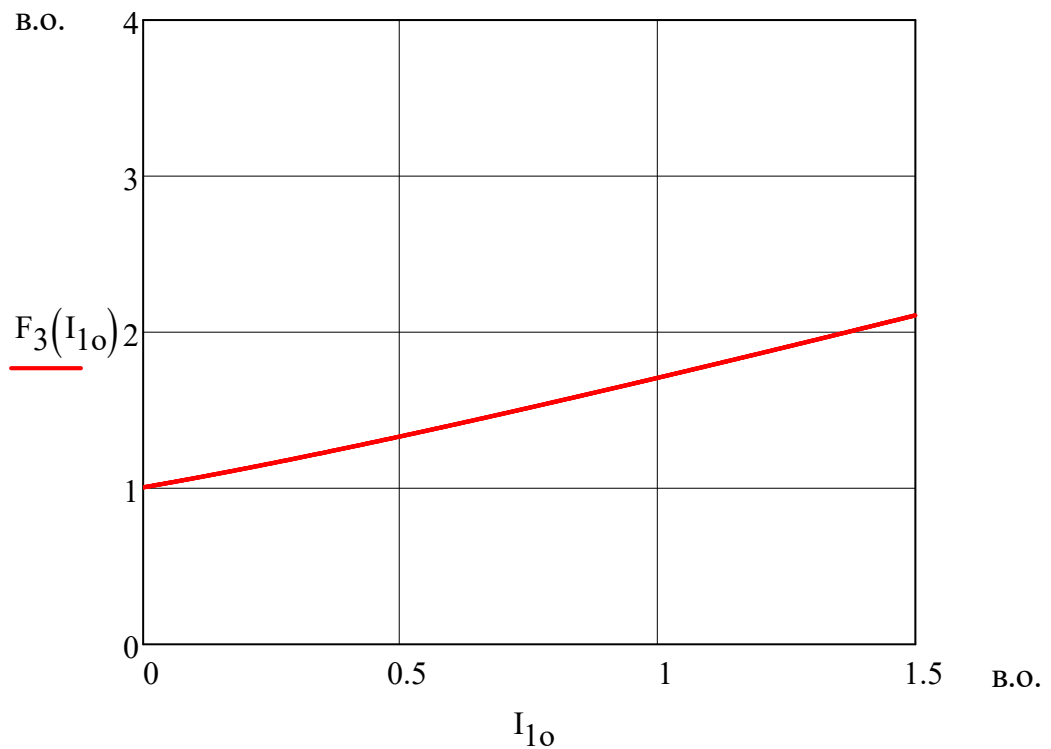


Рис. 3.1. Регулювальна характеристика у відносних одиницях

### Зовнішня характеристика

Задаючись рядом значень струму якорю у відносних одиницях від 0 до 2 розраховується зовнішня характеристика.

Струм якорю

$$I_1(I_{1o}) = I_{1o} \cdot I_{1n}$$

Коефіцієнт

$$D(I_{1o}) = \sqrt{I_1(I_{1o})^2 \cdot (X_\sigma \cdot \sin\phi + R_1 \cdot \cos\phi)^2 - [(I_1(I_{1o}) \cdot X_\sigma)^2 + (I_1(I_{1o}) \cdot R_1)^2 - E^2]}$$

Напруга якорю у відносних одиницях

$$U(I_{1o}) = \frac{-I_1(I_{1o}) \cdot (X_\sigma \cdot \sin\phi + R_1 \cdot \cos\phi) + D(I_{1o})}{U_1}$$

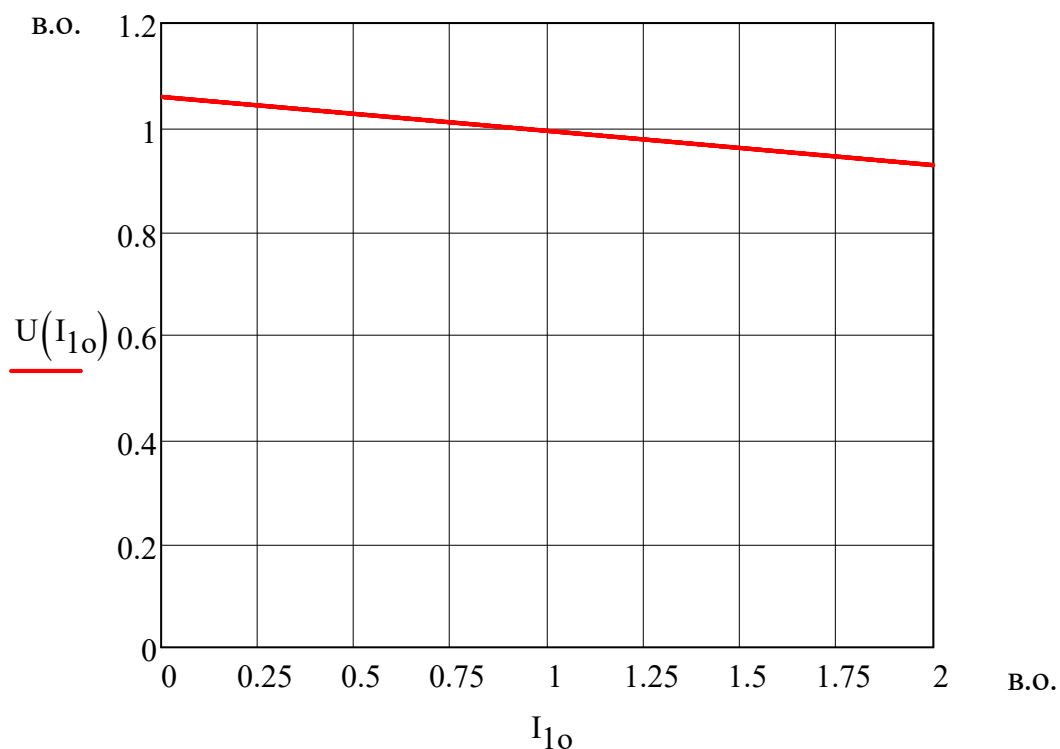


Рис. 3.2. Зовнішня характеристика у відносних одиницях

### Кутові характеристики

Задаючись рядом значень кута навантаження  $\theta$  від 0 до  $\pi$  при постійному значенні ЕРС розраховується кутова характеристика.

Активна потужність

$$P(\theta) = \frac{m_1 \cdot U_1 \cdot E_0}{(X_a + X_\sigma) \cdot P_{2H}} \cdot \sin(\theta) \quad .$$

Момент

$$M(\theta) = \frac{m_1 \cdot U_1 \cdot E_0 \cdot p}{(X_a + X_\sigma) \cdot 2 \cdot \pi \cdot f} \cdot \sin(\theta) \quad .$$

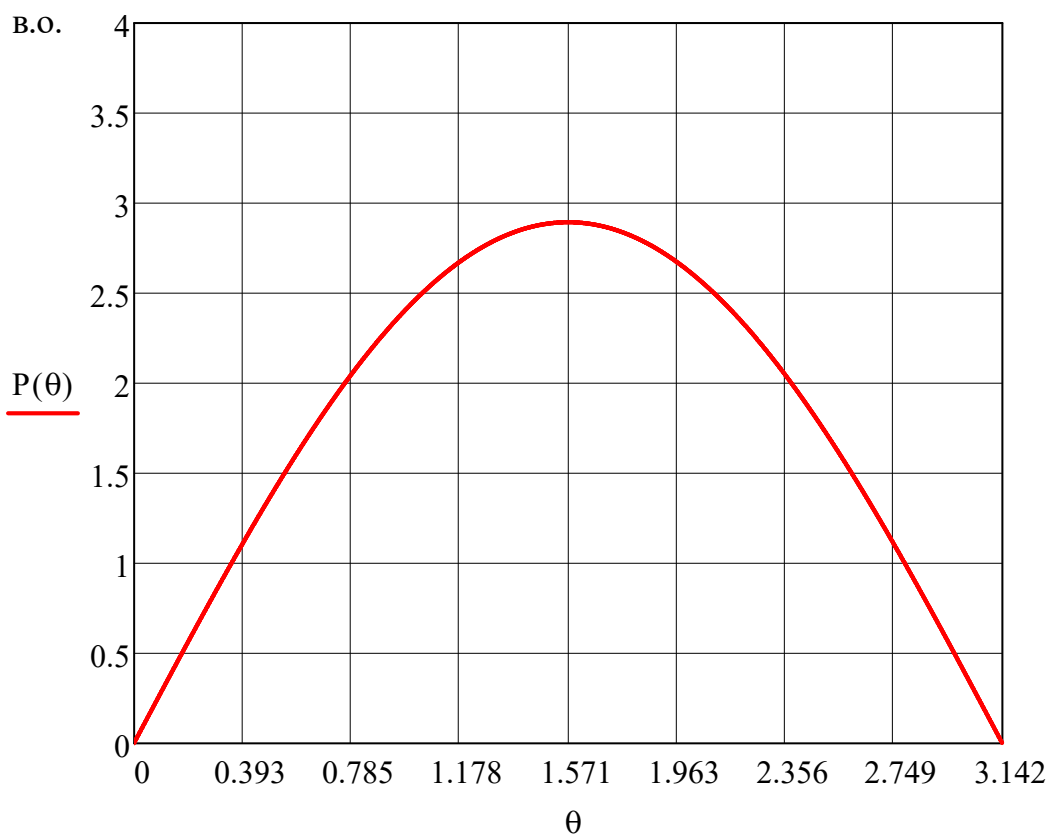


Рис. 3.3. Кутова характеристика

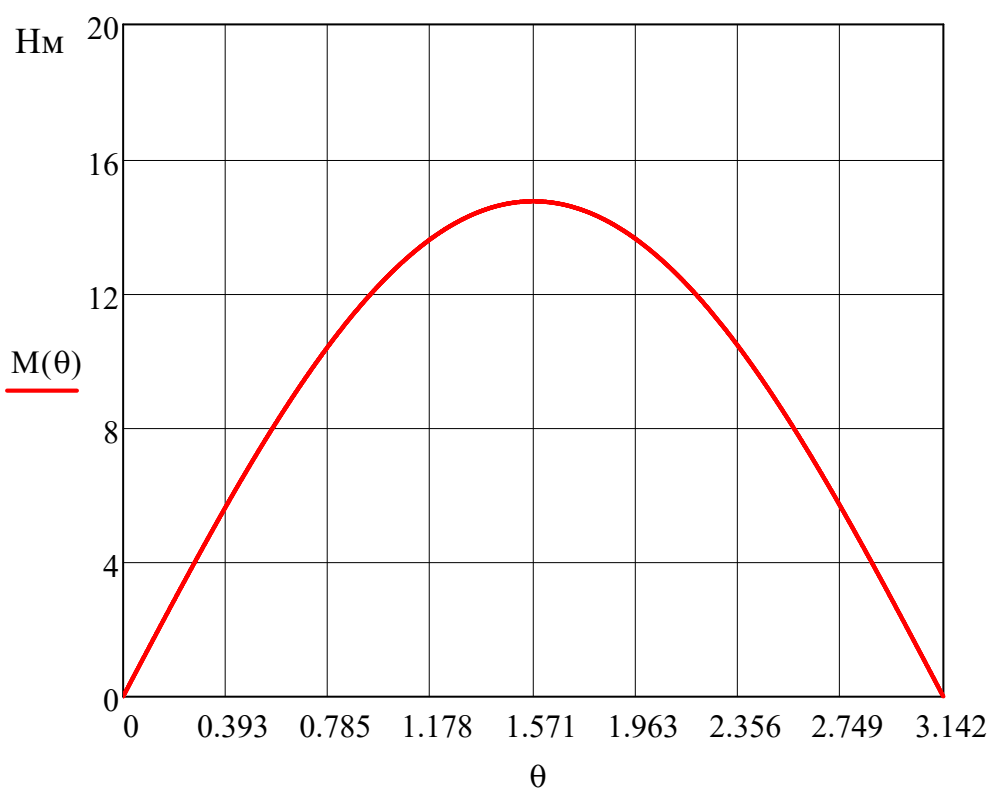


Рис. 3.4. Кутова характеристика  $M(\theta)$  у абсолютних одиницях

## U-подібні характеристики

Задаючись рядом значень струму збудження від 0 до 3 у в.о. при різноманітних активних потужностях  $P_1$ , розраховуються U-подібні характеристики.

ЕРС х.х.

$$E_0(i_f) = U_1 \cdot \Phi_B(i_f) .$$

Квадрат опору

$$Z = R_1^2 + (X_\sigma + X_a)^2 .$$

Розрахункові коефіцієнти:

$$a = Z^2 ;$$

$$E(i_f, P) = (E_0(i_f))^2 - \frac{2P \cdot P_{2H} \cdot R_1}{m_1} - U_1^2 ;$$

$$b(i_f, P) = 2 \cdot E(i_f, P) \cdot Z + 4 \cdot U_1^2 \cdot (X_\sigma + X_a)^2 ;$$

$$c(i_f, P) = (E(i_f, P))^2 + 4 \cdot \frac{(X_\sigma + X_a)^2 \cdot (P \cdot P_{2H})^2}{m_1^2} .$$

Струм стагора у відносних одиницях

$$I_a(i_f, P) = \frac{1}{I_{1n}} \cdot \sqrt{\frac{b(i_f, P) - \sqrt{(b(i_f, P))^2 - 4a \cdot c(i_f, P)}}{2 \cdot a}} .$$

На рис.3.5 наведено U-подібні характеристики, що розраховано за вказаним алгоритмом для різних значень активної потужності.

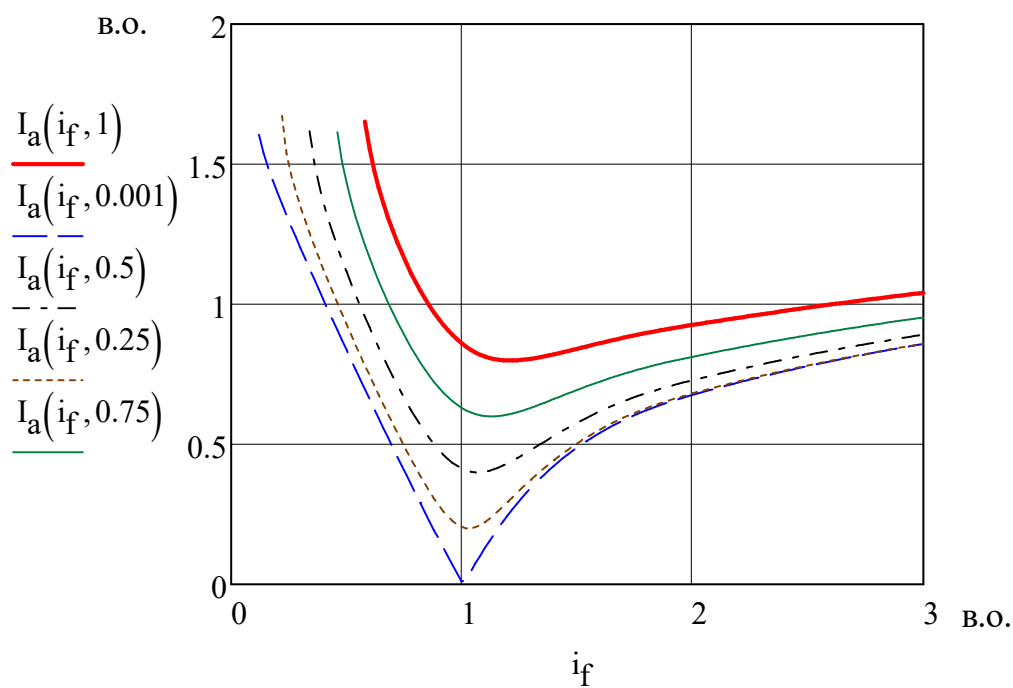


Рис. 3.5. U-подібні характеристики

|                |              |          |                                                                                     |      |                         |      |        |
|----------------|--------------|----------|-------------------------------------------------------------------------------------|------|-------------------------|------|--------|
|                |              |          |                                                                                     |      | 141. 4301з. БР. ПЗ. Р4. |      |        |
|                |              |          |                                                                                     |      |                         |      |        |
| Зм.            | Лист         | № докум. | Підпис                                                                              | Дата | ОХОРОНА ПРАЦІ           |      |        |
| Розроб.        | Лісіцин К.О. |          |  |      |                         |      |        |
| Керівник       | Кімстач О.Ю. |          |  |      |                         |      |        |
| Консульт.      |              |          |                                                                                     |      |                         |      |        |
| Н. контр.      |              |          |                                                                                     |      |                         |      |        |
| В.о. зав. каф. | Обрубов А.В. |          |  |      | НУК                     |      |        |
|                |              |          |                                                                                     |      | Лім.                    | Лист | Листів |
|                |              |          |                                                                                     |      |                         | 45   | 13     |

## РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

### Вступ

Система законодавчих актів і відповідних їм соціально-економічних, технічних, лікувально-профілактичних і організаційних заходів, що забезпечують безпеку, збереження здоров'я й працездатності людини в процесі праці, – це й називається Охорона праці.

На дотримання трудового законодавства спрямовані організаційні заходи, які ґрунтуються на Конституції України, на Кодексі законів про працю, на правилах, нормах та інструкціях з техніки безпеки.

Технічні заходи спрямовані на запобігання працюючих від різного роду травм і нещасних випадків, на полегшення праці й усунення причин, що викликають травматизм і шкідливі впливи на організм людей.

Заходи лікувально-профілактичні (виробнича санітарія) спрямовані на забезпечення здоровіших умов праці (раціональне освітлення робочих місць, пристрій побутових, службових приміщень та ін.).

Слід віднести до основних причин травматизму й фактори, що виникають у результаті недоліків в організації й керуванні ремонтними роботами на суднах. Керування діяльністю суднових підрозділів слід розглядати як комплекс організаційно-технічних заходів (застосування раціональних форм і методів навчання, профілактика травматизму й т.п.), спрямованих на забезпечення безпеки методів праці на суднах у різних кліматичних умовах плавання й особливо в штормову погоду, коли виникають несправності на судні через поломку головної енергоустановки або судно знеструмлене.

Головним завданням охорони праці на судні є профілактика попереджень аварій і небезпек, які можуть виникнути в процесі проведення монтажних робіт (заміна втулок головного двигуна, поршня та ін.).

Застосування нової техніки, прогресивних методів організації праці й технології ремонту, удосконалювання організації ремонтних робіт, застосу-

вання сучасних захисних засобів і пристосувань сприяють поліпшенню умов праці на суднах.

Комплекс заходів щодо охорони праці в судноремонті включає:

- систематичну перевірку знань і дотримання кожним членом екіпажа судна інструкцій, правил і норм по безпечних методах праці, експлуатації машин і механізмів та іншого судового встаткування. Порушення техніки безпеки повинне розглядатися як надзвичайна подія з розбором на нарадах, обговоренням у робочих бригадах і вахтах;
- проведення інструктажу (для знову прибулих) по техніці безпеки, пожежної безпеки й наданню долікарської допомоги;
- використання наочної агітації, листків сатири, стенди газет «За безпеку праці», організація кабінетів і куточків охорони праці із забезпеченням їх літературою, інструкціями й правилами, макетами, відеофільмами й іншими матеріалами;
- технічне переоснащення робочих місць із заміною морально застарілого обладнання й інструмента, впровадження нової організації праці, впровадження звукоізолюючих і звуковбирних пристроїв і пристосувань, знаків безпеки на суднах;
- зміцнення трудової й виробничої дисципліни серед членів команди й берегових працівників (судно в заводі або в доці);
- впровадження триступінчастого методу контролю над дотриманням норм і правил охорони праці на суднах;
- оснащення робочих бригад комплектами засобів колективного й індивідуального захисту необхідним оснащенням і пристосуваннями й строгий контроль над використанням;
- проведення перевірок на суднах умов праці й побуту плавскладу;

- перевірку відповідності професіям і умовам праці, а саме: охорони праці працюючих і застосовуваних засобів індивідуального захисту, створення нових, більш ефективних засобів;
- прискорення впровадження нових розробок по охороні праці, дотримання вимог діючих стандартів по охороні праці в проектній, конструкторській і технологічній документації;
- розробку комплексних планів поліпшення умов праці і його охорони, санітарно-оздоровчих заходів.

#### 4.1. Основні причини електротравматизму

На суднах основними причинами електротравматизму є:

- невиконання організаційних і технічних заходів, передбачених Правилами технічної експлуатації електроустановок споживачів і Правилами техніки безпеки при експлуатації електроустановок споживачів при провадженні робіт в електроустановках;
- несвоєчасний і неякісний інструктаж на робочому місці, відсутність навчання правилам техніки безпеки;
- провадження робіт під напругою без дотримання правил електробезпеки;
- незадовільне огороження струмоведучих частин;
- відсутність захисного заземлення (занулення) металевих корпусів електроустаткування й ручних електричних машин;
- недотримання вимог електробезпеки при експлуатації нагрівальних приладів;
- відсутність нагляду за електроустановками, що перебувають під напругою;
- помилкові й неузгоджені дії обслуговуючого персоналу;

- неправильна експлуатація переносних електричних світильників понад 42 вольти (36 вольт);
- виробництво електрозварювальних робіт з порушенням правил техніки безпеки.

Випадки поразки електричним струмом відбуваються при виконанні ремонтно-монтажних робіт іноді в результаті дотику працюючих до корпусів електроустановок, що перебувають під напругою, у результаті несправності ізоляції. Основну небезпеку представляють застосовувані саморобні нагрівальні прилади електрострумом.

Найбільша кількість травм відбувається при використанні вантажопідйомних стріл і суднових кранів. Основною причиною таких травм є невиконання вимог. Ці порушення відбуваються в результаті неправильного оформлення вбрання допуску на виробництво даного виду робіт, а також незадовільної організації технічного нагляду з боку інженерно-технічних працівників, відповідальних за виконання робіт вантажопідйомного встаткування на судах.

#### **4.2. Електробезпека встановлення електроустановок**

У суднобудуванні, як правило, використовують трифазний змінний струм напругою 380/220 В.

При встановленні електроустановок на судах необхідно строго дотримувати Правил встановлення електроустановок і вимоги інших нормативних документів.

Електробезпека у суднобудуванні багато в чому визначається правильним виконанням електричних мереж, способами розподілу електричної енергії й підключення переносних електроприймачів.

Щит живлення з берега рекомендується виконувати в кормовій частині головної палуби водозахисного виконання з автоматом підключення через запобіжники.

Відстань від струмоведучих частин щита живлення з берега до палуби повинне бути не менш 1,75 метра, а між проводами введення не менш 200 мм.

При установці енергоспоживачів на судні необхідно передбачати можливість відключення електроустановок у межах окремих об'єктів. Це повинне враховуватися в проекті судна, де визначається черговість підключення й відключення споживачів.

Повинні виконуватися роботи електротехнічним персоналом, пов'язані із приєднанням або від'єднанням проводів, ремонтом, налагодженням, профілактикою й випробуванням електроустановок, що мають певну групу по електробезпеці. Приєднання до електричного кола пересувних електроустановок, ручних електричних машин і переносних електричних світильників за допомогою з'єднань, що задовольняють вимогам електробезпеки, дозволяється виконувати персоналу, допущеному до роботи з ними, навіть прибиральниця повинна мати другу електрогрупу допуску при вбиранні приміщень, які обладнані розетками й вимикачами електромережі, що перебувають під напругою.

Установка запобіжників, електричних ламп повинні виконуватися електромонтером, що застосовують засоби індивідуального захисту. Монтажні й ремонтні роботи на електричних мережах і електроустановках повинні проводитися після повного зняття з них напруги й при здійсненні заходів щодо забезпечення безпечного виконання робіт.

Експлуатація й монтаж електромереж і електротехнічних виробів повинні виключати можливість теплових проявів електричного струму, які можуть призвести до загоряння ізоляції або горючих матеріалів.

Захист електроустановок і електричних мереж відтоків, що виникають між фазами короткого замикання на корпус, повинна бути забезпечена за допомогою установки запобіжників з каліброваними плавкими вставками або застосуванням автоматичних вимикачів.

Здійснюється живлення електроприймачив від розподільних щитів, а також через допоміжні щити аварійного підключення.

Керування окремими електроприймачами проводиться за допомогою пускових пристроїв, що містять апарати захисту.

Пускові, вступні й розподільні пристрої вибираються із урахуванням умов роботи, кількості й потужності споживачів. Їх установлюють у легко доступні для обслуговуючого персоналу місцях. Для цього передбачений захист від атмосферних опадів: заливання, бризів і снігопадів.

Слід застосовувати інвентарні пристрої для дотримання технічних і організаційних заходів безпеки, передбачених чинними правилами щоб уникнути електротравматизму, необхідних для виконання ремонтних робіт, дотримувати правил допуску до роботи з електроустановками й здійснювати нагляд за працюючими.

Електроустановки на ремонтному майданчику повинні мати маркування, написи, цифрові й літерні позначення, що вказують призначення розподільних, пускових пристроїв і іншого встаткування, а також кабелів живлення. Струмоведачі шини повинні бути пофарбовані у відповідні кольори: при змінному струмі фаза А – у жовтий колір, фаза В – у зелений колір, фаза С – у червоний колір; при постійному струмі позитивна шина (+) – у червоний колір, а негативна шина (–) – у синій колір.

### 4.3. Електрозахисні засоби

На ремонтному майданчику на суднах у якості захисних засобів при експлуатації електроустановок застосовуються прилади, інструменти, пристосування й пристрої, що забезпечують захист людей від поразки електрич-

ним струмом, впливу електричної дуги, від падіння з висоти, механічних ушкоджень і т.п.

Підрозділяються ізолюючі захисні засоби на основні й додаткові.

До основних захисних засобів відносяться засоби, ізоляція яких надійно витримує робочу напругу електроустановок і які дозволяють доторкатися до струмоведучих частин, що перебувають під напругою. В установках на напругу до 1000 вольтів до таких засобів відносяться:

- діелектричні рукавички;
- інструмент слюсарно-монтажний з ізолюючими рукоятками;
- показчики напруги і електровимірювальні кліщі.

До додаткових захисних засобів в електроустановках напругою до 1000 вольтів відносяться:

- діелектричні калоші;
- діелектричні килимки;
- ізолюючі підставки.

Не допускається застосування інструмента слюсарно-монтажного з ізолюючими рукоятками для роботи в середовищі, що руйнує метал й ізоляцію або насиченим струмопровідним пилом, водяними парами, а також в умовах, коли можливо безпосереднє влучення води на ізоляцію інструмента.

Застосовують спеціальні показчики напруги змінного струму для перевірки наявності напруги в електроустановках напругою до 500 вольтів.

Застосовують ізолюючі захисні засоби тільки на відповідну напругу при наявності клейма з датою їх випробування й при відсутності ушкоджень.

Для роботи на висоті до захисних засобів відносяться пристосування:

- запобіжні монтерські пояси;
- канати, що страхують;
- телескопічні вишки; сходи-драбини й приставні сходи.

Ці пристосування повинні періодично випробуватися у встановлений термін.

Пояса випробовуються вантажем масою 225 кг протягом 5 хвилин.

Сходи-драбини й приставні сходи повинні перебувати на обліку, мати номери й таблички із вказівкою об'єкта, за якими вони закріплені.

Захисними засобами від електричної дуги, продуктів горіння й механічних ушкоджень є:

- захисні окуляри;
- брезентові рукавиці;
- протигази й респіратори.

Окуляри повинні бути закритого типу, з бічними лускатими обіймами, оправою, обшитою м'якою шкірою в місцях зіткнення з особою, тугоплавкими й стійкими проти механічних ушкоджень стеклами.

Шлангові протигази застосовуються для захисту від отрути газами при аваріях, що супроводжуються розплавлюванням металу й горінням ізолюючих матеріалів.

Попереджувачі знаки необхідно вивішувати при підготовці робочого місця до провадження робіт, призначення й характеристики яких зазначені в Правилах застосування й випробування засобів захисту, використовуваних в електроустановках судна.

#### **4.4. Перша допомога потерпілим від електричного струму**

Необхідно застосовувати термінові заходи при поразці людини електричним струмом для найшвидшого звільнення його від дії струму й негайного надання йому першої допомоги. Найменше зволікання спричиняє важкі, а часом непоправні наслідки.

Найшвидше звільнення людини від дії електричного струму може бути досягнуте шляхом відключення струму найближчим вимикачем або роз-

риву колу струму. При можливості відключення установки потрібно відокремити потерпілого від струмоведучих частин. При напрузі до 1000 В для цього слід використовувати захисні засоби (діелектричні рукавички, килимки й ін.), а також сухі предмети, що не проводять струм (дошка, тичина, одяг, канат і т.п.). При цьому братися за одяг потерпілого можна тільки в тому випадку, якщо вона суха й відстає від тіла.

Перед відключенням струму при поразці людини на висоті вживають заходів проти падіння потерпілого.

Слід негайно викликати лікаря після звільнення потерпілого від дії електричного струму, визначити стан потерпілого і якщо буде потреба, не очікуючи прибуття лікаря, приступити до виконання штучного дихання й непрямому масажу серця.

Необхідно звільнити потерпілого від його одягу, що стискає, перед виконанням штучного дихання (розстебнути воріт, розв'язати шарф, вийняти зубні протези і т.п.).

Найефективнішою допомогою в цей час є спосіб штучного дихання «з рота в рот» і «з рота в ніс», що полягає у вдмухуванні повітря в легені потерпілого через його рот або ніс із рота, що виявляє допомогу. Якщо буде потреба цей простий і загальнодоступний спосіб штучного дихання може застосовуватися одним, що рятує одночасно з непрямим масажем серця.

Потерпілий не повинен залишатися на сирій землі, бетоні, палубі при наданні першої допомоги. Необхідно підстелити під нього що-небудь тепле й укрити. Усі ці дії потрібно робити швидко, не перериваючи штучного дихання потерпілому.

#### **4.5. Безпека при експлуатації синхронних машин.**

При експлуатації генераторів і синхронних збудників (СЗ) забезпечується їх безперебійна робота в припустимих режимах, надійна дія систем

збудження, охолодження, маслопостачання, пристроїв контролю, захисту, автоматики й діагностики.

Генератори повинні вводитися в роботу на основному збудженні, а автоматичні регулятори збудження (АРЗ) постійно включені в роботу.

Автоматичні регулятори збудження та пристрою форсування робочого збудження настраюються так, щоб при заданому зниженні напруги в мережі забезпечувалося:

- гранична напруга, що встановилася, збудження не нижче дворазового в робочому режимі, за винятком окремих типів машин;
- номінальна швидкість наростання напруги збудження;
- автоматичне обмеження заданої тривалості форсування.

Пристрої пожежогасіння генераторів повинні перебувати в постійній готовності, що забезпечує можливість їх швидкого приведення в дію.

При пуску й під час експлуатації генераторів і СЗ повинен здійснюватися контроль:

- електричних параметрів статора, ротора й системи збудження;
- температури обмотки й стали статора середовищ, що охолоджують (у тому числі й устаткування системи збудження), ущільнень вала, підшипників і підп'ятників;
- тиску, включаючи перепад тисків на фільтрах, питомого опору й витрати дистилату через обмотки й інші активні і конструктивні частини;
- тиску й чистоти водню;
- тиску й температури масла, а також перепаду тисків масло-водень в ущільненнях вала; герметичності систем рідинного охолодження; вологості газового середовища, що заповнює корпус турбогенераторів;
- рівня масла в демпферних баках і поплавкових гідрозатворах турбогенераторів, у масляних ваннах підшипників і підп'ятників гідрогенераторів.
- вібрації підшипників і контактних кілець турбогенераторів, хрестовин і підшипників гідрогенераторів.

Генератори, як правило, повинні включатися в мережу способом точної синхронізації.

Швидкість підвищення напруги на генераторах і синхронних компенсаторах не обмежується.

Швидкість набору й зміни активного навантаження для всіх генераторів визначається умовами роботи первинного двигуна.

Швидкість зміни реактивного навантаження генераторів і синхронних компенсаторів з непрямим охолодженням обмоток не обмежується.

На турбогенераторах з безпосереднім охолодженням обмоток ця швидкість у нормальних режимах не повинна перевищувати швидкість набору активного навантаження, а в аварійних умовах не обмежується;

Номінальна потужність генераторів при номінальному коефіцієнті потужності і номінальна потужність синхронних компенсаторів зберігається при одночасних відхиленнях напруги до  $\pm 5\%$  і частоти до  $\pm 2,5\%$  номінальних значень за умови, що при роботі з підвищеною напругою й зниженою частотою сума абсолютних значень відхилень напруги й частоти не перевищує 6 %, якщо в заводській документації на окремі типи машин не застережені інші умови по відхиленню напруги й частоти.

Найбільший струм ротора, отриманий при роботі з номінальною потужністю й при відхиленнях напруги в межах  $\pm 5\%$ , довгостроково допустимо при роботі з номінальними параметрами охолодних середовищ.

У випадку роботи із тривалою максимальною потужністю найбільший струм ротора при відхиленні напруги до  $\pm 5\%$  довгостроково допустимо тільки при відповідних параметрах охолодження.

Для всіх генераторів і синхронних збудників найбільша робоча напруга не перевищує 110 % номінальної. При напрузі вище 105 % припустима повна потужність генератора й збудника встановлюється в заводській документації або за результатами теплових випробувань.

При напрузі на генераторі або збудники нижче 95 % номінального,

струм статора не допускається вище 105 %;

Тривале перевантаження генераторів і СЗ по струму понад значення, припустимого при даних температурі й тиску охолодного середовища, не допускається.

В аварійних умовах генератори й СЗ дозволяється перевантажувати по струмах статора й ротора згідно із заводською документацією або за результатами теплових випробувань;

Робота генераторів (СЗ) з появою однофазного замикання на землю в обмотці статора або колі генераторної напруги не допускається;

Допускається тривала робота генераторів (СЗ) з різницею струмів у фазах на рівні, що не перевищують, заводської документації.

У всіх випадках у жодній з фаз струм не повинен перевищувати номінального значення;

|     |      |          |        |      |                         |      |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|     |      |          |        |      | 141. 4301з. БР. ПЗ. Р4. | Лист |
|     |      |          |        |      |                         | 57   |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

## ВИСНОВКИ

1. Розроблений синхронний збудник відповідає технічному завданню і спроможний виконувати відповідні функціональні задачі.
2. Головний показник ефективності роботи СЗ (ККД) має номінальне значення 85,8 %.
3. СЗ характеризується жорсткістю зовнішньої характеристики у відповідних межах : при двократному підвищенні струму якорю напруга знижується приблизно на 7,5 %.
4. Відповідно до кутових характеристик СЗ номінальний кут навантаження  $\theta = 0,353$ , а перевантажувальна здатність – 2,89.

|       |      |          |        |      |                     |      |
|-------|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|       |      |          |        |      | 141. 4301з. БР. ПЗ. | Лист |
| Змін. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                     | 58   |

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Белікова Л. Я. Електричні машини: Навчальний посібник для студ. вищ. навч. за-кладів /Л. Я. Белікова, В. П. Шевченко. – О.: Наука і техніка, 2012.– 480 с.
2. Кімстач О.Ю. Індивідуальний комплект навчально-методичних матеріалів з дисципліни „Основи автоматизованого проектування електромеханічних пристроїв та електромеханічних систем”: Методичні вказівки. – Миколаїв: ІЗДО НУК, 2007. – 52 с.
3. Кімстач О.Ю. Індивідуальний комплект навчально-методичних матеріалів з дисципліни „Спеціальні електричні машини”: Методичні вказівки. – Миколаїв: ІЗДО НУК, 2008. – 40 с.
4. Кімстач О.Ю. Проектування асинхронних двигунів малої і середньої потужності загального призначення з короткозамкненим ротором: навчальний посібник. – Миколаїв; НУК, 2015. – 188 с.
5. Кімстач О.Ю., Гусін Є.Ю. Вплив закону регулювання автоматичного регулятора збудження на перехідні процеси у синхронних генераторах // Сборник публикаций мультидисциплинарного научного журнала «Архивариус» по материалам XXXXIV международной научно-практической конференции: «Наука в современном мире». – К.: Мультидисциплинарный научный журнал «Архивариус», 2019. – С. 63-67.
6. Кімстач О.Ю., Лупашку І.О. Ефект застосування багатофазних електроенергетичних систем на суднах // Актуальные научные исследования в современном мире // Журнал – Переяслав-Хмельницкий, 2019. – Вып. 9(53), ч. 1 – С. 93-97.
7. Метельський В.П. Електричні машини та мікромашини / В.П. Метельський. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2001. – 600 с.
8. Новогрецький С.М., Кімстач О.Ю. Методичні вказівки до виконання контрольних робіт з курсу „Електроматеріалознавство”. – Миколаїв: НУК,

2007. – 46 с.

9. Осташевський М. О., Юр'єва О. Ю. Електричні машини і трансформатори: навч. посіб. / за ред. В. І. Мілих. Київ: Каравела, 2018. - 452 с.

10. Півняк Г.Г., Довгань В.П., Шкрабець Ф.П. Електричні машини: Навчальний посібник. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2003. – 327 с.

11. Проектування електричних машин: Навчальний посібник / Д.В. Ципленков, О.Б. Іванов, О.В. Бобров, В.В. Кузнецов, В.В. Артемчук, М.О. Баб'як ; Нац. техн. ун-т «Дніпров-ська політехніка». – Д. : НТУ «ДП», 2020. – 408 с.

12. Ткачук В. Електромеханотроніка: Навчальний посібник. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка». 2001. – 404 с.

13. Яцун М.А. Електричні машини. Навч. посібник. – Львів, Видавн. Державного університету “Львівська політехніка”, 1999, – 427 с.

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