

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки

Кафедра електричної інженерії суднових та роботизованих комплексів

« Допущений до захисту »

Завідувач кафедри ЕІС та РК

к.т.н., доцент  Д. В. Костенко

“ 12 ” 06 20 26 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти « бакалавр »

на тему: Удосконалення обладнання для спуску та підйому підводної техніки у складі науково-дослідного судна

Виконав: студент 4 курсу, групи 4361

Спеціальність:

141 « Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка »

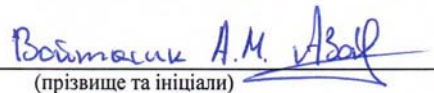


Матвеев А. С.
(прізвище та ініціали)

Керівник

Клочков О. П.
(прізвище та ініціали)

Рецензент


(прізвище та ініціали)

м. Миколаїв
2026 рік

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики і електротехніки

Кафедра електричної інженерії суднових та роботизованих комплексів

Освітньо-кваліфікаційний рівень: бакалавр

Галузь знань: 14 Електрична інженерія

Спеціальність: 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Гарант освітньої програми

д.т.н., професор _____ Я. Б. Волянська

“ 22 ” _____ 04 2026 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
на здобуття ступеня вищої освіти бакалавр**

Студенту Матвєєву Артему Сергійовичу

1. Тема роботи: Удосконалення обладнання для спуску та підйому підводної техніки у складі науково-дослідного судна

Керівник роботи: канд. техн. наук, доцент кафедри ЕІС та РК Ключков О. П.

затверджені наказом вищого навчального закладу від «22.04» 20 26 року № 126 уг.

2. Термін подання студентом роботи: 10 червня 2026 року

3. Вхідні дані до роботи: технічні характеристики науково-дослідного судна, електромеханічні характеристики електричних двигунів, призначення та технічні властивості пристроїв для спуску та підйому підводної техніки

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

1 Призначення та область застосування обладнання для спуску та підйому підводної техніки

2 Технічні характеристики обладнання для спуску та підйому підводної техніки

3 Опис та обґрунтування прийнятих рішень при удосконаленні обладнання спуску та підйому підводної техніки

4 Розрахунки, які підтверджують працездатність обладнання спуску та підйому підводної техніки

5. Охорона праці

5. Перелік презентаційних матеріалів (з точним зазначенням назв):

1. Титульний слайд 2. Мета і задачі роботи 3. Креслення та специфікація

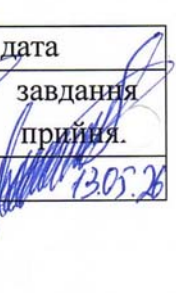
асинхронного двигуна 4. Схема керування асинхронним двигуном

5. Механічна характеристика електродвигуна 6. Технічні характеристики

асинхронного двигуна 7. Зовнішній вигляд електричної лебідки

8. Розрахунок магнітного ланцюга електродвигуна 9. Висновки

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
ОП	канд. техн. наук, доцент кафедри ЕІС та РК Клочков О.П.	 22.04.26	 23.05.26

7. Дата видачі завдання 15 квітня 2026 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Призначення та область застосування	22.04.2026	вик.
2	Технічні характеристики	27.05.2026	вик.
3	Опис та обґрунтування прийнятих технічних рішень	20.05.2026	вик.
4	Розрахунки, що підтверджують працездатність	03.06.2026	вик.
5	Охорона праці	13.05.2026	вик.
6	Оформлення пояснювальної записки та супровідних документів	10.06.2026	вик.

Студент

(підпис)

Матвеев А. С.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Клочков О. П.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Розраховано трифазний асинхронний двигун з фазним ротором потужністю 3 кВт для приводу лебідки у складі обладнання для механізму спуску та підйому, який має клас захисту IP44. Механізм встановлено на науково-дослідному судні.

Детально розглянуті типи науково-дослідних суден, склад обладнання для механізмів спуску та підйому підводно-технічних засобів та види захисту електродвигунів від дії агресивного морського середовища.

Розроблено схему керування електродвигуном механізму спуску та підйому підводно-технічних засобів, який керується за допомогою командоконтролера та приведені його механічні характеристики. Розроблено креслення загального виду асинхронного двигуна та його схема.

Розглянуто заходи з охорони праці при обслуговуванні механізмів спуску та підйому підводно-технічних засобів.

Ключові слова: науково-дослідне судно, вантажний пристрій, асинхронний двигун, обладнання для спуску та підйому, підводна техніка.

ABSTRACT

A three-phase asynchronous motor with a phase rotor with a power of 3 kW has been calculated for driving a winch as part of the equipment for the lowering and lifting mechanism, which has a protection class of IP44. The mechanism is installed on a research vessel.

The types of research vessels, the composition of the equipment for the lowering and lifting mechanisms of underwater technical means and the types of protection of electric motors from the effects of an aggressive marine environment have been considered in detail.

A control scheme for the electric motor of the lowering and lifting mechanism of underwater technical means, which is controlled by a command controller, has been developed and its mechanical characteristics have been given. A drawing of the general type of an asynchronous motor and its scheme have been developed.

Occupational safety measures when servicing the lowering and lifting mechanisms of underwater technical means have been considered.

Keywords: research vessel, cargo device, asynchronous motor, lowering and lifting equipment, underwater equipment.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів.....	6
Вступ.....	7
1 Призначення та область застосування обладнання для спуску та підйому підводної техніки.....	8
1.1 Призначення обладнання для спуску та підйому у складі науково-дослідного судна.....	8
1.2 Область застосування обладнання для спуску та підйому у складі науково-дослідного судна.....	10
2 Технічні характеристики обладнання для спуску та підйому підводної техніки.....	13
2.1 Технічні характеристики науково-дослідного судна.....	13
2.2 Технічні характеристики механізмів спуску та підйому підводної техніки у складі науково-дослідного судна.....	14
3 Опис та обґрунтування прийнятих рішень при удосконаленні обладнання спуску та підйому підводної техніки.....	16
3.1 Опис механізмів та захист електродвигунів.....	16
3.2 Автоматизація кранового електропривода пристрою спуску та підйому підводної техніки.....	20
3.3 Опис схеми керування електродвигуном пристрою спуску та підйому підводної техніки.....	21
4 Розрахунки, які підтверджують працездатність обладнання спуску та підйому підводної техніки.....	26
4.1 Розрахунок магнітного ланцюга електродвигуна.....	26
4.2 Розрахунок сердечника статора асинхронного електродвигуна та параметрів обмотки статора.....	27
4.3 Розрахунок магнітного кола при неробочому русі.....	38

	5
4.4 Розрахунок активного та індуктивного опору розсіювання обмотки статора.....	41
4.5 Розрахунок параметрів номінального режиму.....	50
4.6 Розрахунок максимального моменту.....	55
4.7 Розрахунок початкового струму і початкового пускового моменту.....	57
4.8 Розрахунок маси двигуна і динамічного моменту інерції ротора.....	65
5 Охорона праці.....	68
5.1 Аналіз небезпечних і шкідливих чинників, характерних при роботі електрообладнання пристроїв для спуску та підйому.....	69
5.2 Розробка заходів з техніки безпеки при роботі в електроустановках, які керують пристроями для спуску та підйому.....	72
Висновки.....	74
Перелік посилань.....	75

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ,
ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

АД	– асинхронний двигун
ЕРС	– електрорушійна сила
ККД	– коефіцієнт корисної дії
МРС	– магнітно-рушійна сила
НР	– неробочий рух
НДС	– науково-дослідне судно
ПА	– підводний апарат
ПТР	– підводно-технічна робота
СПП	– спуско-підіймальний пристрій

ВСТУП

Клас прив'язного підводного апарата за масою поділяється на п'ять класів – мікро, міні, середні, важкі та надважкі. У випадку класів мікро, міні та нижньої межі середніх ще можливо передбачити операції спуску та підйому без застосування підйомних пристроїв, то при масі апарата від 120 кг їх застосування є необхідним.

Не спеціалізоване судно як судно забезпечення може бути обладнано пристроєм для спуску та підйому, яке можливо пристосувати для таких задач, коли вантажем є підводний апарат. У випадку спеціалізованого судна-носія пристрій для спуску та підйому розташовується у штатному місці, зазвичай у кормі, та може мати електричний чи гідравлічний привід.

Ключовими елементами пристрою для спуску та підйому є механічна частина, привід механізмів та система керування, яка має забезпечити безпечну експлуатацію цієї складової підводної системи. Це має бути передбачено правилами, яка регламентують дії при спуску підводного апарата на воду та його підйому на борт судна забезпечення.

У роботі розглядається проектування головного елемента привода пристрою для спуску та підйому – трифазного електродвигуна з фазним ротором.

1 ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ОБЛАСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СПУСКУ ТА ПІДЙОМУ ПІДВОДНОЇ ТЕХНІКИ

1.1 Призначення обладнання для спуску та підйому у складі науково-дослідного судна

Сучасне науково-дослідне судно (НДС) має у своєму штаті підводний апарат (ПА) для проведення підводно-технічних робіт (ПТР): глибоководних досліджень; підводної інспекції; забезпечення бурових робіт, а також підтримки пошуково-рятувальних операцій.

Як приклад НДС розглянемо деякі варіанти їх виконання.

Норвезьке судно для забезпечення ПТР “SevenViking”, 2013 року спуску, зі швидкістю ходу 14 вузлів, 90 чол. екіпажу, вантажопідйомністю пристрою (крану) – 135 тон на висоту 10 м. Зображення судна представлено на рис. 1.1.



Рисунок 1.1 – Загальний вид судна “SevenViking”

Американське судно виготовлене у Вашингтоні 2009 року “GrantCandies”, максимальна швидкість 12 вузлів, дедвейтом 3672 т, вантажопідйомністю одного пристрою (крану) – 150 тон на висоту 10 м. Загальний вид судна представлено на рис. 1.2.



Рисунок 1.2 – Загальний вид судна “GrantCandies”

Науково-дослідне судно “КМ • Ice 3 (L2) special purpose ship” 1975 року виготовлення у США, водотоннажністю 7002 т, максимальна швидкість 10 вузлів, вантажопідйомністю спуско-підйомального пристрою – 20 т, головної гідравлічної лебідки – 34 т. Загальний вид судна представлено на рис. 1.3.



Рисунок 1.3 – Загальний вид судна “КМ • Ice 3 (L2) special purpose ship”

1.2 Область застосування обладнання для спуску та підйому у складі науково-дослідного судна

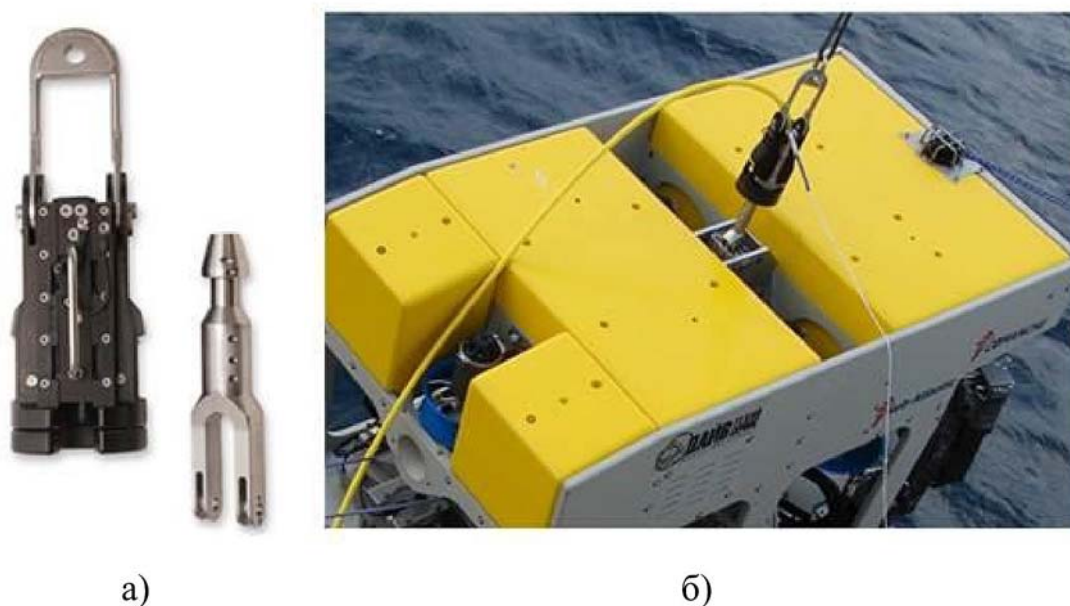
Численні дослідження океану за допомогою спеціалізованої підводної техніки пов'язані з виконанням операцій спуску і підйому незалежно від призначення і масогабаритних показників ПА, що використовуються. Зазначені операції є складними, високовартісними і дуже відповідальними, особливо при виконанні оперативних ПТР або пошуково-рятувальних робіт. Термінові роботи характерні тим, що на їх виконання не завжди надається достатньо часу для очікування сприятливих погодних умов і робочі занурення не рідко виконують при відчутному хвилюванні моря, вночі, при від'ємних температурах повітря і т.д. Варто зазначити, що погані метеоумови і темний час доби можуть наступити і при виконанні планових робіт.

Якщо проектуванню ПА приділена достатня увага, то до спуско-підймальних пристроїв (СПП), як до складової прив'язної підводної системи, необґрунтовано приділяють менше значення. У світі існують не один десяток фірм, основний напрямок яких є створення СПП. Свою продукцію подібні компанії найчастіше виготовляють у вигляді універсального пристрою під певний типорозмір апаратів або під конкретний апарат. Огляд конструктивних особливостей і умов експлуатації спуско-підймальних пристроїв для ПА дає підставу вважати, що завдання створення ефективних СПП для різного класу підводної техніки є дуже актуальною.

Робота спуско-підймальних пристроїв в будь-яких режимах завжди веде до небезпеки ушкоджень високовартісного підводно-технічного обладнання. Наприклад, при сильних зрушеннях можливі удари підводного апарата, який підіймається на борт або спускається на воду. Практика показує, що навіть невелике хвилювання моря викликає відчутну хитавицю судна забезпечення, а керування спуско-підймальним пристроєм знаходиться на палубі, що перетворює спуск та підйом у непросту задачу. Досить часто виникають ситуації, в яких при

операції спуску ПА спочатку опускають на набіглу хвилю, яка у своєму максимумі піднімає його вгору, послаблюючи при цьому вантажний трос, але потім гребінь хвилі змінюється западиною, і апарат, не підтримуваний хвилею, падає вниз, викликаючи при цьому різкий натяг вантажного троса. В результаті пікових ривків можливе руйнування місця кріплення тросів, а також пошкодження внутрішніх систем ПА.

На рис.1.4 представлено механізм спуску та підйому для ПА «Comanche».



а) – зовнішній вигляд; б) – робоче положення на підводному апараті

Рисунок 1.4 – Розчіплювач для підводного апарата «Comanche»

У підводній робототехніці для операцій спуску і підйому поширене застосування штатного суднового вантажопідйомного обладнання. Наприклад, на рис. 1.5 наведено пристрій, що застосовується для спуско-підйомних операцій ПА «Hugin».

Таким чином розглянуто особливості спуско-підйомальних операцій для різних типів підводних апаратів. Наведено деякі конструкції спеціалізованих пристроїв. Запропоновано перспективні напрями удосконалення конструкцій спуско-підйомальних пристроїв.



а)



б)

а) - підйом апарата; б) - спуск апарата

Рисунок 1.5 – Спуско-підймальний пристрій
для автономного ненаселеного підводного апарата «Hugin»

Представлено необхідний комплексний підхід у вирішенні задачі створення ефективних СПП полягає не тільки в застосуванні оригінальних конструкцій і алгоритмів керування складними об'єктами, але і у розширенні спектру застосування накопичених знань в області технічного підходу, використанні сучасних технологій і матеріалів, а також інтеграції наукових знань з практичним досвідом.

2 ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СПУСКУ ТА ПІДЙОМУ ПІДВОДНОЇ ТЕХНІКИ

2.1 Технічні характеристики науково-дослідного судна

Загальна характеристика про науково-дослідне судно «КМ • Ісе 3 (L2) special purpose ship» представлені у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Загальна характеристика науково-дослідного судна «КМ • Ісе 3 (L2) special purpose ship»

№ з/п	Характеристика	Значення
1	Дата побудови	01.03.1975
2	Країна створення	США
3	Габаритна довжина, м	88,5
4	Довжина між перпендикулярами, м	81,1
5	Габаритна ширина (МВ), м	16,49
6	Висота надводного борту (max), м	4,3
7	Осадка у вантажу (SW), м	7,57
8	Висота борту (DM), м	8,17
9	Водотоннажність, т	7002
10	Дедвейт (Двт)	3627
11	Швидкість (max), вуз.	10
12	Валова місткість	3804 МК-1969
13	Чиста місткість	1141 МК-1969

2.2 Технічні характеристики механізмів спуску та підйому підводної техніки у складі науково-дослідного судна

До складу НДС «КМ• Ice 3 (L2) special purpose ship» входять 2 гвинти регульованого кроку з приводом носового 2х860 кВт та кормового 2х900 кВт.

Загальні відомості про електростанцію науково-дослідного судна «КМ• Ice 3 (L2) special purpose ship» представлено у табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики електростанції науково-дослідного судна «КМ• Ice 3 (L2) special purpose ship»

№ з/п	Характеристика	Значення
1	Тип	Дизельне
2	Суднове малов'язке паливо	MGO
3	Потужність головного рушія	2 х 2121 кВт
4	Модель основного рушія	KVMB-12
5	Потужність електродвигуна	2 х 1070 кВт, 2 х 350 кВт

Загальні відомості про спуско-підйомний механізм «PFAFF Germany» науково-дослідного судна представлено у табл.2.3.

Таблиця 2.3 – Технічні характеристики спуско-підйомного механізму «PFAFF Germany»

№ з/п	Характеристика	Значення
1	Модель	031149533
2	Вантажопідйомність на швидкості 1, т	3,2
3	Вантажопідйомність на швидкості 2, т	2,1
4	Діаметр тросу, мм	14
5	Довжина тросу, м	85,6
6	Швидкість підйому, м/хв	6

Основні характеристики електродвигуна лебідки спуско-підйомного механізму «PFAFF Germany» представлені у табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Основні характеристики електродвигуна

№ з/п	Параметр	Значення
1	Номінальна потужність, Вт	3000
2	Кількість фаз, од.	3
3	Частота напруги, Гц	50
4	Номінальна лінійна напруга, В	380
5	Частота обертання об/хв	1500
6	Ступінь захисту від навколишніх впливів	IP23
7	Спосіб охолодження	IC01
8	Кількість пар полюсів, од.	2
9	Клас нагрівостійкості ізоляції	<i>F</i>

Таким чином, представлено у табличному вигляді характеристики НДС та механізмів у його складі.

3 ОПИС ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ПРИЙНЯТИХ РІШЕНЬ ПРИ УДОСКОНАЛЕННІ ОБЛАДНАННЯ СПУСКУ ТА ПІДЙОМУ ПІДВОДНОЇ ТЕХНІКИ

3.1 Опис механізмів та захист електродвигунів

На початку 2013 року була проведена повна ревізія дизель-генераторів, зроблено налаштування паливної апаратури головних двигунів, оновлена і поліпшена система вентиляції машинного відділення, зроблена виїмка гребних валів з заміною дейдвудних ущільнень, повністю очищений по класу SA1 і пофарбований корпус судна, проведені роботи по встановленню системи кондиціонування надбудови, встановлено різне технологічне устаткування, що дозволяє виконувати завдання з використанням 20-метрового поршневого пробовідбірника і автономного ненаселеного підводного апарата «Hugin». У період з 09.12.2013 по 31.12.2013 на судні виконано плановий ремонт для підтвердження класу судна з оглядом в сертифікаційних органах.

Кормова А-подібна рама представлена на рис. 3.1.



Рисунок 3.1 – Кормова А-подібна рама

Спуско-підіймальний механізм наведено на рис. 3.2.



Рисунок 3.2 – Спуско-підіймальний механізм «PFAFF Germany»

Далі приведено загальний вид лебідки з двигуном (рис.3.3), що обрано для проектування.



Рисунок 3.3 – Загальний вигляд електричної лебідки з двигуном



Проста і надійна конструкція електролебідок BETA SILVERLINE в поєднанні з їх високими технічними і якісними показниками забезпечують тривалу безаварійну експлуатацію. Лебідки оснащені рифленим барабаном для упорядкування укладання каната, пультом або щитом керування на кабелі 5 м. Електроживлення лебідок ~ 3ф. / 380В / 50Гц. Закрита циліндрична передача, яка працює в масляній ванні, забезпечує тривалий термін експлуатації і не вимагає обслуговування протягом всього періоду служби. Починаючи з вантажопідйомності від 1000 кг і вище, електролебідки в стандартній комплектації оснащуються електронним захистом від перевантаження.

Температурний діапазон експлуатації від -20°C до $+40^{\circ}\text{C}$.

Креслення електролебідки механізму для спуску та підйому представлено на рис. 3.5.

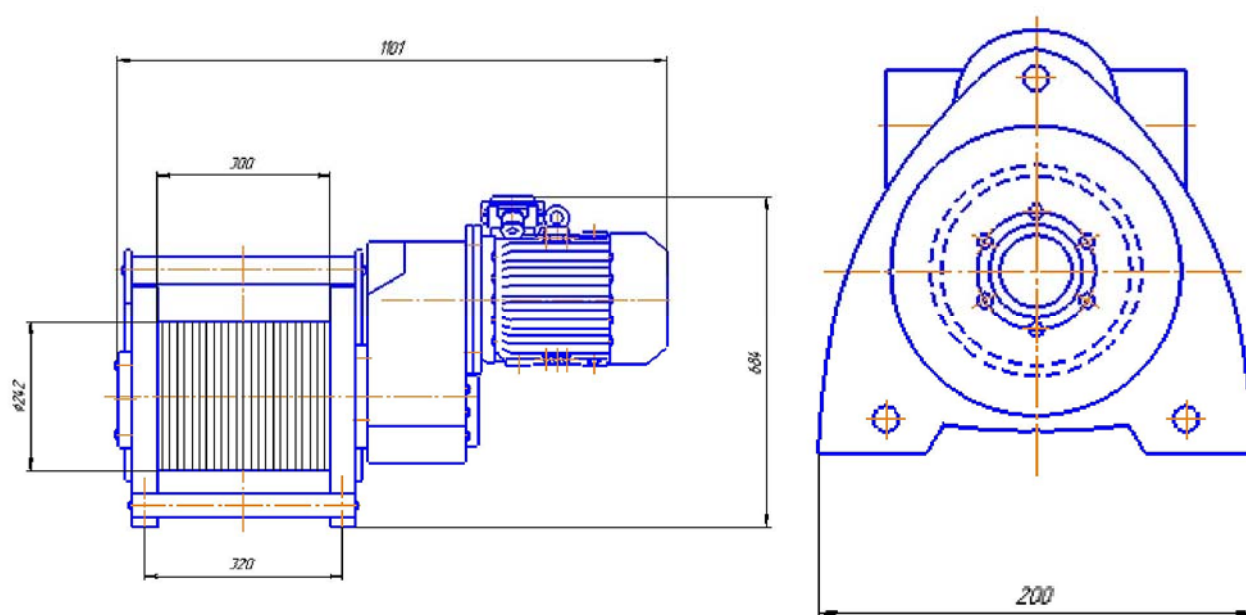


Рисунок 3.5 – Креслення електролебідки механізму для спуску та підйому

Лебідки оснащені потужними електродвигунами на живлення $\sim 3\text{ф. } 380\text{В} / 50\text{Гц}$, клас захисту електродвигунів IP44. Моделі до 1000 кг поставляються з прямим або контакторним керуванням, а від 1000 кг і вище - тільки з контакторним (42 В). Керування здійснюється з пульта (при прямому керуванні) або з щита керування (при контакторному керуванні). Для під'єднання до лебідки передбачений кабель довжиною 5 м. Всі лебідки вантажопідйомністю від 1000 кг і вище оснащені електронною системою захисту від перевантаження. У стандартній комплектації лебідки мають рифлений барабан для упорядкування укладання каната. Косозубі шестерні редуктора працюють в олійній ванні, що забезпечує плавність ходу. Завдяки комбінації потужності двигуна і передавального числа редуктора забезпечуються різні швидкості намотування каната.

Асинхронні двигуни трифазного змінного струму є найбільш поширеним видом двигунів, що застосовуються в електроприводах самих різних галузей народного господарства.

Надійна і безперебійна робота двигунів в першу чергу залежить від належного їх вибору потужності, режиму роботи, а також не менше значення має дотримання вимог та правил складання електричної схеми, вибору пускорегулювальної апаратури, кабелю тощо. Однак завжди залишається ймовірність появи аварійних або ненормальних режимів для двигуна та іншого електрообладнання.

Теплові перевантаження двигуна, викликають в першу чергу прискорене старіння і руйнування ізоляції двигуна, що призводить до коротких замикань. Виникають при перевантаженнях робочого механізму, важких умовах пуску двигуна під навантаженням, механічні пошкодження в двигуні або робочому механізмі, застопорення ротора, тривале пониження напруги мережі живлення, обрив однієї з фаз зовнішнього силового ланцюга або проводу в обмотці двигуна, а також погіршення умов охолодження.

3.2 Автоматизація кранового електропривода пристрою спуску та підйому підводної техніки

Електрообладнання кранів повинно забезпечувати надійну високопродуктивну і безпечну роботу. Системи керування передбачають:

- реверсивне керування електродвигунами;
- регулювання швидкості обертання в заданих межах;
- електромеханічне гальмування при зупинках;
- електричне гальмування при роботі на опускання вантажу;
- обмеження ходу вантажозахватного пристрою вгору та пересування моста і візка в обидва боки;
- нульове блокування кіл керування;

- електричні блокування, що запобігають невірному вмиканню апаратів;
- захист від коротких замикань і перевантажень максимальними струмовими реле.

У приводах кран-балок і талів передбачають захист тільки від коротких замикань автоматичними вимикачами.

Усі кранові механізми обладнуються гальмами закритого типу, що діють при вимиканні живлення двигуна. Всі неструмовідні металеві частини електрообладнання повинні бути електрично з'єднані з металевою фермою крана, а та, в свою чергу, з заземлюючим контуром через підкранові рейки.

3.3 Опис схеми керування електродвигуном пристрою спуску та підйому підводної техніки

Для керування електродвигуном СПП обрано електричну схему керування електродвигуном за допомогою командоконтролера типу ТСА.

Перестановкою командоконтролера (рис. 3.6) в положення 2, 3 і 4 "Підйом" послідовно вмикають контактори прискорення $KMV1 - KMV4$, які головними контактами шунтують відповідні ступені реостата R , і двигун працює на регульовальних характеристиках $2n$ і $3n$ та на основній характеристиці $4n$ (рис. 3.7). При роботі на основній характеристиці в колі ротора залишається увімкненим невеликий опір, який забезпечує зміну пускового струму ротора в заданих межах при наявній кількості контакторів прискорення.

Для опускання ПА командоконтролер ставлять у положення 3 "Спуск". Через контакт $K7$ одержує живлення контактор однофазного вмикання $KM1$. Останній головними контактами вмикає двигун за схемою однофазного живлення статора, а допоміжним контактом подає напругу на реле часу $KT1$, яке після цього залишається увімкненим у всіх інших положеннях "Спуск". Реле $KT1$ вмикає контактори KMF і KY . Електромагніт гальма YA вмикається в мережу, і колодки гальма звільняють гальмівний шків. Через контакт $K10$ одержує живлення

контактор прискорення $KMV1$, який головними контактами шунтує частину реостата R . Двигун працює на гальмівній характеристиці $3c$.

При переведенні командоконтролера в положення 2 "Спуск" контактори $KMV1$ і $KM1$ вимикаються, а контактор KMM спрацьовує. Оскільки раніше був увімкнений контактор KMF , статор двигуна вмикається в мережу в напрямку "Підйом" при повністю введеному в коло ротора опору реостата R . Двигун працює за характеристикою $2c$, яка призначена для гальмівного спуску середніх вантажів у режимі проти вмикання (рис. 3.7).

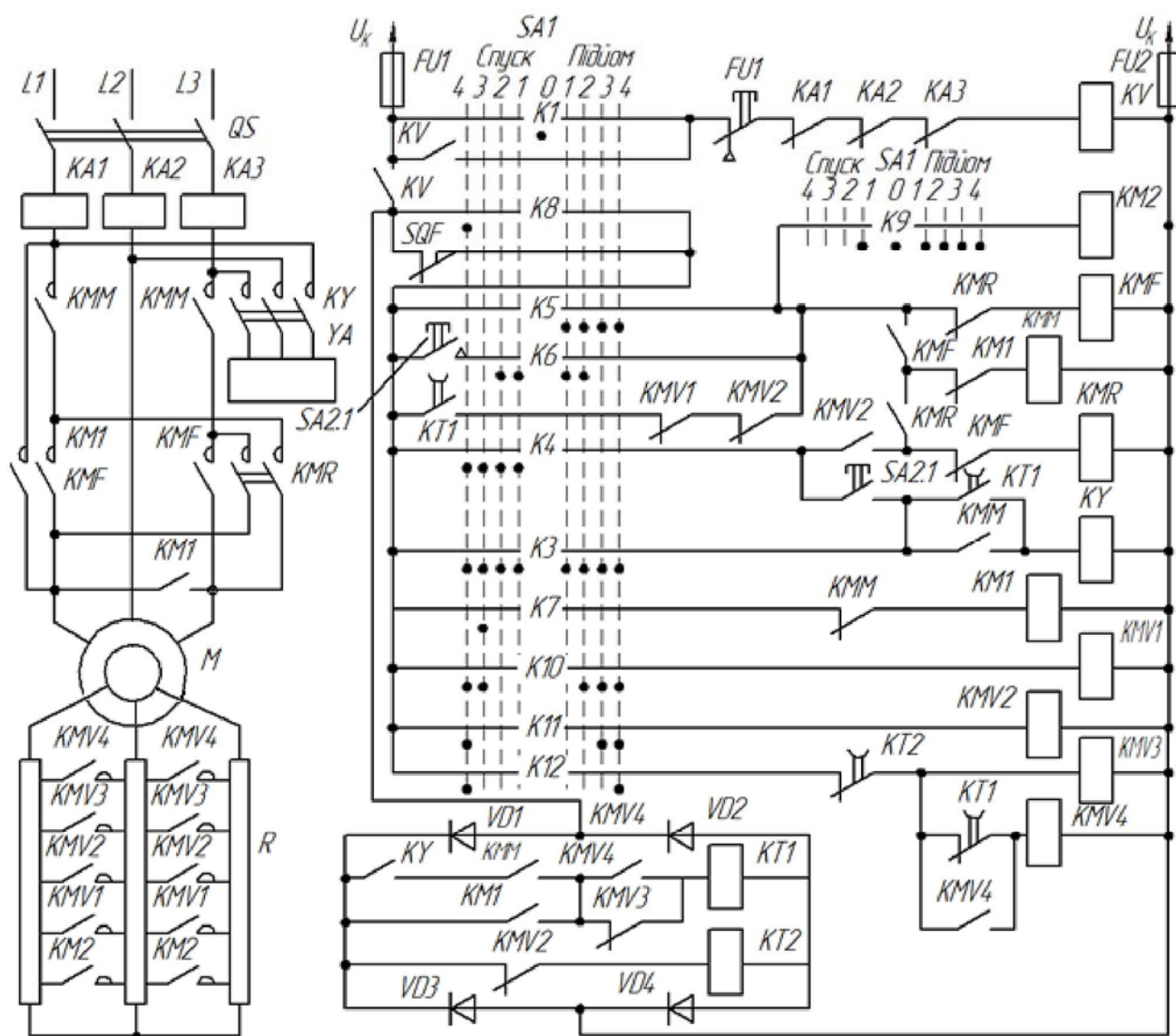


Рисунок 3.6 – Схема керування електродвигуном пристрою для спуску та підйому командоконтролером типу ТСА

Переведенням ручки командоконтролера в положення 1 "Спуск" контактом $K9$ вмикають контактор $KM2$, який головними контактами шунтує ступінь противмикання реостата R . Опір роторного кола зменшується, і двигун переходить на роботу за характеристикою $1с$, необхідною для гальмівного спуску важких ПА.

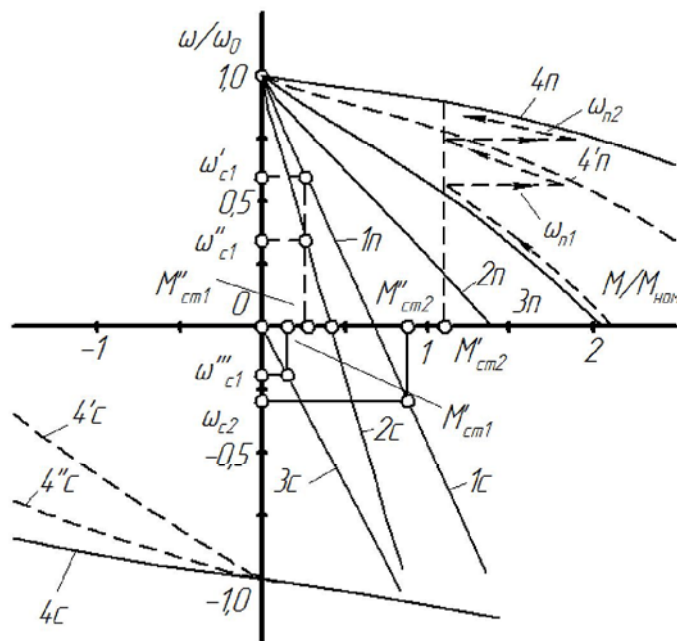


Рисунок 3.7 – Механічні характеристики електродвигуна пристрою для спуску та підйому

Якщо ручку командоконтролера перевести з положення 3 "Спуск" у положення 4 "Спуск", спрацьовують послідовно контактори $KMV2$, KMR , KMM і KY та знеструмлюється котушка реле часу $KT2$. Двигун спочатку працює за характеристикою $4'с$. По закінченню витримки часу $KT2$ спрацьовує контактор прискорення $KMV3$ і робоча точка переміщується на характеристику $4''с$. Розмикаючий контакт $KMV3$ вимикає струм з котушки реле часу $KT1$, яке з витримкою часу вмикає контактор $KMV4$. Двигун працює за основною характеристикою $4с$, на якій відбувається силовий спуск гака і гальмівний надсинхронний (у режимі рекуперативного гальмування) спуск ПА з великою швидкістю.

Таким чином, при спусках вантажів реле часу $KT1$ зміщує вихідне робоче положення схеми з нульового положення командоконтролера в положення 3. Це зроблено з такою метою. Наприклад, необхідно опустити невеликий вантаж з моментами статичного навантаження M'_{cm1} при підйомі і M''_{cm1} при спуску. При роботі за характеристикою 2с замість спуску вантаж буде підніматися з швидкістю ω'_{c1} . Тільки в положенні 3 "Спуск", де двигун працює в однофазному режимі, вантаж опускається з невеликою швидкістю ω'''_{c1} . Отже, реле $KT1$ запобігає підйому легких вантажів на положеннях командоконтролера "Спуск".

При важких вантажах M'_{cm2} і M''_{cm2} вмикання привода в положення 3 "Спуск" призведе до швидкого збільшення швидкості спуску ("осідання" вантажу). Щоб цього уникнути, кранівник може до вмикання двигуна натиснути на педаль $SA2$ і вимкнути блокування двох перших положень командоконтролера. Контакт $SA2.1$ готує коло вмикання контактора KMF , обминаючи контакти $KT1$, а $SA2.2$ — коло контактора KY . Тепер при установленні командоконтролера в положення 1 "Спуск" вмикаються контактори KMF , KMM , KY і $KM2$. Двигун працює за характеристикою 1с при невеликій швидкості спуску великого вантажу ω_{c2} . Одночасно контакти KY і KMM вмикають реле $KT1$, яке залишається увімкненим на всіх положеннях спуску.

Схемою передбачено автоматичний контроль протікання перехідних процесів при пуску і гальмуванні при швидкій перестановці командоконтролера з нульового положення в крайні положення і навпаки. У нульовому положенні командоконтролера реле часу $KT1$ знеструмлене, а котушка реле $KM2$ — під напругою. Контакт $KT2$ розриває коло живлення котушок контакторів прискорення $KMV3$ і $KMV4$.

При швидкому переставлянні командоконтролера з положення 0 у положення 4 "Підйом" спрацьовують контактори KMF , KMM , KY , $KM2$, $KMV1$ і $KMV2$. Розмикаючий контакт $KMV2$ знеструмлює реле часу $KT2$, а через контакти KY , KMM і $KMY3$ одержує живлення котушка реле $KT1$. Двигун запускається за характеристикою 3п до швидкості перемикавання ω_{n1} . Після

закінчення витримки часу реле $KT2$ його контакт замикається, спрацьовує контактор $KMV3$ і двигун переходить на проміжну пускову характеристику $4'n$. Розмикаючий контакт $KMV3$ знеструмлює реле часу $KT1$, яке починає відлік часу, достатній для прискорення двигуна до другої швидкості перемикавання ω_{n2} . Після відпускання реле $KT1$ контактор $KMV4$ спрацьовує і головними контактами шунтує останній пусковий ступінь реостата R . Двигун переходить на основну характеристику і розганяється до усталеної швидкості. Контактор $KMV4$ одним замикаючим контактом самотримується, а другим вмикає котушку реле $KT1$.

Контроль пуску в напрямку спуску відбувається по проміжних пускових характеристиках $4's$ і $4''s$, як показано вище.

При швидкому переставлянні командоконтролера з положення 4 "Спуск" у нульове контактори KMR , KY , $KMV1$ — $KMV4$ вимикаються і знеструмлюється котушка $KT1$. Через замкнений протягом певного часу контакт $KT1$ одержують живлення котушки контакторів $KM2$, KMF і KMM . Відбувається гальмування проти вмикання при одночасному накладанні механічного гальма. Після закінчення витримки часу реле $KT1$ обмотка статора вимикається з мережі. Суміщення механічного та електричного гальмування запобігає "осіданню" вантажу і зменшує спрацювання механічного гальма.

При надмірному підніманні вантажу розмикається контакт кінцевого вимикача SQF і знімає напругу з кіл керування. Для повторного вмикання ручку командо контролера ставлять у положення 4 "Спуск", контакт $K8$ шунтує розімкнений контакт вимикача SQF і двигун вмикається в напрямку спуску.

Для аварійного вмикання схеми передбачена кнопка SB .

Захист двигуна від коротких замикань і перевантажень здійснюється струмовими реле $KA1$ - $KA3$. Кола керування від коротких замикань захищені запобіжниками $FU1$ і $FU2$. Схемою передбачене також нульове блокування, яке виконують паралельно увімкнений контакт $K1$ та реле KV .

Наведено механізми науково-дослідного судна та система керування електродвигуном лебідки СПП.

4 РОЗРАХУНКИ, ЯКІ ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ ОБЛАДНАННЯ СПУСКУ ТА ПІДЙОМУ ПІДВОДНОЇ ТЕХНІКИ

4.1 Розрахунок магнітного ланцюга електродвигуна

Проектується трифазний асинхронний двигун з фазним ротором, за способом захисту від дії навколишнього середовища клас виконання IP44, що встановлено на електролебідку механізму для спуску та підйому у складі НДС. Вихідні дані до розрахунку представлені у вигляді таблиці (розд. 2, табл. 2.4).

Проектування починаємо із визначення головних розмірів: внутрішнього діаметра D_1 і довжини сердечника статора l_1 . Головні розміри залежать від потужності, що споживається, частоти обертання, а також від електромагнітних навантажень (лінійного навантаження і магнітної індукції в повітряному зазорі). Обираємо значення висоти осі обертання залежно від заданої номінальної потужності і від частоти обертання [3]. Висота осі обертання: $h = 100$ мм.

Обираємо значення зовнішнього діаметра сердечника статора $D_{31} = 175$ мм.

Для визначення одного з головних розмірів – внутрішнього діаметра сердечника статора D_1 можна використати залежності $D_1 = f(D_{31})$ [3]:

$$D_1 = 0,68 \cdot D_{31} - 5 = 0,68 \cdot 175 - 5 \approx 114 \text{ мм}$$

Визначаємо розрахункову потужність електродвигуна:

$$P' = \frac{k_H \cdot P_2}{\cos(\varphi)} = \frac{0,96 \cdot 3000}{0,83} = 4230 \text{ Вт,}$$

де $k_H \approx 0,96$ – відношення ЕРС обмотки статора до номінальної напруги;

$\eta' = 0,82 \%$ – коефіцієнт корисної дії;

$\cos(\varphi)' = 0,83$ – коефіцієнт потужності двигуна.

Попередні значення електромагнітних навантажень. Ізоляція нагрівостійкості класу F , коригувальні коефіцієнти $k_1 = 1$ та $k_2 = 1$.

Попередньо обираємо значення електромагнітних навантажень:

– лінійне навантаження: $A_1 = 240 \cdot k_1 = 240 \text{ А/см}$;

– індукція в повітряному зазорі: $B_\delta = 0,86 \cdot k_2 = 0,86 \text{ Тл}$.

4.2 Розрахунок сердечника статора асинхронного електродвигуна та параметрів обмотки статора

Сердечник збирають із окремих 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 обираємо марку сталі 2013, для неї використовують ізолювання листів лакуванням. Коефіцієнт заповнення сталі: $k_c = 0,97$.

Розрахункова довжина сердечника статора:

$$l_1 = \frac{8,62 \cdot 10^7 \cdot P}{D_1^2 \cdot n_1 \cdot A_1 \cdot B_\delta \cdot k_{об1}} = \frac{8,62 \cdot 10^7 \cdot 4230}{114^2 \cdot 1500 \cdot 240 \cdot 0,86 \cdot 0,96} = 94,4 \text{ мм}$$

Обираємо $l_1 = 95 \text{ мм}$. з у рахуванням перерахунків. Відношення конструктивної довжини до внутрішнього діаметру сердечника статора:

$$\lambda = \frac{l_1}{D_1} = \frac{95}{114} = 0,83$$

Доцільно, щоб це відношення було не більше $\lambda_{\max} = 1,34$.

$$\lambda_{\max} = (1,46 - 0,00071 \cdot D_{31}) \cdot k_4 = 1,34$$

$k_4 = 1$ – коригувальний коефіцієнт.

Кількість пазів на полюс і фазу обираємо $q_1 = 3$. Кількість пазів сердечника статора залежить від обраної кількості пазів на полюс і фазу. Кількість пазів сердечника статора:

$$z_1 = 2 \cdot p \cdot m_1 \cdot q_1 = 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 3 = 36$$

Статорні обмотки синхронних машин звичайно виконують шестизонними петльовими двошаровими з м'яких секцій або із твердих котушок. При виборі типу обмоток і форми паза статора синхронної машини з різними висотами осі обертання варто керуватися рекомендаціями.

Тому обираємо двошарову обмотку у прямокутних відкритих пазах.

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

$$k_{p1} = \frac{0.5}{q_1 \cdot \sin(\alpha / 2)} = \frac{0.5}{4 \cdot \sin(15^\circ / 2)} = 0.96$$

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

Укорочення обмотки статора по пазах $\beta_1 = 0.8$. Двошарову обмотку виконують із укороченим кроком. Діаметральний крок визначається наступним чином:

$$y_{\text{III}} = \frac{z_1}{2 \cdot p} = \frac{36}{2 \cdot 2} = 9$$

Визначаємо коефіцієнт укорочення:

$$k_{y1} = \sin(\beta_1 \cdot 90^\circ) = \sin(1 \cdot 90^\circ) = 1$$

Розраховуємо обмотковий коефіцієнт:

$$k_{o61} = k_{p1} \cdot k_{y1} = 1 \cdot 0,96 = 0,96$$

Попереднє значення магнітного потоку визначається за формулою:

$$\Phi' = \frac{B'_\delta \cdot D_1 \cdot l'_1 \cdot 10^{-6}}{p} = \frac{0,86 \cdot 114 \cdot 95 \cdot 10^{-6}}{2} = 4,657 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}$$

Попередня кількість витків в обмотці фази:

$$\omega'_1 = \frac{k_n \cdot U_1}{222 \cdot k_{o61} \cdot \frac{f_1}{50} \cdot \Phi'} = \frac{0,96 \cdot 220}{222 \cdot 0,96 \cdot \frac{50}{50} \cdot 4,657 \cdot 10^{-3}} = 212,85 \approx 213$$

Виберемо число паралельних гілок обмотки статора, що повинне бути одним з дільників числа полюсів: $a_1=1$. Визначаємо попередню кількість ефективних провідників у пазу:

$$N'_{n1} = \frac{\omega'_1 \cdot a_1}{p \cdot q_1} = \frac{213 \cdot 1}{2 \cdot 3} = 35,5$$

Приймаємо з урахуванням округлення: $N_{\Pi 1} = 36$. Кількість витків в обмотці фази:

$$\omega_1 = \frac{N_{n1} \cdot p \cdot q_1}{a_1} = \frac{36 \cdot 2 \cdot 3}{1} = 216$$

Уточнене значення магнітного потоку:

$$\Phi = \Phi' \cdot \frac{\omega_1'}{\omega_1} = 4,657 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{213}{216} = 0,045 \text{ Вб}$$

Паралельні гілки обмотки повинні містити однакову кількість витків, а сторони котушок - перебувати в магнітному полі в однакових умовах. Вибравши ціле число $N_{\text{ПІ}}$, уточнимо попередньо встановлені параметри. Уточнюємо значення індукції в повітряному зазорі:

$$B_{\delta} = B'_{\delta} \cdot \frac{\omega_1'}{\omega_1} = 0,86 \cdot \frac{213}{216} = 0,85 \text{ Тл}$$

Визначаємо попереднє значення номінального фазного струму:

$$I_1 = \frac{P_2}{3 \cdot U_1 \cdot \eta' \cdot \cos(\varphi)} = \frac{3000}{3 \cdot 220 \cdot 0,82 \cdot 0,83} = 6,68 \text{ А}$$

Уточнюємо лінійне навантаження статора:

$$A_1 = \frac{10 \cdot N_{\text{ПІ}} \cdot z_1 \cdot I_1}{\pi \cdot D_1 \cdot a_1} = \frac{10 \cdot 36 \cdot 36 \cdot 6,68}{3,14 \cdot 114 \cdot 1} = 241,68 \text{ А/см}$$

Отримане значення A_1 в цьому випадку не відрізняється від раніше прийнятого A' , більш ніж на 10%, інакше варто було б змінити кількість витків ω_1 .

$$\left| \frac{A_1 - A'}{A_1} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{241,68 - 240}{241,68} \right| \cdot 100\% = 0,69\%$$

Зубцевий розподіл по внутрішньому діаметрі статора:

$$t_1 = \frac{\pi \cdot D_1}{z_1} = \frac{3,14 \cdot 575,8}{72} = 25,11$$

Попереднє значення магнітної індукції в найбільш вузькому місці зубця вибираємо $B_{z1\max} = 1,8$ Тл. Зубцевий розподіл статора в найбільш вузькому місці:

$$t_{1\min} = \frac{\pi \cdot D_1}{z_1} = \frac{3,14 \cdot 114}{36} = 9,95 \text{ мм}$$

де $h_{\text{шл}} = 0,5$ мм – висота шліца.

Попередня ширина зубця в найбільш вузькому місці:

$$b_{z1\min} = \frac{t_{1\min} \cdot B_{\delta}}{k_c \cdot B_{z1\max}} = \frac{9,95 \cdot 0,85}{0,97 \cdot 1,8} = 4,8 \text{ мм}$$

Ширина шліца відкритого пазу:

$$b_{\text{шл}} = 0,3 \cdot \sqrt{h} = 0,3 \cdot 100 = 3 \text{ мм}$$

Кількість ефективних провідників за шириною пазу. Припуск на збірку сердечника за шириною $b_c = 0,1$ мм, $h_c = 0,1$ мм. Загальна товщина ізоляції за шириною $b_{i1} = 0,25$ мм. Попереднє значення магнітної індукції у спинці статора $B_{cl} = 1,7$ Тл. Попередня висота спинки статора:

$$h'_{cl} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{2 \cdot k_c \cdot l_1 \cdot B_{cl}} = \frac{0,0046 \cdot 10^6}{2 \cdot 0,97 \cdot 95 \cdot 1,7} = 14,7 \text{ мм}$$

Попередня висота пазу:

$$h'_{\text{п1}} = \frac{D_{\text{з1}} - D_1}{2} - h'_{\text{с1}} = \frac{175 - 114}{2} - 14,7 = 15,8 \text{ мм}$$

Більша ширина паза:

$$b_1 = \left(\pi \cdot \frac{D_1 + 2 \cdot h_{\text{п1}}}{z_1} \right) - b_{\text{з1}} = \left(3,14 \cdot \frac{114 + 2 \cdot 15,8}{36} \right) - 4,8 = 7,9 \text{ мм}$$

Менша ширина паза:

$$b_2 = \left(\frac{\pi \cdot (D_1 + 2 \cdot h_{\text{ш1}} - b_{\text{ш1}})}{z_1 - \pi} \right) = \left(\frac{3,14 \cdot (114 + 2 \cdot 0,5 - 4,8)}{36 - 3,14} \right) = 5,4 \text{ мм}$$

Перевірка:

$$\begin{aligned} z_1 \cdot (b_1 - b_2) + \pi \cdot (b_2 - b_{\text{ш1}}) - 2 \cdot \pi \cdot (h_{\text{п1}} - h_{\text{ш1}}) = \\ = 36 \cdot (7,9 - 5,4) + 3,14 \cdot (5,4 - 3) - 2 \cdot 3,14 \cdot (15,8 - 0,5) = 1,41 \end{aligned}$$

Площа поперечного перерізу паза в штампі:

$$S_{\text{п11}} = \frac{b_1 + b_2}{2} \cdot (h_{\text{п1}} - h_{\text{ш1}} - \frac{b_2 - b_{\text{ш1}}}{2}) = \frac{7,9 + 5,4}{2} \cdot (15,8 - 0,5 - \frac{5,4 - 3}{2}) = 93,77 \text{ мм}^2$$

Площа поперечного перерізу паза в світлі:

$$S'_{\text{п1}} = \left(\frac{b_1 + b_2}{2} - b_c \right) \cdot \left(h_{\text{п1}} - h_{\text{ш1}} - \frac{b_2 - b_{\text{ш1}}}{2} - h_c \right) =$$

$$= \left(\frac{7,9 + 5,4}{2} - 0,1 \right) \cdot \left(15,8 - 0,5 - \frac{5,4 - 3}{2} - 0,1 \right) = 91,7 \text{ мм}^2$$

Площа поперечного перетину корпусної ізоляції:

$$S_i = b_{i1} \cdot (2 \cdot h_{\text{п1}} + b_1 + b_2) = 0,25 \cdot (2 \cdot 15,8 + 7,9 + 5,4) = 11,22 \text{ мм}^2$$

Площа поперечного перетину прокладок:

$$S_{\text{пр}} = 0,56 \cdot b_1 + 0,75 \cdot b_2 = 0,5 \cdot 7,9 + 0,75 \cdot 5,4 = 8 \text{ мм}^2$$

Площа поперечного перетину паза, що займає обмотка:

$$S''_{\text{п1}} = S'_{\text{п1}} - S_i - S_{\text{пр}} = 91,7 - 11,22 - 8 = 72,48 \text{ мм}^2$$

Діаметр проводу: $c = 3$, c - кількість дротів в ефективному перетині.

$$d' = \sqrt{\frac{k'_{\text{п}} \cdot S''_{\text{п1}}}{N_{\text{п1}} \cdot c}} = \sqrt{\frac{0,73 \cdot 72,48}{36 \cdot 3}} = 0,7 \text{ мм}$$

Обираємо d' згідно стандарту: $d' = 0,7 \text{ мм}$; $S = 0,322 \text{ мм}^2$; $d = 0,64 \text{ мм}$.

d - номінальний діаметр неізолюваного дроту;

S - площа поперечного перетину неізолюваного дроту;

$k_{\text{п}}$ - коефіцієнт заповнення паза;

d' - діаметр ізолюваного елементарного дроту.

Уточнення коефіцієнту заповнення паза:

$$k_{\Pi} = \frac{N_{\Pi 1} \cdot c \cdot d'}{S_{\Pi 1}''} = \frac{36 \cdot 3 \cdot 0,7}{72,48} = 0,73$$

Коефіцієнт не перевищує 0,75. Уточнюємо ширину шліца:

$$b_{\text{ш}1}'' = d' + 2 \cdot b_{i1} + 0,4 = 0,7 + 2 \cdot 0,25 + 0,4 = 1,6 \text{ мм}, b_{\text{ш}1}' = 3,79 \text{ мм}$$

Таким чином, обираємо: $b_{\text{ш}1}' = 3 \text{ мм}$. Щільність струму в обмотці статора:

$$J_1 = \frac{I_1}{c \cdot S \cdot a_1} = \frac{6,68}{3 \cdot 0,32 \cdot 1} = 6,91 \text{ А/мм}^2$$

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

$$A_1 \cdot J_1 = 241,68 \cdot 6,91 = 1,67 \cdot 10^3 \text{ А}^2 / (\text{см} \cdot \text{мм}^2)$$

Припустимі значення $A_1 J_1$ для асинхронних машин у захисному виконанні із само вентиляцією, виконаних з ізоляцією класу F надані у відповідній літературі. Розраховане значення менше припустимого:

$$A_1 \cdot J_{1\text{прип}} = 1,67 \cdot 10^3 \text{ А}^2 / (\text{см} \cdot \text{мм}^2). \text{ За графіком } A_1 J_1 \text{ дорівнює:}$$

$$k_5 = 1; A J_{\text{прип}} = 2050 \cdot k_5 = 2050 \text{ А}^2 / (\text{см} \cdot \text{мм}^2)$$

k_5 - коефіцієнт, що враховує ефект охолодження обмотки.

Розміри елементів обмотки. Середній зубцевий розподіл статора:

$$t_{\text{сеп1}} = \frac{\pi \cdot (D_1 + h_{\text{п1}})}{z_1} = \frac{3,14 \cdot (114 + 15,8)}{36} = 11,3 \text{ мм}$$

Середня ширина котушки обмотки статора:

$$b_{\text{сеп1}} = t_{\text{сеп1}} \cdot y_{\text{п1}} = 11,33 \cdot 9 = 101,9 \text{ мм}$$

Середня довжина однієї лобової частини обмотки:

$$l_{\text{л1}} = (1,16 + 0,14 \cdot p) \cdot b_{\text{сеп1}} + 15 = (1,16 + 0,14 \cdot 2) \cdot 101,94 + 15 = 161,8 \text{ мм}$$

Середня довжина обмотки:

$$l_{\text{сеп1}} = 2 \cdot (l_1 + l_{\text{л1}}) = 2 \cdot (95 + 161,8) = 513,6 \text{ мм}$$

Довжина вильоту лобової частини обмотки:

$$l_{\text{Б1}} = (0,19 + 0,1 \cdot p) \cdot b_{\text{сеп1}} + 10 = (0,19 + 0,1 \cdot 2) \cdot 101,94 + 10 = 49,8 \text{ мм}$$

Обмотки ротора з'єднуються зіркою із овальними напівзакритими пазами.

Висота паза $h_{\text{п2}} = 20$ мм. Розрахункова висота спинки ротора:

$$d_{\text{к2}} = 0; \quad h_{\text{с2}} = 0,38 \cdot D_{2\text{H}} - h_{\text{п2}} - \frac{2}{3} \cdot d_{\text{к2}} = 0,38 \cdot 113,5 - 20 - \frac{2}{3} \cdot 0 = 23,1 \text{ мм}$$

Магнітна індукція в спиці ротора:

$$B_{c2} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{2 \cdot k_c \cdot l_2 \cdot h_{c2}} = \frac{(0,0046) \cdot 10^6}{2 \cdot 0,97 \cdot 95 \cdot 23,13} = 1,08 \text{ Тл}$$

Зубцевий поділ по зовнішньому ротора:

$$t_2 = \frac{\pi \cdot D_{2H}}{z_2} = \frac{3,14 \cdot 113,5}{28} = 12,73 \text{ мм}$$

Магнітна індукція в зубцях ротора $B_{32} = 1,8 \text{ Тл}$. Ширина зубця:

$$b_{32} = \frac{t_2 \cdot B_{\delta}}{B_{32} \cdot k_c} = \frac{12,73 \cdot 0,85}{1,8 \cdot 0,97} = 6,2 \text{ мм}$$

Менший радіус паза:

$$r_{r2} = \frac{\pi \cdot (D_{2H} - 2 \cdot h_{п2}) - z_2 \cdot b_{32}}{2 \cdot (z_2 - \pi)} = \frac{3,14 \cdot (113,5 - 2 \cdot 20) - 28 \cdot 6,2}{2 \cdot (28 - 3,14)} = 1,2 \text{ мм}$$

Більший радіус паза: $h_{ш2} = 0,6 \text{ мм}$; $h_2 = 0 \text{ мм}$; $b_{ш2} = 1,5 \text{ мм}$.

$$r_{r1} = \frac{\pi \cdot (D_{2H} - h_{ш2} - 2 \cdot h_2) - z_2 \cdot b_{32}}{2 \cdot (z_2 + \pi)} = \frac{3,14 \cdot (113,5 - 0,6) - 28 \cdot 6,2}{2 \cdot (28 - 3,14)} = 2,9 \text{ мм}$$

Відстань між центрами радіусів:

$$h_1 = h_{п2} - h_{ш2} - h_2 - r_{r1} - r_{r2} = 20 - 0,6 - 0 - 2,9 - 1,2 = 15,3 \text{ мм}$$

Перевірка правильності визначення r_1 і r_2 виходячі з умови $b_{32} = \cos nt$:

$$(\pi \cdot h_1 - z_2 \cdot (rr_1 - rr_2)) = 0,47$$

Площа поперечного перетину стрижня, дорівнює площі поперечного перетину паза в штампі $s_{п2} = S_{ст}$:

$$\begin{aligned} S_{ст} &= 0,5 \cdot \pi \cdot ((r_{r1})^2 + (r_{r2})^2) + (r_{r1} + r_{r2}) \cdot h_1 = \\ &= 0,5 \cdot 3,14 \cdot ((2,9)^2 + (1,2)^2) + (2,9 + 1,2) \cdot 15,3 = 78,2 \text{ мм}^2 \end{aligned}$$

Фазне кільце обмотки ротора. Поперечний перетин кільця литої клітки:

$$S_{кл} = \frac{0,45 \cdot z_2 \cdot S_{ст}}{2 \cdot p} = \frac{0,45 \cdot 28 \cdot 78,2}{2 \cdot 2} = 246,34 \text{ мм}^2$$

Висота кільця литої клітки становить:

$$h_{кл} = 1,2 \cdot h_{п2}; \quad h_{кл} = 1,2 \cdot 20 = 24 \text{ мм}$$

Визначаємо довжину кільця:

$$l_{кл} = \frac{S_{кл}}{h_{кл}} = \frac{246,34}{24} = 10,26 \text{ мм}$$

Визначаємо середній діаметр кільця литої клітки:

$$D_{кл.сер} = D_{2H} - h_{кл} = 113,5 - 24 = 89,5 \text{ мм}$$

Виліт лобової частини обмотки:

$$k_{\text{л}} = 0,9; l_{\text{л2}} = 50 \text{ мм}; l_{\text{в2}} = k_{\text{л}} \cdot l_{\text{л2}} + l_{\text{кл}} = 0,9 \cdot 50 + 10,26 = 55,26 \text{ мм}$$

де $k_{\text{л}}$ – коефіцієнт враховуючий згиб стрижня;

$l_{\text{л2}}$ – довжина лобової частини стрижня.

4.3 Розрахунок магнітного кола при неробочому русі

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

МРС для повітряного зазору між сердечником статора і полюсним наконечником. Коефіцієнт, що враховує збільшення магнітного опору повітряного зазору внаслідок зубчатої будови статора:

$$k_{\delta 1} = 1 + \frac{b_{\text{ш1}}}{\left(t_1 - b_{\text{ш1}} + \frac{5 \cdot \delta \cdot t_1}{b_{\text{ш1}}} \right)} = 1 + \frac{3}{\left(9,95 - 3 + \frac{5 \cdot 0,25 \cdot 9,95}{3} \right)} = 1,27$$

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

$$k_{\delta 2} = 1 + \frac{b_{\text{ш2}}}{\left(t_2 - b_{\text{ш2}} + \frac{5 \cdot \delta \cdot t_2}{b_{\text{ш2}}} \right)} = 1 + \frac{1,5}{\left(12,73 - 1,5 + \frac{5 \cdot 0,25 \cdot 12,73}{1,5} \right)} = 1,07$$

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

повітряного зазору дорівнює:

$$k_{\delta} = k_{\delta 1} \cdot k_{\delta 2} \cdot k_k = 1,27 \cdot 1,07 \cdot 1 = 1,36$$

МРС для повітряного зазору становить:

$$F_{\delta} = 0,8 \cdot \delta \cdot k_{\delta} \cdot B_{\delta} \cdot 10^3 = 0,25 \cdot 1,36 \cdot 0,85 \cdot 10^3 = 230,27 \text{ А}$$

МРС для зубців статора. Магнітна індукція в у зубці статора на відстані 1/3 його висоти від окружності, що відповідає діаметру D_l $B_{31} = 1,8$ Тл. Напруженість магнітного поля в зубцях статора дорівнює $H_{31} = 15,2$ А/см. Середня довжина шляху магнітного потоку $L_{31} = h_{n1} = 15,8$ мм. МРС для зубців статора $F_{31} = 0,1 \cdot L_{31} \cdot H_{31} = 0,1 \cdot 15,2 \cdot 15,8 = 24,02 \text{ А}$.

Спинка статора. Магнітна індукція в зубцях полюсного наконечника $B_{32} = 1,8$ Тл. Напруженість магнітного поля в зубцях полюсного наконечника $H_{32} = 15,2$ А/см. Середня довжина шляху магнітного потоку в зубцях полюсного наконечника розраховується наступним чином:

$$L_{32} = h_{p2} - 0,2 \cdot r_2 = 20 - 0,2 \cdot 1,2 = 19,76 \text{ мм}$$

Визначаємо МРС для зубців полюсного наконечника:

$$F_{32} = 0,1 \cdot L_{32} \cdot H_{32} = 0,1 \cdot 15,2 \cdot 19,76 = 30,04 \text{ А}$$

Середнє значення індукції в спинці ротора $B_{c2} = 1,08$ Тл.

Напруженість магнітного поля в спинці ротора $H_{c2} = 2,77$ А/см. Середня довжина шляху магнітного потоку в спинці ротора:

$$L_{c2} = \left[\frac{\pi \cdot \left(D_2 + h_{c2} + \frac{4}{3} \cdot d_{k2} \right)}{4 \cdot p} \right] = \left[\frac{3,14 \cdot \left(40 + 23,13 + \frac{4}{3} \cdot 0 \right)}{4 \cdot 2} \right] = 24,79 \text{ мм}$$

МРС для спинки ротора $F_{c2} = 0,1 \cdot L_{c2} \cdot H_{c2} = 0,1 \cdot 2,77 \cdot 24,79 = 6,87 \text{ А}$

Повітряний зазор стику полюса. Загальні параметри магнітного ланцюга.
Сумарна МРС магнітного ланцюга(на полюс):

$$F_{\Sigma} = F_{31} + F_{\delta} + F_{c1} + F_{c2} + F_{32} = 363,58 \text{ А}$$

Коефіцієнт насичення магнітного ланцюга:

$$k_{\text{нас}} = \frac{F_{\Sigma}}{F_{\delta}} = \frac{363,58}{230,27} = 1,58$$

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

Характеристики неробочого руху розраховані за методикою, наведеною нижче.

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.): $F_{\delta_{zc}} = \frac{F_{\delta_{zc}}}{F_{\Sigma(1)}}$. Магнітний потік розсіювання

полюсів (Вб): $\Phi_\sigma = 4 \cdot \lambda_n \cdot l_{n.n} \cdot F_{\delta_{zc}} \cdot 10^{-11}$. 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):

$$F_\Sigma = F_{\delta_{zc}} + F_\Pi + F_{c2} + F_{\Pi 2} + F_{32}$$

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

4.4 Розрахунок активного та індуктивного опору розсіювання обмотки статора

Визначення активних і індуктивних опорів обмотки статора необхідно для розрахунку режиму неробочого руху, номінальних параметрів і робочих характеристик асинхронної машини.

Активний опір обмотки фази при 20 °С:

$$r_1 = \frac{\omega_1 \cdot l_{\text{сер1}}}{\rho_{\text{м20}} \cdot a_1 \cdot c \cdot S_1 \cdot 10^3} = \frac{216 \cdot 513,6}{57 \cdot 1 \cdot 3 \cdot 0,32 \cdot 10^3} = 2,01 \text{ Ом}$$

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

Активний опір обмотки фази при 20°C у відносних одиницях:

$$r_{1*} = \frac{r_1 \cdot I_1}{U_1} = \frac{2,01 \cdot 6,68}{220} = 0,0612 \text{ в.о.}$$

Перевірка правильності визначення r_{1*} :

$$r_{1*} = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot (A_1 \cdot J_1) \cdot l_{\text{сер1}}}{114 \cdot 10^4 \cdot m_1 \cdot U_1 \cdot I_1} = \frac{3,14 \cdot 114 \cdot 241,68 \cdot 6,91 \cdot 513,6}{114 \cdot 10^4 \cdot 3 \cdot 220 \cdot 6,68} = 0,0612 \text{ в.о.}$$

Розміри частин обмоток і паза визначаються: $h_{k1}=0,7 \text{ мм}$, $h_2=0,6 \text{ мм}$, $h_3=0 \text{ мм}$,
 $h_4=h_3$.

Коефіцієнти, що враховують укорочення кроку:

$$k_{\beta 1} = 0,4 + 0,6 \cdot \beta_1 = 0,4 + 0,6 \cdot 1 = 1$$

$$k'_{\beta 1} = 0,2 + 0,8 \cdot \beta_1 = 0,2 + 0,8 \cdot 1 = 1$$

Коефіцієнт провідності розсіювання:

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{п1}} &= \left(\frac{h_1}{3 \cdot b_{\text{п1}}} \cdot k_{\beta 1} \right) + \left(\frac{3 \cdot h_{k1}}{b_{\text{п1}} + 2 \cdot b_{\text{ш1}}} + \frac{h_{\text{ш1}}}{b_{\text{ш1}}} + \frac{h_2}{b_{\text{п1}}} \right) \cdot k'_{\beta 1} = \\ &= (0,86 \cdot 1) + \left(\frac{3 \cdot 0,7}{5,4 + 2 \cdot 3} + \frac{0,5}{3} + \frac{0,6}{5,4} \right) \cdot 1 = 1,33 \end{aligned}$$

де h_{k1}, h_2, h_3, h_4 – розміри частин обмоток и паза.

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

$$t_{1min} = t_1; \quad k_{ш1} = 1 - \left(\frac{0.033 \cdot b_{ш1}^2}{t_{1min} \cdot \delta} \right) = 1 - \left(\frac{0.033 \cdot 3^2}{9.95 \cdot 0.25} \right) = 0.88$$

Коефіцієнт провідності диференційного розсіювання:

$$k_{p1} = 0.87; \quad k_{Д1} = 0.0141;$$

$$\lambda_{Д1} = \frac{0.9 \cdot t_{1min} \cdot (q_1 \cdot k_{об1})^2 \cdot k_{p1} \cdot k_{ш1} \cdot k_{Д1}}{\delta \cdot k_{\delta}};$$

$$\lambda_{Д1} = \frac{0.9 \cdot 9.95 \cdot (3 \cdot 0.96)^2 \cdot 0.87 \cdot 0.88 \cdot 0.01}{0.25 \cdot 1.36} = 2.36$$

k_{p1} – коефіцієнт, що враховує демфуючу реакцію струмів;

$k_{Д1}$ – коефіцієнт демфуючого розсіювання ротора.

Полюсний розподіл:

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_1}{2 \cdot p} = \frac{3.14 \cdot 114}{2 \cdot 2} = 89.54 \text{ мм}$$

Коефіцієнт провідності розсіювання лобових частин обмотки:

$$\lambda_{л1} = 0.34 \cdot \frac{q_1}{l_1} \cdot (l_{л1} - 0.64 \cdot \beta_1 \cdot \tau);$$

$$\lambda_{л1} = 0,34 \cdot \frac{3}{95} \cdot (161,8 - 0,64 \cdot 1 \cdot 89,54) = 1,12$$

Розраховуємо коефіцієнт провідності розсіювання обмотки статора:

$$\lambda_1 = \lambda_{П1} + \lambda_{Д1} + \lambda_{л1} = 1,33 + 2,36 + 1,12 = 4,81$$

Індуктивний опір обмотки фази статора становить:

$$x_1 = \frac{1,58 \cdot f \cdot I_1 \cdot (\omega_1)^2 \cdot \lambda_1}{p \cdot q_1 \cdot 10^8} = \frac{1,58 \cdot 50 \cdot 95 \cdot (216)^2 \cdot 4,81}{2 \cdot 3 \cdot 10^8} = 2,81 \text{ Ом}$$

Індуктивний опір обмотки фази ротора (в.о):

$$x_{11} = \frac{I_1 \cdot x_1}{U_1} = \frac{6,68 \cdot 2,81}{220} = 0,09$$

Перевірка правильності визначення індуктивного опору;

$$x_{11} = \frac{0,39 \cdot (D_1 \cdot A_1)^2 \cdot l_1 \cdot \lambda_1 \cdot 10^{-7}}{m \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot z_1} = \frac{0,39 \cdot (114 \cdot 241,68)^2 \cdot 95 \cdot 4,81 \cdot 10^{-7}}{3 \cdot 220 \cdot 6,68 \cdot 36} = 0,09$$

Опір обмоток фази ротора з овальними закритими пазами. Активний опір стрижня $\rho_a = 27 \text{ Ом/мкм}$ – питома електрична провідність алюмінія при 20 град.

$$r_{ст} = \frac{l_2}{\rho_a \cdot S_{ст} \cdot 10^3} = \frac{95}{27 \cdot 78,2 \cdot 10^3} = 4,5 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}$$

Коефіцієнт приведення струму кільця до струму стрижня:

$$k_{\text{пр2}} = 2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot p}{z_2}\right) = 2 \cdot \sin\left(\frac{3,14 \cdot 2}{28}\right) = 0,45$$

Опір фазних кілець, приведений до струму при 20 градусах:

$$r_{\text{кл}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot D_{\text{кл.ср}}}{\rho_a \cdot z_2 \cdot S_{\text{кл}} \cdot k_{\text{пр2}}^2 \cdot 10^3} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 89,5}{27 \cdot 28 \cdot 246,34 \cdot 0,45^2 \cdot 10^3} = 1,52 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}$$

Центральний кут скосу пазів (рад): $\alpha_{\text{ск}} = 1$.

Коефіцієнт скосу пазів ротора $k_{\text{ск}} = 1$. Коефіцієнт приведення опору обмотки ротора до обмотки статора:

$$k_{\text{пр1}} = \frac{4 \cdot m}{z_2} \cdot \left(\frac{\omega_1 \cdot k_{\text{об1}}}{k_{\text{ск}}}\right)^2 = \frac{4 \cdot 3}{28} \cdot \left(\frac{216 \cdot 0,96}{1}\right)^2 = 1,84 \cdot 10^4$$

Активний опір обмотки ротора при 20 градусах приведений до обмотки статора:

$$r'_2 = k_{\text{пр1}} \cdot (r_{\text{кл}} + r_{\text{ст}}) = 1,84 \cdot 10^4 \cdot (1,52 \cdot 10^{-5} + 4,5 \cdot 10^{-5}) = 1,11 \text{ Ом}$$

Активний опір обмотки ротора при 20 градусах приведений до обмотки статора (в.о.):

$$r'_{21} = \frac{r'_2 \cdot I_1}{U_1} = \frac{1,11 \cdot 6,68}{220} = 0,03$$

Струм обмотки ротора для робочого режиму:

$$I_2 = \frac{2 \cdot \omega_1 \cdot k_{\text{об1}} \cdot P_2}{U_1 \cdot z_2} \cdot \frac{0,2 + 0,8 \cdot \cos(\varphi)'}{\eta' \cdot \cos(\varphi)'} =$$

$$= \frac{2 \cdot 216 \cdot 0,96 \cdot 3 \cdot 10^3}{220 \cdot 28} \cdot \frac{0,2 + 0,83 \cdot 0,83}{0,83 \cdot 0,82} = 256,34 \text{ A}$$

Коефіцієнт провідності розсіювання:

$$\lambda_{\text{П2}} = \frac{h_{\text{ш2}}}{b_{\text{ш2}}} + \frac{h_1 + 0,8 \cdot r_{r_2}}{6 \cdot r_{r_1}} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot (r_{r_1})^2}{2 \cdot S_{\text{СТ}}}\right)^2 + 0,66 - \frac{b_{\text{ш2}}}{4 \cdot r_{r_1}} =$$

$$= \frac{0,6}{1,5} + \frac{15,3 + 0,8 \cdot 1,2}{6 \cdot 2,9} \cdot \left(1 - \frac{3,14 \cdot (2,9)^2}{2 \cdot 78,2}\right)^2 + 0,66 - \frac{1,5}{4 \cdot 2,9} = 1,58$$

Кількість пазів ротора на полюс и фазу:

$$q_2 = \frac{z_2}{2 \cdot p \cdot m} = \frac{28}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 2,33$$

Коефіцієнт провідності диференціального розсіювання ротора $k_{\text{д2}} = 0,015$.

Коефіцієнт провідності диференціального розсіювання:

$$\lambda_{\text{Д2}} = 0,9 \cdot t_2 \cdot \left(\frac{z_2}{6 \cdot p}\right)^2 \cdot \frac{k_{\text{Д2}}}{\delta \cdot k_{\delta}} = 0,9 \cdot 12,73 \cdot \left(\frac{28}{6 \cdot 2}\right)^2 \cdot \frac{0,02}{0,25 \cdot 1,36} = 2,76$$

Коефіцієнт провідності розсіювання фазних кілець клітки:

$$\lambda_{\text{кл}} = \frac{2,9 \cdot D_{\text{кл.сер}}}{z_2 \cdot l_2 \cdot k_{\text{пр}2}} \cdot \log \left(\frac{2,35 \cdot D_{\text{кл.сер}}}{h_{\text{кл}} + l_{\text{кл}}} \right) = \frac{2,9 \cdot 89,5}{28 \cdot 95 \cdot 0,45^2} \cdot \log \left(\frac{2,35 \cdot 89,5}{24 + 10,26} \right) = 0,39$$

Коефіцієнт провідності розсіювання обмотки ротора:

$$\lambda_2 = \lambda_{\text{П}2} + \lambda_{\text{Д}2} + \lambda_{\text{кл}} = 1,58 + 2,76 + 0,39 = 4,72$$

Індуктивний опір обмотки ротора:

$$x_2 = 7,9 \cdot f \cdot l_2 \cdot \lambda_2 \cdot 10^{-9} = 7,9 \cdot 50 \cdot 95 \cdot 4,72 \cdot 10^{-9} = 1,77 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}$$

Індуктивний опір обмотки ротора, приведений до обмотки статора

$$x'_2 = x_2 \cdot k_{\text{ПР}1} = 1,77 \cdot 10^{-4} \cdot 1,84 \cdot 10^4 = 3,26 \text{ Ом}$$

Індуктивний опір обмотки ротора, приведений до обмотки статора (в.о.):

$$x'_{21} = \frac{x'_2 \cdot I_1}{U_1} = \frac{3,26 \cdot 6,68}{220} = 0,1$$

Перевірка правильності визначення x'_2 : $x_1/x_2 = 0,86$.

Опір обмотки перетвореної схеми заміщення двигуна. $m_T = 1,38$ – коефіцієнт нагріво стійкості матеріала. Коефіцієнт розсіювання ротора:

$$\tau_1 = \frac{x_1}{x_M} = \frac{2,81}{81,37} = 0,03$$

Коефіцієнт опору статора:

$$\rho_1 = \frac{r_1 \cdot m_T}{x_M + x_1} = \frac{2,01 \cdot 1,38}{81,37 + 2,81} = 0,03$$

Тоді перетворені опори обмоток:

$$r_1' = m_T \cdot r_1 = 1,38 \cdot 2,01 = 2,78 \text{ Ом}$$

$$x_1' = x_1 \cdot (1 + \tau_1) = 2,81 \cdot (1 + 0,03) = 2,9 \text{ Ом}$$

$$r_2'' = m_T \cdot r_2' \cdot (1 + \tau_1)^2 = 1,38 \cdot 1,11 \cdot (1 + 0,03)^2 = 1,64 \text{ Ом}$$

$$x_2'' = x_2' \cdot (1 + \tau_1)^2 = 3,26 \cdot (1 + 0,03)^2 = 3,49 \text{ Ом}$$

Тоді знаходимо ЕРС холостого ходу:

$$E_0 = \frac{U_1}{(1 + \tau_1) \cdot \sqrt{1 + (\rho_1)^2}} = \frac{220}{(1 + 0,03) \cdot \sqrt{1 + (0,03)^2}} = 212,55 \text{ В}$$

E_0 не відрізняється від E на 3 відсотка. Режим неробочого руху.

Реактивна складова струму статора при синхронному обертанні:

$$I_{c.p} = \frac{U_1}{x_M \cdot (1 + \tau_1) \cdot (1 + (\rho_1)^2)} = \frac{220}{81,37 \cdot (1 + 0,03) \cdot (1 + (0,03)^2)} = 2,61 \text{ А}$$

Електричні втрати в обмотці статора при синхронному обертанні:

$$P_{\text{с.м1}} = m \cdot I_{\text{с.р}}^2 \cdot r_1' \cdot (1 + (\rho_1)^2) = 3 \cdot 2,61^2 \cdot 2,78 \cdot (1 + (0,03)^2) = 56,91 \text{ Вт}$$

Розрахункова маса сталі зубців статора ри трапецийдальних пазах:

$$m_{31} = 7,8 \cdot z_1 \cdot b_{31} \cdot h_{\text{п1}} \cdot l_1 \cdot k_c \cdot 10^{-6} = 7,8 \cdot 36 \cdot 4,8 \cdot 15,8 \cdot 95 \cdot 0,97 \cdot 10^{-6} = 1,96 \text{ кг}$$

Магнітні втрати в зубцях статора:

$$P_{31} = 4,4 \cdot B_{31}^2 \cdot m_{31} = 4,4 \cdot 1,8^2 \cdot 1,96 = 27,98 \text{ Вт}$$

Маса сталі спинки статора:

$$m_{\text{с1}} = 7,8 \cdot \pi \cdot (D_{1H} - h_{\text{с1}}) \cdot l_1 \cdot k_c \cdot 10^{-6} = 7,8 \cdot 3,14 \cdot (175 - 14,7) \cdot 95 \cdot 0,97 \cdot 10^{-6} = 5,32 \text{ кг}$$

Магнітні втрати в спиці статора:

$$P_{\text{с1}} = 4,4 \cdot B_{\text{с1}}^2 \cdot m_{\text{с1}} = 4,4 \cdot 1,7^2 \cdot 5,32 = 67,66 \text{ Вт}$$

Сумарні втрати в сердечнику статора, включаючи додаткові втрати в сталі:

$$\begin{aligned} P_{\text{с}\Sigma} &= P_{31} \cdot \left(1 + 2 \cdot \sqrt{\frac{t_1}{10} \cdot (k_{\delta} - 1)^2} \right) + P_{\text{с1}} = \\ &= 27,98 \cdot \left(1 + 2 \cdot \sqrt{\frac{9,95}{10} \cdot (1,36 - 1)^2} \right) + 67,66 = 155,6 \text{ Вт} \end{aligned}$$

Механічні втрати:

$$k_{\text{мх}} = 1; \quad P_{\text{мх}\Sigma} = k_{\text{мх}} \cdot \left(\frac{n_1}{1000} \right)^2 \cdot \left(\frac{D_{1H}}{100} \right)^4 = 1 \cdot \left(\frac{1,5 \cdot 10^3}{1000} \right)^2 \cdot \left(\frac{175}{100} \right)^4 = 21,2 \text{ Вт}$$

Активна складова струму неробочого руху:

$$I_{\text{о.а}} = \frac{P_{\text{с.м1}} + P_{\text{с}\Sigma} + P_{\text{мх}\Sigma}}{m \cdot U_1} = \frac{56,91 + 115,6 + 21,1}{3 \cdot 220} = 0,29 \text{ А}$$

Струм холостого ходу:

$$I_0 = \sqrt{I_{\text{о.а}}^2 + I_{\text{с.р}}^2} = \sqrt{0,29^2 + 2,61^2} = 2,63 \text{ А}$$

Коефіцієнт потужності при неробочому русі:

$$\cos(\varphi_0) = \frac{I_{\text{о.а}}}{I_0} = \frac{0,29}{2,63} = 0,11$$

4.5 Розрахунок параметрів номінального режиму

Активний опір короткого замикання:

$$r_K = r_1' + r_2'' = 4,42 \text{ Ом}$$

Індуктивний опір короткого замикання:

$$x_K = x_1' + x_2'' = 6,4 \text{ Ом}$$

Повний опір короткого замикання:

$$z_K = \sqrt{r_K^2 + x_K^2} = \sqrt{4,42^2 + 6,4^2} = 7,78 \text{ Ом}$$

Додаткові втрати при номінальному навантаженні:

$$P_D = \frac{0,005 \cdot P_2}{\eta'} = \frac{0,005 \cdot 3 \cdot 10^3}{0,82} = 18,29 \text{ Вт}$$

Механічна потужність двигуна:

$$P_2' = P_2 + P_{\text{мх}\Sigma} + P_D = 3 \cdot 10^3 + 21,1 + 18,29 = 3,04 \cdot 10^3 \text{ Вт}$$

Еквівалентний опір схеми заміщення:

$$\begin{aligned} R_H &= \frac{m \cdot U_1^2}{2 \cdot P_2'} - r_K + \sqrt{\left(\frac{m \cdot U_1^2}{2 \cdot P_2'} - r_K \right)^2 - z_K^2} = \\ &= \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 3,04 \cdot 10^3} - 4,42 + \sqrt{\left(\frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 3,04 \cdot 10^3} - 4,42 \right)^2 - 7,78^2} = 37,31 \text{ Ом} \end{aligned}$$

Повний опір схеми заміщення:

$$z_H = \sqrt{(R_H + r_K)^2 + x_K^2} = \sqrt{(37,31 + 4,42)^2 + 6,4^2} = 42,22 \text{ Ом}$$

Перевірка розрахунку R_H та z_H :

$$w = \frac{P_2'}{m \cdot U_1^2} = \frac{3,04 \cdot 10^3}{3 \cdot 220^2} = 0,02; \quad v = \frac{R_H}{z_H^2} = \frac{37,31}{42,22^2} = 0,02$$

Визначаємо ковзання:

$$S_H = \frac{1}{1 + R_H \cdot r_2''^{-1}} = \frac{1}{1 + 37,31 \cdot 1,64^{-1}} = 0,042$$

Активна складова струму статора при синхронному обертанні:

$$I_{c.a} = \frac{P_{c.m1} + P_{c\Sigma}}{m \cdot U_1} = \frac{56,91 + 115,6}{3 \cdot 220} = 0,26 \text{ A}$$

Струм ротора становить:

$$I_2'' = \frac{U_1}{z_H} = \frac{220}{42,22} = 5,21 \text{ A}$$

Струм статора. Активна складова:

$$I_{a1} = I_{c.a} + I_2'' \cdot \left(\frac{R_H + r_K}{z_H} \cdot \frac{1 - (\rho_1)^2}{1 + (\rho_1)^2} + \frac{x_K}{z_H} \cdot 2 \cdot \frac{\rho_1}{1 + (\rho_1)^2} \right) = 5,45 \text{ A}$$

Реактивна складова струму статора визначається за формулою:

$$I_{p1} = I_{c.p} + I_2'' \cdot \left(\frac{x_K}{z_H} \cdot \frac{1 - (\rho_1)^2}{1 + (\rho_1)^2} - \frac{R_H + r_K}{z_H} \cdot 2 \cdot \frac{\rho_1}{1 + (\rho_1)^2} \right) = 3,06 \text{ A}$$

Фазний:

$$I_1 = \sqrt{I_{a1}^2 + I_{p1}^2} = \sqrt{5,45^2 + 3,06^2} = 6,25 \text{ А}$$

Коефіцієнт потужності становитиме:

$$\cos(\varphi) = \frac{I_{a1}}{I_1} = 0,87$$

Лінійне навантаження статора:

$$A_1 = \frac{10 \cdot I_1 \cdot N_{\text{пл}}}{a_1 \cdot t_1} = 226,24 \text{ А/см}$$

Щільність стуму в обмотці статора:

$$J_1 = \frac{I_1}{c \cdot S \cdot a_1} = 6,47 \text{ А/мм}^2$$

Лінійне навантаження ротора:

$$k_{\text{об1}} = 1 \quad A_2 = \frac{A_1 \cdot I_2'' \cdot (1 + \tau_1) \cdot \sqrt{1 + (\rho_1)^2 \cdot k_{\text{об1}}^2}}{I_1 \cdot k_{\text{об2}} \cdot k_{\text{ск}}} = 187,32 \text{ А/мм}^2$$

Струм в обмотці фазного ротора:

$$I_{\text{ст}} = 2 \cdot I_2'' \cdot m \cdot \omega_1 \cdot k_{\text{об1}} \cdot (1 + \tau_1) \cdot \frac{\sqrt{1 + (\rho_1)^2}}{z_2 \cdot k_{\text{ск}}} = 239,6 \text{ А}$$

Щільність струму в обмотці фазного ротора:

$$J_{\text{ст}} = \frac{I_{\text{ст}}}{S_{\text{ст}}} = 3,06 \text{ А/мм}^2$$

Струм в фазному кільці:

$$I_{\text{кл}} = \frac{I_{\text{ст}}}{k_{\text{пр2}}} = 538,38 \text{ А}$$

Електричні втрати в обмотці статора і ротора відповідно:

$$P_{\text{м1}} = m \cdot (I_1)^2 \cdot r_1' = 326,04 \text{ Вт}; \quad P_{\text{м2}} = m \cdot (I_2'')^2 \cdot r_2'' = 133,48 \text{ Вт}$$

Сумарні втрати в електродвигуні:

$$P_{\Sigma} = P_{\text{м1}} + P_{\text{м2}} + P_{\text{с}\Sigma} + P_{\text{мх}\Sigma} + P_{\text{д}} = 614,51 \text{ Вт}$$

Потужність, що споживається двигуном:

$$P_1 = P_2 + P_{\Sigma} = 3,61 \cdot 10^3 \text{ Вт}$$

Коефіцієнт корисної дії:

$$\eta = \left(1 - \frac{P_{\Sigma}}{P_1} \right) \cdot 100 = 83 \%$$

Потужність, що підводиться до двигуна:

$$P_1 = m \cdot I_1 \cdot U_1 = 3,6 \cdot 10^3 \text{ Вт}; \quad P_2 = m \cdot I_1 \cdot U_1 \cdot \frac{\eta}{100} \cdot \cos(\varphi) = 2,99 \cdot 10^3 \text{ Вт}$$

4.6 Розрахунок максимального моменту

Зміна частини коефіцієнта статора при трапецеїдальному пазі:

$$\lambda_{\text{п1пер}} = \left(\frac{3 \cdot h_{k1}}{b_2 + b_{\text{ш1}}} + \frac{h_{\text{ш1}}}{b_{\text{ш1}}} \right) \cdot k'_{\beta 1} = 0,42$$

Складова коефіцієнта провідності розсіювання статора, що залежить від насичення:

$$\lambda_{1\text{пер}} = \lambda_{\text{п1пер}} + \lambda_{\text{Д1}} = 2,78$$

Змінна частина коефіцієнта ротора:

$$\lambda_{\text{п2пер}} = \frac{h_{\text{ш2}}}{b_{\text{ш2}}} = 0,4$$

Складова коефіцієнта провідності розсіювання ротора, що залежить від насичення:

$$\lambda_{2\text{пер}} = \lambda_{\text{п2пер}} + \lambda_{\text{Д2}} = 3,16$$

Індуктивний опір розсіювання двигуна, що залежить від насичення:

$$x_{\text{пер}} = \frac{x_1' \cdot \lambda_{1\text{пер}}}{\lambda_1} + \frac{x_2'' \cdot \lambda_{2\text{пер}}}{\lambda_2} = 4,01 \text{ Ом}$$

що не залежить від насичення:

$$x_{\text{пос}} = \frac{x_1' \cdot (\lambda_1 - \lambda_{1\text{пер}})}{\lambda_1} + \frac{x_2'' \cdot (\lambda_2 - \lambda_{2\text{пер}})}{\lambda_2} = 2,38 \text{ Ом}$$

Струм ротора, відповідний максимальному моменту:

$$I_{M2}'' = \frac{U_1}{\sqrt{2(r_1'^2 + (x_{\text{пос}} + 0,0852 \cdot x_{\text{пер}})^2 + r_1' \cdot (x_{\text{пос}} + 0,0852 \cdot x_{\text{пер}}))}} +$$

$$+ \frac{-1,24 \cdot 10^3 \cdot \delta \cdot a_1 \cdot (r_1' + 2 \cdot (x_{\text{пос}} + 0,0825 \cdot x_{\text{пер}})) \cdot x_{\text{пер}}}{2 \cdot N_{\text{П1}} \cdot (r_1'^2 + (x_{\text{пос}} + 0,0825 \cdot x_{\text{пер}})^2 + r_1' \cdot (x_{\text{пос}} + 0,0825 \cdot x_{\text{пер}}))} = 26,42 \text{ А}$$

Повний опір схеми заміщення:

$$z_M = \frac{U_1}{I_{M2}''} = 8,33 \text{ Ом}$$

При нескінченно великому ковзанні:

$$z_8 = 0,5 \cdot \left(\sqrt{r_1'^2 + 2 \cdot z_M^2} - r_1' \right) = 4,66 \text{ Ом}$$

Еквівалентний опір схеми заміщення пр. максимальному моменті:

$$R_M = r_1' + z_8 = 7,44 \text{ Ом}$$

Кратність максимального моменту:

$$k_{max} = \frac{m \cdot U_1^2 \cdot (1) - S_H}{2 \cdot R_M \cdot P_2} = 3,13 \quad k_{max} =$$

Ковзання при максимальному моменті:

$$S_M = \frac{r_2''}{z_8} = 0,35$$

4.7 Розрахунок початкового струму і початкового пускового моменту

Висота стрижня клітки:

$$h_{ст} = h_{П2} - h_2 - h_{ш2} = 18,8 \text{ мм}$$

Приведена висота стрижня ротора:

$$\zeta = 0,0735 \cdot h_{ст} \cdot \sqrt{\frac{1}{m_T}} = 1,18$$

Коефіцієнт $\phi=0,1$. Розрахункова глибина проникнення струму в стрижень:

$$h_p = \frac{h_{ст}}{1 + \phi} = 17,09$$

Ширина стрижня на розрахунковій глибині проникнення:

$$b_p = 2 \cdot r_{r1} - \frac{2 \cdot (r_{r1} - r_{r2})}{h_1} \cdot (h_p - r_{r1}) = 2,65 \text{ мм}$$

Площа поперечного перетину стрижня при розрахунковій глибині проникнення струму.

$$S_p = \frac{\pi}{2} \cdot (r_{r1})^2 + (r_{r1} + \frac{b_p}{2}) \cdot (h_p - r_{r1}) = 73,14 \text{ мм}$$

Коефіцієнт витіснення струму:

$$k_{в.т} = \frac{S_{ст}}{S_p} = 1,07$$

Активний опір стрижнів клітки при 20 градусах приведений до обмотки статора:

$$r_{ст.п} = k_{в.т} \cdot r_{ст} = 4,81 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}$$

Активний опір обмотки ротора при 20 градусах приведений до обмотки статора:

$$r'_{2п} = k_{пр1} \cdot (r_{ст.п} + r_{кл}) = 1,17 \text{ Ом}$$

Коефіцієнт $\psi = 0,9$. Коефіцієнт провідності розсіювання паза ротора:

$$\lambda_{\text{п2п}} = \frac{h_{\text{ш2}}}{b_{\text{ш2}}} + \left[\frac{h_1 + 0,8 \cdot r_{r2}}{6 \cdot r_{r1}} \left(1 - \frac{\pi \cdot (r_{r1})^2}{2 \cdot S_{\text{см}}} \right) + 0,66 - \frac{b_{\text{ш2}}}{4 \cdot r_{r1}} \right] \cdot \psi = 1,46$$

Коефіцієнт провідності розсіювання обмоток ротора при пуску:

$$\lambda_{2\text{п}} = \lambda_{\text{п2п}} + \lambda_{\text{Д2}} + \lambda_{\text{кл}} = 4,6$$

Індуктивний опір розсіювання двигуна, що залежить і не залежить від насичення.

$$x_{\text{пер}} = \frac{x_1' \cdot \lambda_{1\text{пер}}}{\lambda_1} + \frac{x_2'' \cdot \lambda_{2\text{пер}}}{\lambda_{2\text{п}}} = 3,07 \text{ Ом}$$

$$x_{\text{пос}} = \frac{x_1' \cdot (\lambda_1 - \lambda_{1\text{пер}})}{\lambda_1} + \frac{x_2'' \cdot (\lambda_{2\text{п}} - \lambda_{2\text{пер}})}{\lambda_{2\text{п}}} = 2,38 \text{ Ом}$$

Активний опір к.з при пуску:

$$r_{\text{к.п}} = r_1' + r_{2\text{п}}' \cdot m_{\text{Т}} \cdot (1 + \tau_1)^2 \cdot (1 + \rho_1)^2 = 4,62$$

Початкові струм і момент визначаються в такій послідовності.

Струм ротора при запуску для двигунів з малим опором ротора і з будь-якою формою статора.

$$I_{\Pi 2}'' = \frac{U_1}{\sqrt{r_{\text{к.п}}^2 + (x_{\text{пос}} + 0,825 \cdot x_{\text{пер}})^2}} + \frac{-1,24 \cdot 10^3 \cdot \delta \cdot a_1 \cdot (x_{\text{пос}} + 0,825 \cdot x_{\text{пер}})}{N_{\Pi 1} \cdot (r_{\text{к.п}}^2 + (x_{\text{пос}} + 0,825 \cdot x_{\text{пер}})^2)} = 37,59 \text{ А}$$

Повний опір схеми заміщення:

$$z_{\text{к.п}} = \frac{U_1}{I_{\Pi 2}''} = 5,85 \text{ Ом}$$

Індуктивний опір схеми заміщення:

$$z_{\text{к.п}} = \sqrt{z_{\text{к.п}}^2 + r_{\text{к.п}}^2} = 7,46 \text{ Ом}$$

Активна и реактивна складові струму статора при запуску:

$$I_{\text{п.а1}} = I_{\text{с.а}} + I_{\Pi 2}'' \cdot \left(\frac{r_{\text{к.п}}}{z_{\text{к.п}}} \cdot \frac{1 - (\rho_1)^2}{1 + (\rho_1)^2} + \frac{x_{\text{к.п}}}{z_{\text{к.п}}} \cdot \frac{2 \cdot \rho_1}{1 + (\rho_1)^2} \right) = 33,02 \text{ А}$$

$$I_{\text{п.р1}} = I_{\text{с.р}} + I_{\Pi 2}'' \cdot \left(\frac{x_{\text{к.п}}}{z_{\text{к.п}}} \cdot \frac{1 - (\rho_1)^2}{1 + (\rho_1)^2} + \frac{r_{\text{к.п}}}{z_{\text{к.п}}} \cdot \frac{2 \cdot \rho_1}{1 + (\rho_1)^2} \right) = 48,43 \text{ А}$$

Фазний струм статора при пуску:

$$I_{\Pi 1} = \sqrt{I_{\text{п.а1}}^2 + I_{\text{п.р1}}^2} = 58,62 \text{ А}$$

Кратність початкового пускового струму $I_{\Pi 1} / I_1 = 9,38$.

Активний опір ротора при пуску, приведений до статора, при розрахунковій робочій температурі і Г-образної схемі заміщення.

$$r_{2\Pi}'' = r_{2\Pi}' \cdot m_T \cdot (1 + \tau_1)^2 \cdot (1 + (\rho_1)^2) = 1,73 \text{ Ом}$$

Кратність початкового пускового моменту

$$k_p = \frac{m \cdot I_{\Pi 2}'' \cdot r_{2\Pi}'' \cdot (1 - S_H)}{P_2} = 2,35 \text{ Ом}$$

Тепловий і вентиляційний розрахунок. Обмотки статора.

Втрати в обмотці статора при максимальній припустимій температурі:

$$m_T' = 1,48; \quad k = 0,2; \quad P_{M1}' = m \cdot (I_1)^2 \cdot m_T' \cdot r_1' = 482,54$$

Умовна внутрішня поверхня охолодження активної частини статора:

$$S_{\Pi 1} = \pi \cdot D_1 \cdot l_1 = 3,4 \cdot 10^4$$

Умовний периметр поперечного перетину трапецеїдального паза:

$$\Pi_1 = 2 \cdot h_{\Pi 1} + b_1 + b_2 = 44,9 \text{ мм}$$

Умовна поверхня охолодження. Пазів:

$$S_{\text{и.}\Pi 1} = z_1 \cdot \Pi_1 \cdot l_1 = 1,54 \cdot 10^5 \text{ мм}^2$$

лобових частин обмотки:

$$S_{л1} = 4 \cdot \pi \cdot D_1 \cdot l_{в1} = 7,13 \cdot 10^4 \text{ мм}^2$$

Двигун с охолоджуючими ребрами на станині:

$$h_p = 0,6 \cdot \sqrt[4]{h\nu^3} = 18,97 \text{ мм}$$

$$n_p = 6,4 \cdot \sqrt[3]{h\nu^3} = 29,71 \text{ мм}$$

$$S_{\text{маш.р}} = (\pi \cdot D_{1H} + 8 \cdot n_p \cdot h_p) \cdot (l_1 + 2 \cdot l_{в1}) = 9,84 \cdot 10^5 \text{ мм}^2$$

де h_p і n_p – число і висота охолоджувальних ребер станини.

Питомий тепловий потік від втрат в активній частині обмотки і від втрат в сталі, віднесених до внутрішньої поверхні охолодження активної частини статора.

$$P_{п1} = \frac{k \cdot \left(\frac{P'_{M1} \cdot 2 \cdot l_1}{l_{cp1}} + P_{c\Sigma} \right)}{S_{п1}} = 1,73 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/мм}^2$$

Те ж, від втрат в активних частинах обмотки, віднесених до поверхні охолодження пазів.

$$P_{\text{и.п1}} = \frac{\left(\frac{P'_{M1} \cdot 2 \cdot l_1}{l_{cp1}} \right)}{S_{\text{I.п1}}} = 1,16 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/мм}^2$$

Те ж, від втрат в лобових частинах обмотки, віднесених до поверхні охолодження лобової частини обмотки.

$$P_{л1} = \frac{\left(\frac{P'_{M1} \cdot 2 \cdot l_1}{l_{cp1}} \right)}{S_{л1}} = 4,27 \cdot 10^3 \text{ Вт/мм}^2$$

Окружна швидкість ротора:

$$v_2 = \frac{\pi \cdot D_{2H} \cdot n_1}{60000} = 8,91 \text{ м/с}$$

Перевищення температури внутрішньої поверхні активної частини статора над температурою повітря у середині машини.

$$\alpha_1 = 9 \cdot 10^5 \text{ (Вт/мм}^2 \cdot \text{град)}; \quad \Delta t_{п1} = \frac{P_{п1}}{\alpha_1} = 19,21 \text{ град}$$

α_1 – коефіцієнт тепловіддачі поверхні статора.

Перепад температури в ізоляції паза і котушок з круглих дротів:

$$\frac{d}{d'} = 0,91; \quad \lambda'_{\text{эКВ}} = 100 \cdot 10^{-5} \text{ (Вт/мм} \cdot \text{град)}; \quad \lambda_{\text{эКВ}} = 16 \cdot 10^{-5} \text{ (Вт/мм} \cdot \text{град)};$$

$$\Delta t_{и.п1} = p_{и.п1} \cdot \left(\frac{b_{и1}}{\lambda_{\text{эКВ}}} + \frac{b_1 + b_2}{16 \cdot \lambda'_{\text{эКВ}}} \right) = 2,78 \text{ град}$$

де $\lambda_{\text{эКВ}}$ – еквівалентний коефіцієнт теплопровідності ізоляції в пазу, включаючи повітряний простір;

$\lambda'_{\text{екв}}$ – еквівалентний коефіцієнт теплопровідності внутрішньої ізоляції котушки в залежності від співвідношення діаметру ізольованого і неізольованого провідників.

Перевищення температури зовнішньої поверхні лобової частини обмотки над температурою повітря у середині двигуна.

$$\Delta t_{\text{л1}} = \frac{P_{\text{л1}}}{\alpha_1} = 47,39 \text{ град}$$

Перепад температури в ізоляції лобових частин котушок з круглих дротів

$b_{\text{л.л}} = 0,4 \text{ мм}$; - одношарова товщина ізоляції в провіднику статора.

$$\Delta t_{\text{и.л1}} = P_{\text{л1}} \cdot \left(\frac{b_{\text{и.л}}}{\lambda_{\text{экв}}} + \frac{h_{\text{п1}}}{12 \cdot \lambda_{\text{экв}}} \right) = 16,28 \text{ град}$$

Середнє перевищення температури обмотки над температурою повітря у середині двигуна.

$$\Delta t'_1 = (\Delta t_{\text{п1}} + \Delta t_{\text{и.л1}}) \cdot \frac{2 \cdot l_1}{l_{\text{ср1}}} + (\Delta t_{\text{л1}} + \Delta t_{\text{и.л1}}) \cdot \frac{l_{\text{л1}}}{l_{\text{ср1}}} = 48,25 \text{ град}$$

Втрати в двигуні із ступенем захисту IP44, що передаються повітря у середині двигуна:

$$P'_{\text{М2}} = m \cdot (I_2'')^2 \cdot m'_T \cdot r_2'' = 197,55 \text{ Вт}$$

$$P'_\Sigma = k \cdot \left(P'_{\text{М1}} \cdot \frac{2 \cdot l_1}{l_{\text{ср1}}} + P_{\text{с}\Sigma} \right) + P'_{\text{М1}} \cdot \frac{l_{\text{л1}}}{l_{\text{ср1}}} + P'_{\text{М2}} + 0,1 \cdot P_{\text{мх}\Sigma} + P_{\text{Д}} = 428,79 \text{ Вт}$$

Середнє перевищення температури повітря у середині двигуна над температурою зовнішнього повітря без охолоджуючих ребер на станині або з ребрами при коефіцієнті підігріву повітря α_B :

$$\alpha_B = 2,3 \cdot 10^{-5} (\text{Вт/мм}^2 \cdot \text{град}); \Delta t_B = \frac{P'_\Sigma}{S_{\text{маш.р}} \cdot \alpha_B} = 18,95 \text{ град}$$

Середнє перевищення температури обмотки над температурою зовнішнього повітря:

$$\Delta t_1 = \Delta t'_1 + \Delta t_B = 67,2 \text{ град}$$

Температура яку витримує клас нагрівостійкості ізоляції F дорівнює 100 градусів.

4.8 Розрахунок маси двигуна і динамічного моменту інерції ротора

Динамічний момент інерції:

$$J_{\text{и.д}} = 0,55 \cdot D_{2H}^4 \cdot l_2 \cdot 10^{-12} = 8,671 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Маса дротів обмотки статора при круглому перетину:

$$m_{M1} = \left[7,55 + 1,35 \cdot \left(\frac{d'}{d} \right)^2 \right] \cdot z_1 \cdot \frac{N_{\text{п1}}}{2} \cdot l_{\text{ср1}} \cdot c \cdot S \cdot 10^{-6} = 2,95 \text{ кг}$$

Маса алюмінію фазного ротора з литою або набраною кліткою:

$$b_{\text{л}} = 0,3 \cdot \sqrt{h\nu} = 3 \text{ мм}; \quad l_{\text{л}} = 0,31 \cdot h\nu = 31 \text{ мм}; \quad h_{\text{л}} = 0,8 \cdot \sqrt[3]{h\nu^2} = 17,88 \text{ мм};$$

$$N_{\text{л}} = \sqrt[3]{D_{1H}} = 6$$

$$m_{\text{а.л2}} = 2,7 \cdot (z_2 \cdot S_{\text{ст}} \cdot l_2 + 2 \cdot \pi \cdot D_{\text{кл.ср}} \cdot S_{\text{кл}} + 1,1 \cdot N_{\text{л}} \cdot (l_{\text{л}} - l_{\text{кл}}) \cdot h_{\text{л}} \cdot b_{\text{л}}) \cdot 10^{-6} = 0,96;$$

де $b_{\text{л}}$ – товщина лопатки;

$l_{\text{л}}$ – довжина;

$h_{\text{л}}$ – висота;

$N_{\text{л}}$ – кількість лопаток.

Маса сталі сердечників ротора і статора $n_{\text{к2}} = 0$;

$$m_{\text{с}\Sigma} = 7,8 \cdot l_1 \cdot k_{\text{с}} \cdot \left[0,785 \cdot (D_{1H}^2 - D_2^2) - \left[-z_1 \cdot S_{\text{п11}} + (-1)z_2 \cdot S_{\text{ст}} - \frac{\pi \cdot d_{\text{к2}}^2}{4} \cdot n_{\text{к2}} \right] \right] \cdot 10^{-6} = 12,38 \text{ кг}$$

Маса ізоляції статора при трапецеїдальних пазах:

$$m_{\text{и1}} = 1,35 \cdot (l_1 + 20) \cdot (2 \cdot h_{\text{п1}} + 3 \cdot \frac{b_1 + b_2}{2}) \cdot b_{\text{и1}} \cdot z_1 \cdot 10^{-6} = 0,07 \text{ кг}$$

Маса конструктивних матеріалів двигуна із ступенем захисту IP44 при $h < 400$ мм, станина і щити з чугуну, ротор фазний:

$$m_{\text{к}} = (0,6 \cdot D_{1H}^2 \cdot l_1 + 3 \cdot D_{1H}^3) \cdot 10^{-6} = 17,8 \text{ кг}$$

Маса двигуна:

$$m_{\text{дв}} = m_{\text{м1}} + m_{\text{а.л2}} + m_{\text{с}\Sigma} + m_{\text{и1}} + m_{\text{к}} = 2,95 + 0,96 + 12,38 + 0,07 + 17,8 = 34,2 \text{ кг}$$

Асинхронний двигун, що було спроектовано має наступні переваги:
 невеликий активний опір обмотки $k_H \approx 0,96$; коефіцієнт потужності $\cos(\varphi) = 0,8$;
 коефіцієнт корисної дії $\eta = 0,82\%$; покращені енергетичні та масові показники.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

Охорона праці – це система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів і засобів, направлених на збереження здоров'я і працездатності людини в процесі виробництва.

Дисципліна "Охорона праці" є соціально-технічною наукою, яка проявляє і вивчає виробничі небезпеки і професійні шкідливості, розробляє методи їх запобігання або ослаблення з метою усунення нещасливих випадків, професійних захворювань, аварій і пожеж.

Цілком безпечних і нешкідливих виробництв не існує. Задача охорони праці – звести до мінімуму вірогідність нещасливого випадку або захворювання працюючого з одночасним забезпеченням комфортних умов при максимальній продуктивності роботи.

Правовою основою законодавства щодо охорони праці є Конституція України, Закони України “ Про охорону праці “,” Про охорону здоров'я “,” Про пожежну безпеку“, “Про забезпечення санітарного і епідеміологічного благополуччя населення “,а також Кодекс законів про працю

Верховна Рада України 14 жовтня 1992 року прийняла Закон України “ Про охорону праці “. Цей Закон Визначає основні положення щодо реалізації конституційного права громадян про охорону їх життя і здоров'я в процесі трудової діяльності, регулює за участю відповідальних державних органів відношення між власником підприємства і працівником з питань безпеки, гігієни праці і виробничого середовища і встановлює єдиний порядок організації охорони праці в Україні.

Відповідно до ст.37 Закону України “ Про охорону праці “ державне управління охороною праці в Україні здійснює:

- кабінет Міністрів України;

- комітет із спостереження за охороною праці Міністерства праці і соціальної політики України;
- міністерства і інші центральні органи державної виконавчої влади;
- місцева державна адміністрація, місцеві Ради народних депутатів;
- асоціації, концерни, корпорації і інші об'єднання підприємств.

5.1 Аналіз небезпечних і шкідливих чинників, характерних при роботі електрообладнання пристроїв для спуску та підйому

Електричний струм. Електротравма –це травма, викликана дією електричного струму або електричної дуги. Електротравми діляться на два види: електротравми, які виникають при проходженні струму через все тіло людини, і електротравми, появу яких не пов'язано з проходженням струму через тіло людини. Поразка людини в другому випадку зв'язується з опіками, засліпленням електричною дугою, падінням, тобто механічним пошкодженням. Електротравматизм – це явище, яке характеризується сукупністю електротравм, які виникають і повторюються в аналогічних виробничих, побутових умовах і ситуаціях.

В процесі експлуатації електроенергетичних установок відмічене погіршення стану здоров'я персоналу, обслуговуючого ці установки. Суб'єктивно це виражається в погіршенні самопочуття працюючих -підвищення стомлюваності, млявість, головні болі, поганий сон, болі в серці і т.п.

Інтенсивне електромагнітне поле промислової частоти викликає у працюючих порушення функціонального стану центральної нервової системи, серцевої діяльності і системи кровообігу. При цьому спостерігаються підвищена стомлюваність, зниження точності робочих рухів, зміна кров'яного тиску і пульсу, виникнення болю в серці, що супроводжуються серцебиттям і аритмією, і т.п. Ефект дії електромагнітного поля на біологічний об'єкт прийнято оцінювати кількістю електроенергії, поглинальної цим об'єктом при знаходженні його в полі.

Процес біологічної дії електричного поля на організм людини вивчений недосить. Передбачається, що порушення регуляції фізіологічних функцій організму – зміна кров'яного тиску, пульсу, порушення серцевого ритма-обумовлено дією поля на різні відділи нервової системи. При цьому підвищення збудливості центральної нервової системи відбувається за рахунок рефлекторної дії поля, а гальмівний ефект викликається прямою дією поля на структури головного і спинного мозку. Зі зростанням сили струму небезпека поразки тіла людини ним зростає.

Шум на судах. Рівні шуму в суднових приміщеннях нерідко перевищують санітарні норми: у машинних відділеннях морських судів на 20 дБ, в службових приміщеннях – на 25 дБ і більш. Більшість цих перевищень співпадає з діапазоном частот 2000-6000 Гц, несприятливо діючих на організм людини.

У енергетичних відділеннях, обладнаних двигунами з частотою обертання валу менше 300 об/мин, інтенсивність шуму не більш 100 дБ, а максимальні рівні спектру розташовуються у області середніх і високих частот. На судах з двигунами, частота обертання валу яких перевищує 300 об/хв, інтенсивність шуму в енергетичному відділенні вища 100 дБ (до 120 дБ) з переважанням звукової енергії у області середніх і високих частот. В цілому рівні шуму в енергетичних відділеннях коливаються в широких межах: від 84 до 120 дБ. Залежно від розмірів енергетичного відділення, його акустичних властивостей, коефіцієнта звукопоглинання бортів і перегородок, кількості працюючих двигунів відмінності в рівнях шуму можуть скласти 2-5 дБ і більш.

Частотна характеристика шуму у робочих місць більш виражена у високочастотних смугах спектру. Рівні звукового тиску в цій частині спектру перевищують допустимі параметри в середньому на 15 дБ.

Для зниження аеродинамічних шумів, створюваних двигунами, використовуються глушники різних конструкцій. Застосування глушників дозволяє понизити загальний рівень шуму на 10-12 дБ.

Для зниження повітряного шуму, випромінюваного зовнішніми поверхнями дизелів, сполучених з генераторами, використовуються звукоізолюючі кожухи або бокси, що дозволяють зменшити загальний рівень шуму на 10-15 дБ, а високочастотного – на 20 дБ і більш.

В цілях зниження шуму систем побутового обслуговування обмежується швидкість потоку в трубопроводах до 2 м/с, зменшується число перехідних муфт і трійників. Зниження шуму, створюваного електрорадіонавігаційним устаткуванням, може бути досягнуте розміщенням його в спеціальних звукоізолюваних пультах.

Вібрації. Головними джерелами вібрації на судах є весельні гвинти, двигуни, валопроводи і допоміжні механізми. Вібрацію можуть викликати також хвилювання моря і удари льоду об корпус судна. Розміщення могутніх енергетичних установок у відносно невеликому за розмірами машинному відділенні, висока швидкість судів підсилюють вібрацію. Від дизеля передаються коливання у області інфразвукових і низьких звукових частот. Як нормовані параметри вібрації в приміщеннях судів прийняті рівні середньоквадратичного значення коливальної швидкості дБ, в октавних смугах частот з середньо геометричними частотами 2, 4, 8, 16, 32, 63 Гц.

За допомогою віброізолюючих засобів, до яких відносяться віброізолюючі фундаменти і муфти, амортизації, гнучкі патрубки, прокладки з гуми пластмаси, досягається обмеження розповсюдження вібрації від джерел каюти екіпажа і пасажирів. Для віброізоляції механізмів використовуються резино металеві амортизатори, а також амортизатори типу АКСС-м, АКСС-І, ЛР, АПС.

Для ослаблення вібрації в звуковому діапазоні частот на вібруючі металеві поверхні, фундаменти і судові корпусні конструкції наносять вібропоглинаючим(демпфуючі) покриттям. Жорсткі покриття (пластмаси) добре ослабляють вібрацію на низьких і середніх звукових частотах, м'які покриття (з гуми, мастикові) – на середніх і високих частотах. За допомогою

вібропоглинаючих покриттів можна понизити звукову вібрацію в діапазоні частот від 60 Гц до 10 кГц на 3-8 дБ.

Електромагнітні поля. Електромагнітні поля (ЕМП), що створюються кожним джерелом, умовно ділять на зони: індукції (ближня), хвильову, або випромінювання (дальня), і інтерференції (проміжна). У зоні індукції напруженості електричної і магнітної складових можуть відрізнятися один від одного у багато разів. Вони зміщені по фазі на 90° , тобто якщо одна з них досягає максимуму, то інша мінімальна.

Ступінь опромінювання електричним полем залежить від рівня його напруженості і тривалості дії, Тривалість перебування людини в електричному полі повинна знаходитися в зворотній залежності від напруженості поля. Гранично допустима напруженість ЕМП на робочих місцях не повинна перевищувати величин, передбачених відповідними санітарними правилами і ГОСТом. Випромінювана в навколишнє середовище електромагнітна енергія може робити несприятливий вплив на організм людини.

5.2 Розробка заходів з техніки безпеки при роботі в електроустановках, які керують пристроями для спуску та підйому

Вживані в електроустаткуванні захисні заходи умовно можна розділити на дві групи: ті, які забезпечують безпеку при нормальному режимі роботи електроустаткуванні і ті, які забезпечують безпеку при аварійному режимі роботи.

До технічних засобів безпечної експлуатації електроустановок при нормальному режимі роботи відносяться:

1. Електрична ізоляція
2. Блокування автоматичним приладом
3. Розміщення струмоведучих частин на недосяжній висоті або в недоступному місці
4. Мала напруга

5. Вирівнювання потенціалів

6. Захисне розділення мереж

Робота щодо забезпечення безпечної експлуатації електроустаткування здійснюється відповідно до обов'язкових, для всіх споживачів електроенергії, незалежно від їх відомчої приналежності, правилами технічної експлуатації електроустаткування споживачів і правилами техніки безпеки при експлуатації електроустаткування споживачів. Обслуговування діючої електроустаткування, проведення в них оперативних перемикань, організація і проведення ремонтних, монтажних, налагоджувальних робіт і випробувань здійснюються спеціально підготовленим електротехнічним персоналом.

У місцях постійного чергування персоналу повинні бути: аптечка з необхідними пристосуваннями і засобами для надання першої медичної допомоги; плакати, присвячені правилам надання першої медичної допомоги, виконання штучного дихання і зовнішнього масажу серця, вивішені на видних місцях.

ВИСНОВКИ

1. Розраховано трифазний асинхронний двигун з фазним ротором, за способом захисту від дії навколишнього середовища виконання IP44, потужністю 3 кВт, коефіцієнтом корисної дії 82 %, масою 34,2 кг.

2. Проектування визначило головні розміри: внутрішній діаметр і довжини сердечника статора. Розраховано сердечник статора і ротора та обрано марку сталі. Виконано розрахунок магнітного кола при неробочому русі.

3. Виконано розрахунок характеристик намагнічування і неробочого руху електродвигуна. Розбіжності між розрахунковою та нормальною характеристикою в робочій зоні не перевищує 15 %, що і вказує на правильний розрахунок магнітного кола. Також розраховані параметри обмотки, визначені електричні та енергетичні параметри.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Блінцов О.В. Модульна структура підводного апарата-робота багатоцільового призначення. Підводна техніка і технологія: Матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю. – Миколаїв: НУК, 2013. – С. 53-56
2. Теорія електропривода: Підручник/ За ред. М.Г. Поповича.- К.: Вища школа, 1993.
3. Основи електроприводу: Підручник / Ю.М. Лавріненко, О.Ю. Синявський, В.В. Савченко; за ред. Ю.М. Лавріненка. – К. 2010.
4. Зеленов А.Б. Теорія електропривода: Методика проектування електроприводів: Підручник. – Луганськ: Вид-во "Ноулідж", 2010. – 670 с.
5. Піцан Р., Бардачевський В., Бойчук Б. Збірник задач до курсу «Електропривод». Навчальний посібник. – Львів: Видавництво державного університету «Львівська політехніка», 1999. – 426 с.
6. Блінцов О. В. Оптимізація довжини кабель-троса при керуванні рухом прив'язного телекерованого підводного апарата. Вісник НТУ «ХП». 2016. № 49 (1221). С. 18–24.
7. Блінцов О. В., Надточій В. А. Автоматизація керування одноланковими самохідними прив'язними підводними системи: навчальний посібник. Миколаїв: Вид-во НУК, 2014. 124 с.
8. Створення універсальних транспортних суден і засобів океанотехніки: монографія / С. С. Рижков, В. С. Блінцов, Г. В. Єгоров та ін.; за ред. С. С. Рижкова. Миколаїв: Видавництво НУК, 2011. 340 с.
9. Блінцов О.В. Синтез залежності між силою гідродинамічного опору та діаметром кабель-троса підводного апарата-робота. Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2009. – №6(429). – С. 55-61.