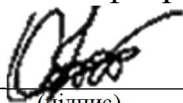


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
імені адмірала Макарова
Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки
Кафедра суднових електроенергетичних систем

"Допущений до захисту"

В.о. зав. кафедри СЕЕС


Обрубов А.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

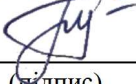
«15» травня 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

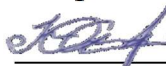
на здобуття ступеня вищої освіти "**бакалавр**"

на тему: ПРОЕКТУВАННЯ АСИНХРОННОГО ЗАГЛИБНОГО
ВОДОЗАПОВНЕНОГО ДВИГУНА
ДЛЯ НАСОСНОЇ СТАНЦІЇ

Виконав: студент групи 4301з


Подиряко І.Г.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи: ст. викладач


Александровський С.Ю.
(підпис) (прізвище та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки

Кафедра СЕЕС
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка, електромеханіка
Освітня програма Електромеханіка та електроенергетика

ЗАТВЕРДЖУЮ

Гарант освітньої програми

 Валянська Я.Б.
(підпис)

_____ 2026р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІОНУ РОБОТУ на здобуття ступеня вищої освіти "бакалавр"

Студенту Подиряку Ігорю Григоровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Проектування асинхронного заглибного водозаповненого двигуна для насосної станції

керівник роботи: ст. викладач каф. СЕЕС Александровський С.Ю.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора № _____ від _____ 2026 року

2. Термін подання роботи: _____

3. Вихідні дані по роботі: Спроектувати асинхронний заглибний двигун потужністю 125 кВт, швидкістю обертання 3000 об/хв, напругою живлення 660В для свердловинної насосної станції

4. Перелік питань, що належать до розробки (найменування розділів):
Розділ 1. Особливості проектування заглибних асинхронних електродвигунів;
Розділ 2. Розрахунок асинхронного заглибного двигуна;
Розділ 3. Автоматизована схема керування насосною станцією водонапірної бапти;
Розділ 4. Охорона праці.

5. Перелік презентаційних матеріалів:

1. Баптовa водокaчка з заглибним електродвигуном; 2. Зовнішній вигляд заглибного асинхронного двигуна; 3. Обмотка статора; 3. Характеристики спроектованого двигуна (робочі, пускові); 5. Принципова електрична схема автоматизованої системи керування заглибним насосом водонапірної бапти

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
ОП	Александровський С.Ю.		

7. Дата видачі завдання 21.02.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Аналіз особливостей проектування заглибних асинхронних електродвигунів	21.02.2026	виконано
2	Проектування заглибного двигуна	14.03.2026	виконано
3	Розрахунок робочих та пускових характеристик	28.03.2026	виконано
4	Механічний розрахунок	11.04.2026	виконано
5	Тепловий розрахунок	18.04.2026	виконано
6	Розробка схеми керування заглибним насосом	25.05.2026	виконано
7	Виконання розділу охорони праці	29.05.2026	виконано
8	Оформлення дипломної роботи	06.05.2026	виконано

Студент


(підпис)

Керівник проекту


(підпис)

Подиряко І.Г.

(прізвище та ініціали)

Александровський С.Ю.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Дана дипломна робота присвячена розробці заглибного асинхронного двигуна потужністю 125 кВт, частотою обертання 3000 об/хв, напругою живлення 660 В, призначеного для приводу свердловинного відцентрового насоса.

При проектуванні були розглянуті наступні питання: особливості конструкції і проектування заглибних асинхронних двигунів, визначення головних розмірів, розрахунок обмоток, розмірів пазів, ярем статора і ротора, розрахунок струму намагнічування при холостому ході, втрат і ККД спроектованого двигуна, а також механічний розрахунок. Крім того, досить докладно розглянутий тепловий розрахунок. Розроблена автоматизована схема керування спроектованим свердловинним насосом в складі насосної станції.

Також у дипломному проекті розглянуті проблеми охорони праці.

Ключові слова: асинхронний двигун; свердловинний насос; насосна станція; тепловий розрахунок

ABSTRACT

This diploma thesis is devoted to the development of a submersible asynchronous motor with a capacity of 125 kW, a rotation frequency of 3000 rpm, a supply voltage of 660 V, intended for driving a well centrifugal pump.

The following issues were considered during the design: design features and design of submersible asynchronous motors, determination of the main dimensions, calculation of windings, dimensions of slots, stator and rotor yokes, calculation of the magnetizing current at idle, losses and efficiency of the designed motor, as well as mechanical calculation. In addition, the thermal calculation is considered in sufficient detail. An automated control circuit has been developed for the designed borehole pump, which is part of the pumping station.

The diploma thesis also considers the problems of labor protection.

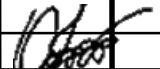
					141.43013. БР. ПЗ.	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		3

ЗМІСТ

Вступ	6
1. Особливості проектування заглибних асинхронних електродвигунів	10
2. Розрахунок асинхронного заглибного двигуна	22
2.1. Вихідні дані	23
2.2. Визначення головних розмірів	23
2.3. Обмотка, пази і ярмо статора	25
2.4. Пази, ярмо і обмотка ротора	28
2.5. Розрахунок намагнічуючого струму при холостому ході	31
2.6. Активні і індуктивні опори обмоток	36
2.7. Втрати і ККД	39
2.8. Коефіцієнт потужності	42
2.9. Робочі характеристики	43
2.10. Пускові характеристики	46
2.11. Механічні розрахунки	51
2.12. Тепловий розрахунок	54
3. Автоматизована схема керування насосною станцією водонапірної башти	63
4. Охорона праці	70
Вступ	71
4.1. Аналіз небезпечних і шкідливих факторів, характерних при роботі з двигуном	71
4.2. Розрахунок захисного заземлення заглибного двигуна	75
4.3 Розробка заходів щодо забезпечення безпеки під час експлуатації та обслуговування обладнання	77
Висновок	79
Висновки з дипломної роботи	80
Додатки	81
Додаток А. Крива намагнічування двигуна	82

Додаток Б. Таблиця умовних позначень	83
Список використаної літератури	84

					141. 4301з. БР. ПЗ.	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		5

					141. 4301з. БР. ПЗ. В			
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Вступ	Літ.	Лист	Листів
Розроб.	Подирияко І.Г.							
Керівник	Александровський						6	4
Консульт.						ННІАЕ НУК		
Н. контр.								
В.о.зав. каф.	Обрубов А.В.							

ВСТУП

Заглибний електродвигун працює в складі насосної установки [3, 10] (рис.В.1), яка включає в себе електронасосний агрегат, що складається з відцентрового насоса 2 і розташованого під ним електродвигуна 1, струмопідвідний кабель 6, водопідйомний трубопровід 7, кріпильні пояса 8, обладнання гирла свердловини 9, систему автоматичного управління 13.

Вирішальним фактором бурхливого розвитку, розробки і використання заглибних електронасосних агрегатів можна віднести такі переваги перед іншими водопідйомними пристроями:

- 1) порівняно високі частоти обертання обумовлюють невелику масу насосних установок;
- 2) простота конструкції установки і, як наслідок, простота монтажу і демонтажу електронасоса;
- 3) заглибні електронасоси дозволяють використовувати їх в кілька вигнутих свердловинах. Допустимий вигин визначається можливістю монтажу електронасоса в свердловині;
- 4) в експлуатації заглибний електронасос порівняно безшумний і не створює небезпеки для цілісності свердловин вібрацій;
- 5) заглибний насос не тільки дозволяє механізувати процес водопідйому, але і дає можливість досить просто вирішити проблему його максимальної автоматизації.

Так як основним елементом свердловинних електронасосів є заглибний електродвигун, то очевидна необхідність розгляду умов їх роботи:

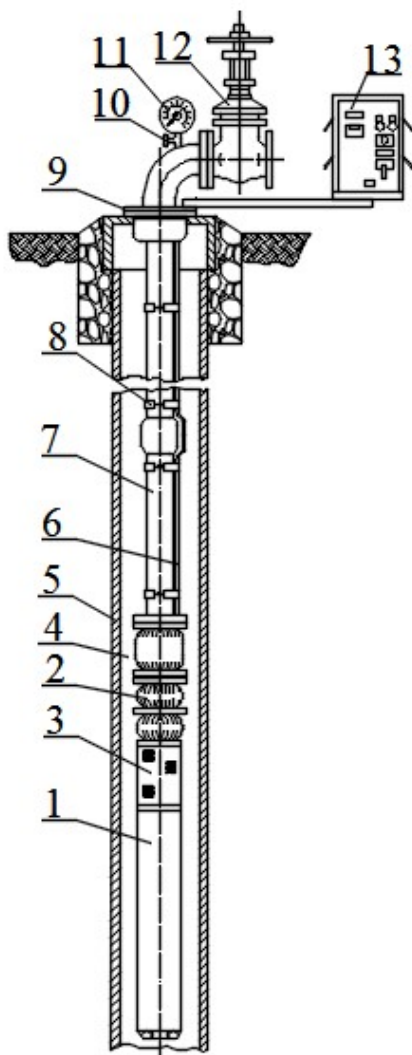
- 1) заглибний електродвигун розташований в свердловині вертикально нижче входу води, що відкачується відцентрового насоса. Це забезпечує зменшення загального діаметра агрегату і конструктивну простоту;
- 2) електродвигун завжди знаходиться під рівнем води, що відкачується, яка має різні температуру, забрудненість і хімічний склад. Ці фактори викликають необхідність захисту внутрішньої порожнини електродвигуна;

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

3) підведення електроенергії до двигуна здійснюється спеціальним водостійким кабелем, довжина якого залежить від глибини свердловини і може досягати 640 м. Кабель має певний електричний опір, що впливає на робочі характеристики двигуна;

4) момент опору на валу заглибного електродвигуна має вентиляторний характер;

5) при зупинці працюючого в свердловині насосного агрегату, який не має зворотного клапана, вода, що заповнює напірний трубопровід, почне йти з нього через насос в свердловину. Внаслідок чого насос починає працювати турбіною, обертаючи ротор двигуна в сторону, протилежну його номінальному напрямку руху;



6) до надійності насоса пред'являються підвищені вимоги, так як в процесі експлуатації профілактичні роботи не проводяться через складність операції підйому і опускання електронасоса в свердловину.

Виходячи з основних особливостей експлуатації заглибних електродвигунів, можна сформулювати ряд технічних вимог, що пред'являються до цього типу машин [9]:

Рис.В.1. Насосна установка

1 – електродвигун; 2 – насос; 3 – вхід до насосу;
4 – зазор; 5 – обсадна труба свердловини; 6 – струмопідвідний кабель; 7 – водопідйомний трубопровід; 8 – кріпильні пояса; 9 – опорний пристрій; 10 – триходовий кран; 11 – манометр; 12 – засувка; 13 – система автоматичного управління

1) матеріали деталей електродвигунів повинні застосовуватися з числа дозволених санітарно-епідеміологічними органами України;

2) електродвигуни повинні допускати певну кількість включень в годину з заданим інтервалом часу;

3) опір ізоляції обмотки статора в холодному стані має бути не менше 30 ... 50 МОм для напруги 660 В і не менше 100 МОм до 3000 В (при робочій температурі відповідно 0,5...1 і 50 Мом);

4) різниця опорів фаз в холодному стані, виміряна при постійному струмі не повинна перевищувати 10% номінального значення;

5) конструкція двигунів повинна забезпечувати безаварійну роботу спільно з насосом при зворотному обертанні протягом 5 хв;

6) двигуни повинні працювати при повному зануренні у воду, яка повинна обов'язково обмивати їх зовнішню поверхню;

7) конструкція і вживані матеріали повинні забезпечувати надійну роботу електродвигунів без проведення профілактичних робіт, а так само гарантувати розбирання при капітальному ремонті.

Крім того, до кожного нового заглибного електродвигуна, що розробляється, можуть пред'являтися вимоги по конструктивному виконанню, щодо захисту його внутрішньої порожнини, за способом приєднання до насоса, по стійкості до корозії, за способом охолодження, по допустимості більшого числа включень в годину і т.п.

					141. 4301з. БР. ПЗ. В	Лист
9						9
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

					141. 4301з. БР. ПЗ. Р1			
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Особливості проектування заглубних асинхронних електродвигунів	Лім.	Лист	Листів
Розроб.	Подиряко І.Г.						10	12
Керівник	Александровський.					ННІАЕ НУК		
Консульт.								
Н. контр.								
В.о.зав. каф.	Обрубов А.В.							

1. ОСОБЛИВОСТІ ПРОЕКТУВАННЯ ЗАГЛИБНИХ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

1.1. Основи проектування. Одним з основних критеріїв при проектуванні заглубних електродвигунів слід вважати відповідність створюваної конструкції вимогам сумісності її з середовищем, в якій вона повинна працювати. У зв'язку з тим, що конструкція даного типу машин майже не змінилася з часів її створення, при розробці типорозмірів двигуна розглядаються варіанти виконання окремих вузлів і деталей, способу охолодження, захисту внутрішньої поверхні від домішок і корозії, системи "дихання" і т.п. з урахуванням електромагнітних, теплових, гідродинамічних і механічних процесів.

При розробці конструкції необхідно прагнути до максимального використання поперечного перерізу електродвигуна з урахуванням технологічних особливостей його виготовлення, експлуатації, енергетичних параметрів і ступеня використання активних матеріалів. У той же час прагнення отримати мінімальні габарити не повинне бути на шкоду енергетичними показниками і в першу чергу ККД. Оптимальним слід вважати такий варіант проекту, який повністю задовольняє технічним вимогам при мінімальних витратах.

1.2. Вибір головних розмірів. Розглянемо основні особливості проектування заглубних електродвигунів і відмінності від проектування загальнопромислових асинхронних двигунів.

Підхід до визначення головних розмірів, і в першу чергу внутрішнього діаметра, прийнятий для електродвигунів загального призначення, неприйнятний для заглубних АД через значне обмеження зовнішніх діаметрів їх статорів при практично необмежених довжинах.

Зовнішній діаметр статора визначається розмірами конкретної свердловини і характеристикою насоса, і в завдання проектування не входить, а є одним з вихідних параметрів. Ступінь раціонального використання

					141.4301з. БР. ПЗ. Р1	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		11

поперечного перерізу електродвигуна характеризує відношення зовнішнього діаметра до внутрішнього

$$k_D = \frac{D_c}{D} = a + \frac{b+c}{2} + \sqrt{\left(\frac{b+c}{2}\right)^2 + ac - b + 1}, \quad (1.1)$$

де $a = \frac{\alpha \pi B_\delta}{2 p k_c B_c}$; $b = \frac{2 B_\delta}{k_c B_{z1}}$; $c = \frac{k_i A}{25 k_{зп} J_1 D_c}$; α – коефіцієнт полюсного перекриття;

B_δ, B_c, B_{z1} – індукція в повітряному зазорі ярмі і зубцях статора;

$k_c, k_{зп}$ – коефіцієнти заповнення пакету сталлю і заповнення паза ізолюваним проводом відповідно;

A – лінійне навантаження; J_1 – щільність струму в обмотці статора;

k_i – відношення перетину ізолюваного дроту обмотки статора до перетину міді дроту.

При виборі лінійного навантаження і індукції в повітряному зазорі необхідно враховувати таку особливість водозаповнених заглибних електродвигунів. Зі збільшенням зазору істотно знижуються механічні втрати на тертя об воду. Однак при цьому зменшується $\cos\phi$ і як наслідок збільшуються втрати в міді. Тому рекомендується, особливо для двигунів великих потужностей (16...22 кВт і вище), вибирати більш низькі значення індукції в зазорі при більшому насиченні магнітопроводу.

1.3. Електромагнітний розрахунок заглибного АД за обсягом і послідовності не відрізняється від такого для АД загального призначення. Однак внаслідок особливостей цього типу машин, обумовлених сферою застосування, призначенням і характером експлуатації, є ряд істотно відмінних передумов вибору деяких параметрів і розрахунку окремих елементів.

Через велику товщину водостійкою ізоляції обмотувальних проводів заглибних електродвигунів ширина щілини напівзакритих пазів статора більше, ніж у АД загального призначення, причому при потужності понад 16 кВт щілину стає неприпустимо великий, значно збільшуючи коефіцієнт зазору і істотно знижуючи тим самим $\cos\phi$. Тому в заглибних АД потужністю понад 16 кВт пази статора, як правило, закриті. Це обумовлює два типи обмоток: всіпні

(для двигунів потужністю до 16 кВт) і протяжну (при потужностях понад 16 кВт). В обох випадках пази трапецеїдальні, а ширина зубців по висоті практично однакова. Найбільш простою і технологічною є трифазна одношарова концентрична трьох площинна обмотка "перевальцем". Пазова ізоляція виконується одношарової із плівкових водостійких матеріалів, наприклад поліхлорвінілу або поліетилентерефталату, товщиною 0,05 ... 0,1 мм. Можливо так само застосування покриття стінок паза лаками, що наносяться напиленням або вакуумної просоченням пакета статора смолами.

Величина повітряного зазору впливає майже на всі властивості електричної машини. Зменшення повітряного зазору збільшує $\cos\phi$ і знижує вартість машини, але при цьому погіршує ККД і знижує надійність. Для заглибних електродвигунів, що працюють без профілактичних оглядів і ремонтів, надійність і одновісне магнітне тяжіння, що залежать також від повітряного зазору, вкрай важливі. Тому зазор повинен вибиратися з урахуванням вимог надійності з умов отримання максимального ККД, прийнятного $\cos\phi$ і одностороннього магнітного тяжіння.

Заглибні електродвигуни, які омиваються зовні водою, мають більш інтенсивне охолодження, ніж АД загального призначення, обдуваються повітрям. Однак корисний ефект такого охолодження не може бути повністю використаний через обмежену ізоляції застосовуваних обмотувальних проводів, що не перевищує 60°C для поліхлорвінілу і 80°C для поліетилену. Крім того при температурі води вище 80°C починає інтенсивне випадання опадів, що погано проводять теплоту і посилюють нагрів двигуна, а також погіршують роботу підшипників. Це треба враховувати при виборі щільності струму в обмотках. У заглибних електродвигунах щільності струму в 1,5 ... 2 рази більше, ніж в електродвигунах загального призначення і можуть становити 6,0 ... 7,5 А / мм² в обмотці статора і 4 ... 6 або 6 ... 8 А / мм² в роторі відповідно для алюмінієвої або мідної обмотки.

1.4. Розрахунок магнітопроводу. Специфіка конструкції заглибного АД позначається на його магнітопроводі, в якому частина магнітного потоку

					141. 4301з. БР. ПЗ. Р1	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		13

проходить через вал, що володіє змінним магнітним опором, яке залежить від властивостей матеріалу і розмірів вала, частоти перемагнічування, насичення.

Складна залежність магнітної проникності від ряду факторів не дозволяє аналітично розрахувати глибину проникнення магнітного потоку в вал електродвигуна. Тому криву намагнічування і форму кривої поля в зазорі розраховуємо виходячи з таких міркувань:

1) розподіл індукційних трубок магнітного потоку приймаємо аналогічним

зазначеному на рис.1.1;

2) кількість індукційних трубок вибираємо з умови, що кожна індукційна трубка проходить через зубець статора;

3) зубцевими гармонійними поля нехтуємо, так як у більшості заглиблених двигунів пази на статорі і у всіх електродвигунів на роторі закриті;

4) МРС обмотки статора розподілена в просторі косинусоїдальне по довжині полюсної дуги;

5) індукція в перетинах ярма статора $S_1 \dots S_6$ і перетинах ротора $S_{1в} \dots S_{6в}$ однакова по висоті ярма, що підтверджується [9]. тому поперечні розміри індукційних трубок $I \dots VI$ в цих перетинах можна прийняти пропорційними магнітним потокам, що проходить через них при будь-якому насиченні магнітопроводу;

6) магнітний потік індукційної трубки визначається МРС, що діють по середньої лінії магнітопроводу трубки, магнітним опором повітряного зазору, а також опором феромагнітних ділянок, що належать до даної трубки;

7) індукція в перетинах ярма статора $S_1 \dots S_6$ і перетинах ротора $S_{1в} \dots S_{6в}$ залишаються приблизно постійними на довжині між осями суміжних зубців.

Таким чином, знаючи висоту ярма h статора і кількість індукційних трубок n для рівномірного зазору і косинусоїдального розподілу поля, можна знайти поперечні розміри трубок

$$h_{mn} = \frac{\cos \alpha_{mn} h}{\cos \alpha_{m1} + \cos \alpha_{m2} + \dots + \cos \alpha_{mn}}, \quad (1.2)$$

					141. 4301з. БР. ПЗ. Р1	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		14

де h_{mn} – висота поперечного перерізу n -ої трубки в m перетині ярма; α_{mn} – кут між віссю поля і відповідного зубця статора.

За графіком залежності $h_0=f(s)$, наданої в [9], визначаємо глибину проникнення магнітного потоку в вал заглибного електродвигуна в відносних одиницях для обраної індукції в зазорі, після чого розраховуємо фактичну висоту ярма ротора

$$h_B = 0,5h_0D_p, \quad (1.3)$$

де D_p – діаметр ротора.

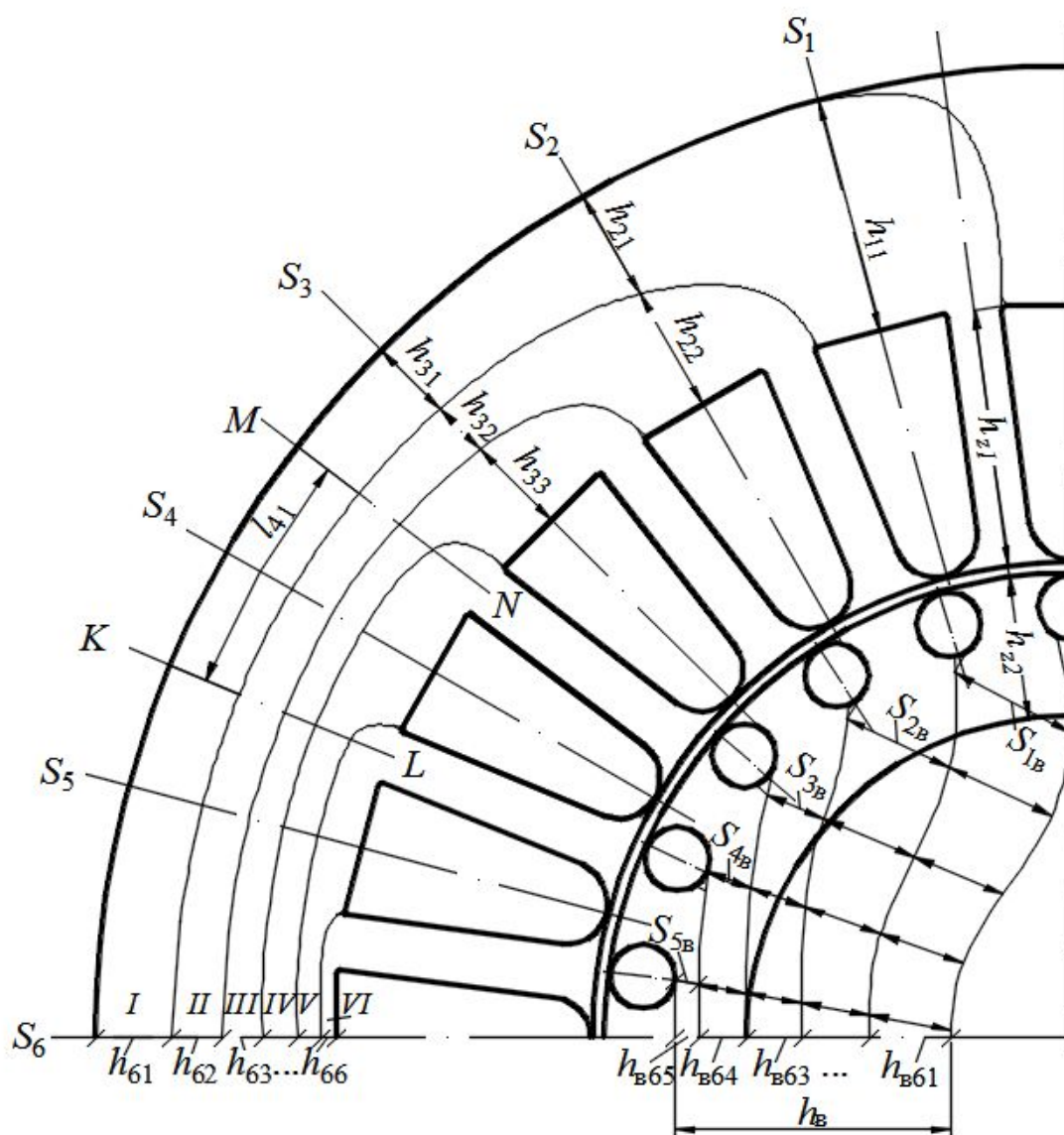


Рис.1.1. До розрахунку магнітопроводу

Будуємо індукційні трубки в роторі аналогічно побудові їх в статорі. Поперечні розміри індукційних трубок для перетинів, в яких насичення велике

розраховуємо за формулою (1.2), а для перетинів ярма, насичення в яких відносно невелика визначаємо графічно, виходячи з найкоротшого шляху силових ліній.

При побудові кривої розподілу магнітного поля при рівномірному зазорі розраховуємо криві намагнічування кожної індукційної трубки і за допомогою кривої розподілу МРС обмотки статора знаходимо розподіл магнітного потоку в зазорі електродвигуна. Крива намагнічування трубки I , де магнітний потік максимальний, буде одночасно кривої намагнічування двигуна. Тому для цієї мети досить розрахувати одну індукційну трубку I .

1.5. Розрахунок втрат. Механічні втрати в сучасних водозаповнених заглибних електродвигунах потужністю 2 ... 125 кВт складають 16 ... 36% загальних втрат. Є два види механічних втрат: на тертя ротора про воду $P_{тр}$ і в підшипниках $P_{п}$ (напрямних і завзятому). Для резино-металевих підшипників водозаповнених двигунів рекомендовано використання емпіричних залежностей $P_{пн}=f(S_n)$, $P_{пу}=f(S_y)$ [9]. Тоді

$$P_{п} = P_{п.у} + n_{п.н} P_{п.н},$$

де $n_{п.н}$ – число напрямних підшипників.

Втрати на тертя ротора про воду залежать від розмірів ротора і повітряного зазору і можуть бути визначені за допомогою залежності

$$P_{тр} = 2,25 D_p^4 \cdot \lambda_b l n^3 \cdot 10^{-11},$$

де l , n – довжина пакета і частота обертання ротора;

$\lambda_b = \lambda_0 e^{k_\lambda \cdot l} \cdot 10^{-3}$ – коефіцієнт опору руху рідини в зазорі.

Втрати в стали заглибних електродвигунів є суму втрат статора і ротора в стали ярма і зубців, поверхневих і пульсаційних в зубцях і визначаються так само, як і при розрахунку АД загального призначення.

У зв'язку з тим, що пази на статорі у більшості, а на роторі у всіх заглибних електродвигунів закриті і зазор між пакетами статора і ротора значний, поверхневими і пульсаційними втратами нехтують. Нехтують також втратами в стали ярма і зубцях ротора внаслідок низької частоти

переманічування, що дорівнює частоті ковзання.

При розрахунку втрат в обмотках їх активний опір приводиться до фактичної температури. Гранична температура відповідає ізоляції обмотки статора.

1.6. Механічний розрахунок. Основною причиною виникнення одностороннього магнітного тяжіння в дво полюсній асинхронному двигуні є спотворення магнітного потоку зазору через ексцентричне положення ротора в статорі. Якщо ексцентриситет e (рис.1.2,а) нерухомий, то при обертанні магнітного потоку Φ з частотою n_1 щодо статора максимальне спотворення потоку матиме місце при розташуванні його осі під кутом 90° до осі, що проходить через центри статора і ротора. У момент збігу цих осей спотворення потоку буде мінімальним (рис.1.2,б).

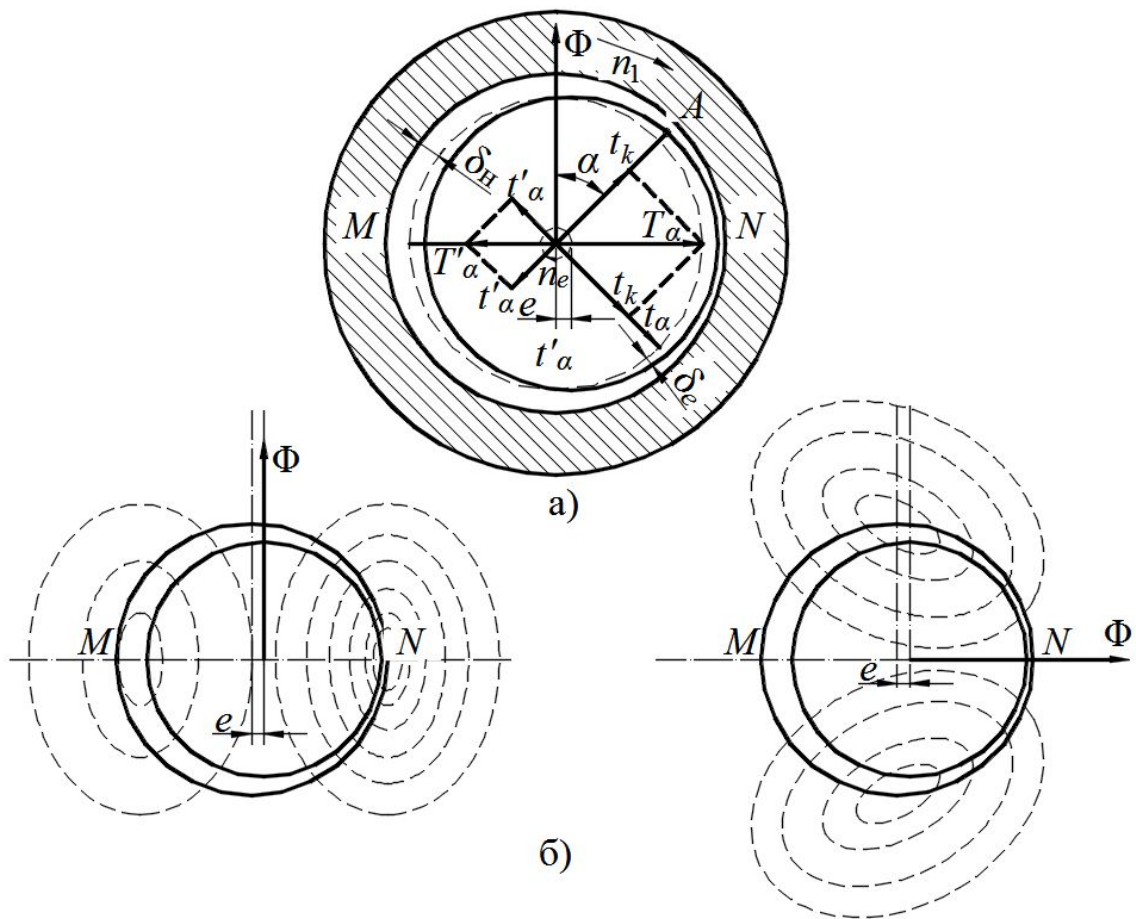


Рис.1.2. До розрахунку одностороннього магнітного тяжіння:

а) розподіл сил; б) характер спотворення поля дво полюсного АД при ексцентричному розташуванні ротора в статорі

Якщо ексцентриситет обертається в просторі з частотою n_e , то вона може бути дорівнює частоті обертання поля n_1 або менше її. У першому випадку магнітні потік нерухомий щодо нерівномірного зазору, у другому - обертається з частотою, що дорівнює різниці частот обертання потоку і нерівномірного зазору. Отже, в загальному випадку має місце сила одностороннього магнітного тяжіння, пульсуюча за амплітудою з частотою, що залежить від відносної частоти обертання потоку і ексцентриситету і обертається в просторі з частотою обертання ексцентриситету n_e . Якщо ця частота дорівнює частоті обертання потоку n_1 , то сила одностороннього магнітного тяжіння постійна. Найбільшого значення сила одностороннього магнітного тяжіння досягає в момент, коли вісь потоку перпендикулярна осі ексцентриситету.

При визначенні значення сили одностороннього магнітного тяжіння необхідно виходити з обліку розподілу магнітного потоку в зазорі і магнітопроводі електродвигуна. Значення одиничних сил одностороннього магнітного тяжіння, тобто сил, що припадають на кожен ділянку полюсного поділу (рис.1.2, а) для одиничної довжини (1 см) пакета статора (ротора) буде дорівнює

$$t_k = t_\alpha - t'_\alpha, \text{ або} \\ t_k = 40 \left(\frac{B_{\delta-e}^2 - B_{\delta+e}^2}{B_\delta^2} \right)_k \cdot B_\delta^2 \cdot \frac{\tau}{2k}, \quad (1.4)$$

де $B_{\delta-e}$ і $B_{\delta+e}$ – індукції для k -ої ділянки на частинах полюсної дуги відповідно зі зменшенням і збільшенням зазору; B_δ – індукція при рівномірному зазорі; τ – полюсний розподіл; $2k$ – число ділянок, на які розбивається полюсний розподіл береться парним для зручності обчислень. Знаючи поодинокі сили, знаходимо їх результуючу з урахуванням (1.4)

$$T_\alpha = \sum_{k=1}^k 2t_k \cdot \sin \alpha_k = \frac{40}{k} \left[\sum_{k=1}^k \left(\frac{B_{\delta-e}^2 - B_{\delta+e}^2}{B_\delta^2} \right)_k \sin \alpha_k \right] \cdot B_\delta^2 \tau. \quad (1.5)$$

Для практичних розрахунків в [9] запропонована наступна формула

визначення сили одноосного магнітного тяжіння

$$T = \frac{80\varepsilon}{2,8k_{\mu} - \varepsilon} \cdot B_{\delta}^2 \tau, \quad (1.6)$$

де k_{μ} – коефіцієнт насичення магнітного кола при рівномірному зазорі;
 $\varepsilon = e/\delta$ – відносний ексцентриситет.

Силу розраховують для ряду значень k_{μ} і B_{δ} , які приймаються по кривій намагнічування електродвигуна. Потім будуються залежності $T=f(k_{\mu})$ та $T=f(B_{\delta})$, з яких вибирається $T_{\max}$ для подальших розрахунків.

В процесі проектування заглибного АД необхідно провести механічні розрахунки. При цьому визначаються діаметр вала, прогин, критична швидкість ротора, кількість і розміри напрямних підшипників [6]. Особливості конструкції цього типу електродвигунів вимагають особливої уваги до розрахунку прогину і критичної частоти обертання. Вал розглядається як балка на двох шарнірних опорах, на яку діють розподілені по довжині пакета ротора сила одноосного магнітного тяжіння; радіальна складова гідродинамічної сили; сила, обумовлена динамічної невідновженістю ротора, а так само поперечна сила, прикладена до кінця вала (реакція передачі). Останніми двома факторами можна знехтувати в зв'язку з ретельної динамічним балансуванням і з'єднанням з насосом за допомогою муфти. Орієнтовно радіальну складову гідродинамічної сили можна визначити за формулою

$$R = \frac{\varepsilon \gamma_{\text{в}} D_{\text{р}}^3 \ln^2}{900 \cdot 10^5}, \quad (1.7)$$

де $\gamma_{\text{в}}$ – щільність рідини в порожнині двигуна.

Згідно [9] прогин від розподіленої сили (від одновісного магнітного тяжіння і радіальної складової гідродинамічної сили і маси пакета ротора) буде дорівнює

$$f_{\text{р}} = \frac{5q_1 l^4}{384 A_{\text{в}}} \left[\frac{64 a_{\text{п}}^3}{5l} + \sigma \frac{A_{\text{в}}}{A_{\text{в}} + A_{\text{п}}} \cdot \left(1 + \frac{8a_{\text{п}}}{l} + \frac{96a_{\text{п}}^2}{5l^2} \right) \right], \quad (1.8)$$

де $q_1 = T_{\max} + \frac{R}{l} + 9,81 \frac{m_p}{l}$ – навантаження на одиницю довжини пакета ротора;

$\frac{A_B}{A_B + A_{\Pi}} = 0,35$ – рекомендується на підставі досвідчених даних [9];

$A_B = E \cdot J_B^7$ – жорсткість вала;

$E = 2,1 \cdot 10^7$ – модуль пружності стали [9];

$J_B = \pi \frac{d_B^4}{64}$ – екваторіальний момент інерції перерізу вала під пакетом;

$\sigma = 1,1$ – коефіцієнт, що враховує зниження жорсткості пакета при його нагріванні;

a_{Π} – відстань від краю пакета ротора до направляючого підшипника.

Прогин ротора під дією сили f_p , викликаний початковим зміщенням ротора, призведе до збільшення цієї сили, що в свою чергу викличе нове збільшення прогину. Так буде тривати до тих пір, поки сила f_p не врівноважує пружністю ротора. Прогин, що відповідає цьому рівноваги дорівнює

$$f_m = \frac{f_{\Pi}}{1 - m_e}, \quad (1.9)$$

де $m_e = f_{\Pi}/e$ – початковий ексцентриситет ротора;

$$f_{\Pi} = f_p \cdot \frac{T_{\max} + \frac{R}{l}}{q_1} \text{ – початковий прогин ротора}$$

Ще необхідно врахувати прогин ротора від власної маси

$$f_G = f_p \cdot \left(9,81 \frac{m_p}{l \cdot q_1} \right). \quad (1.10)$$

Результуючий прогин ротора дорівнює

$$\Sigma f = f_G + f_m. \quad (1.11)$$

Практика показує, що для забезпечення енергетичних показників і надійності найбільший результуючий ексцентриситет не повинен перевищувати 50% зазору між пакетом статора і ротора [9]:

$$\Sigma f + e < \frac{\delta}{2}. \quad (1.12)$$

Для випадку стійкого обертання ротора може бути записано наступне рівність сил

$$C_{TR} \left(e + \frac{2}{\pi} f_m \right) + m_p \omega^2 \left(e + \frac{2}{\pi} f_m \right) - C_G f_m = 0, \quad (1.13)$$

де $C_{TR} = \frac{T_{\max} l + R}{e}$ – результуюча сила одноосного магнітного тяжіння і радіальної складової гідродинамічної сили;

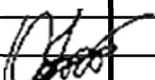
$$C_G = \frac{9,81 m_p}{f_G} \text{ – сила, створена масою ротора.}$$

Вирішуючи (1.13) щодо прогину f_m для умови прагнення цього прогину до нескінченності знаходимо значення критичної частоти

$$n_{кр} = 300 \sqrt{\frac{1,57 C_G - C_{TR}}{9,81 m_p}}, \quad (1.14)$$

яка повинна відрізнятися від номінальної не менше ніж на 30%.

1.7. Тепловий розрахунок. Методи розрахунку і аналізу теплових процесів розроблені для асинхронних двигунів загального призначення, можуть дати лише приблизні результати при застосуванні їх до заглибних двигунів. В [9] представлена методика теплових розрахунків заглибних двигунів без спеціально організованої внутрішньої циркуляції охолоджуючої рідини, заснована на узагальненні даних технічного аналізу та результатів експериментальних досліджень і отриманої в результаті уточненої еквівалентної теплової схемою. Дана методика реалізована для теплового розрахунку в даній дипломній роботі в розділі 2.

					141. 4301з. БР. ПЗ. Р2			
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Розрахунок асинхронного заглибного двигуна	Лім.	Лист	Листів
Розроб.	Подиряко І.Г.							
Керівник	Александровський.						22	42
Консульт.						ННІАЕ НУК		
Н. контр.								
В.о зав. каф.	Обрубов Д.В.							

2. РОЗРАХУНОК АСИНХРОННОГО ЗАГЛИБНОГО ДВИГУНА

2.1. Вихідні дані

Трифазний двигун ($m=3$) призначений для приводу відцентрового насоса, що працює в свердловині діаметром 300 мм на глибині 150 м. Вода, що відкачується відповідає вимогам стандарту на питну воду. Двигун з'єднується з насосом за допомогою муфти. і монтується вище фільтра, що гарантує обмивання корпусу відкачуваної водою.

Номінальна потужність P_2 , кВт	125;
Номінальна напруга U , В	660;
Синхронна частота обертання n_{DH} об/хв,	3000;
Номінальна частота f_1 , Гц	50;
Зовнішній діаметр корпусу D_k , мм	273 мм;
Режим роботи тривалий.	

2.2. Визначення головних розмірів

Розрахунок виконується на основі методик [2,6,7,9] з урахуванням особливостей і рекомендацій, викладених в розділі 1.

2.2.1. Число пар полюсів

$$p = \frac{60 \cdot f}{n_{DH}} = \frac{60 \cdot 50}{3000} = 1.$$

2.2.2. Зовнішній діаметр статора

$$D_c = D_k - 2 h_k = 273 - 2 \cdot 8 = 257 \text{ мм} = 25,7 \text{ см},$$

де $h_k = 8$ мм – товщина корпусу статора по [9].

2.2.3. Відношення зовнішнього діаметра статора D_c до внутрішнього D

$$k_D = \frac{D_c}{D} = a + \frac{b+c}{2} + \sqrt{\left(\frac{b+c}{2}\right)^2 + ac - b + 1} =$$

$$= 0,508 + \frac{0,864 + 0,427}{2} + \sqrt{\left(\frac{0,864 + 0,427}{2}\right)^2 + 0,508 \cdot 0,427 - 0,864 + 1} = 2,03,$$

$$\text{де } a = \frac{\alpha \pi B_{\delta}}{2 p k_c B_c} = \frac{0,68 \cdot \pi \cdot 0,71}{2 \cdot 0,95 \cdot 1,57} = 0,508;$$

$$b = \frac{2 B_{\delta}}{k_c B_{z1}} = \frac{2 \cdot 0,71}{0,95 \cdot 1,73} = 0,864;$$

$$c = \frac{k_i A}{25 k_{\text{зп}} J_1 D_c} = \frac{2,77 \cdot 430}{25 \cdot 0,62 \cdot 7 \cdot 25,7} = 0,427;$$

$B_{\delta}=0,71$ Тл, $B_c=0,71$ Тл, $B_{z1}=1,73$ Тл – індукція в повітряному зазорі (рис.2.1.б [9]), ярмі і зубцях статора, відповідно по [9];

$\alpha = 0,68$ – коефіцієнт полюсного перекриття;

$k_c = 0,95$ – коефіцієнт заповнення пакету сталлю;

$k_{\text{зп}} = 0,62$ – коефіцієнт заповнення паза ізолюваним проводом;

$A=430$ А/см – лінійне навантаження(рис.2.1.б [9]);

$J_1 = 7$ А/мм² – щільність струму в обмотці статора.

2.2.4. Внутрішній діаметр статора

$$D = \frac{D_c}{k_D} = \frac{27,3}{2,03} = 12,65 \text{ см.}$$

З метою уніфікації з двигунами, що серійно випускаються, приймаємо
 $D = 12,6$ см.

2.2.5. Розрахункова потужність

$$P' = \frac{P_2 \cdot k_E}{\eta \cdot \cos \varphi} = \frac{125 \cdot 0,96}{0,91 \cdot 0,87} = 153,2 \text{ кВт,}$$

де $k_E = 0,96$ – відношення ЕРС обмотки статора до номінальної напруги [9];

$\eta = 0,9$ – ККД по рис.2.1.а [9]; $\cos \varphi = 0,87$ – коефіцієнт потужності по рис.2.1.а[9].

2.2.6. Розрахункова довжина повітряного зазору

$$l_1 = \frac{6,1 P' \cdot 10^7}{\alpha \cdot k_B \cdot D^2 \cdot A \cdot B_{\delta} \cdot k_{01} \cdot n} =$$

$$= \frac{6,1 \cdot 153 \cdot 10^7}{0,96 \cdot 1,09 \cdot 12,6^2 \cdot 430 \cdot 0,71 \cdot 0,96 \cdot 3000} = 90,32 \text{ см,}$$

де $k_B = 1,09$ – коефіцієнт форми кривій поля [9];

$k_{01} = 0,96$ – обмотувальний коефіцієнт для $p = 1$.

Приймаємо $l_1 = 90$ см.

2.2.7. Полісний розподіл

$$\tau_1 = \frac{\pi D}{2p} = \frac{\pi \cdot 12,6}{2} = 19,79 \text{ см.}$$

2.2.8. Зазор між статором і ротором приймаємо за рекомендаціями [9] рівним $\delta = 0,15$ см.

2.3. Обмотка, пази і ярмо статора

2.3.1. Число пазів на полюс фазу для даного типу двигунів [9] $q = 4$.

2.3.2. Число пазів

$$z_1 = 2qpm = 2 \cdot 4 \cdot 3 = 24.$$

2.3.3. Зубцевий розподіл статора

$$t_1 = \frac{\pi D}{z_1} = \frac{\pi \cdot 12,6}{24} = 1,6 \text{ см.}$$

2.3.4. Номінальний струм двигуна

$$I_1 = \frac{P_2}{m \cdot U \cdot \eta \cdot \cos(\varphi)} = \frac{125 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 660 \cdot 0,9 \cdot 0,87} = 139,6 \text{ А.}$$

2.3.5. Перетин і діаметр проводу

$$S_{\Sigma 0} = \frac{I_1}{J_1} = \frac{139,6}{7} = 19,94 \text{ мм}^2.$$

На підставі досвіду проектування і виробництва заглибних двигунів вибираємо протяжну, трифазну, з'єднану в зірку, одношарову, концентричну обмотку "перевальцем"[9] (рис.2.1.). Крім того, вибираємо провід ПВДП-2 з подвійною поліетиленовою ізоляцією по табл. П2 [1] перетином $S_m = 10,02 \text{ мм}^2$ і діаметрами $d/d_{iz} = 4,05/5,95 \text{ мм}$. Пазова ізоляція виконана одношарової з поліетилентерафталата товщиною $\Delta_{iz} = 0,05 \text{ мм}$.

Тоді площа перетину ізолюваного проводу та коефіцієнт використання

$$S_{i3} = \frac{\pi d_{i3}^2}{4} = \frac{\pi \cdot 5,95}{4} = 27,8 \text{ мм}^2, k_{и} = \frac{S_{i3}}{S_M} = \frac{27,8}{10,02} = 2,77.$$

2.3.6. Число елементарних провідників в одному ефективному

$$n_e = \frac{S_{\Sigma 0}}{S_M} = \frac{19,94}{10,02} = 2.$$

2.3.7. Магнітний потік в повітряному зазорі

$$\Phi = \alpha \cdot \tau_1 \cdot B_{\delta} \cdot l_1 \cdot 10^{-4} = 0,68 \cdot 19,79 \cdot 0,71 \cdot 90 \cdot 10^{-4} = 0,086 \text{ Вб}.$$

2.3.8. Число витків на фазу

$$w_1 = \frac{k_E \cdot U}{\sqrt{3} \cdot \pi \cdot \sqrt{2} \cdot \Phi \cdot k_{01} \cdot f_1} = \frac{0,96 \cdot 660}{\sqrt{3} \cdot \pi \cdot \sqrt{2} \cdot 0,086 \cdot 0,96 \cdot 50} = 19,95.$$

Приймаємо $w_1 = 20$.

2.3.9. Число ефективних провідників в пазу

$$u_{п} = \frac{w_1}{p \cdot q} = \frac{20}{4} = 5.$$

2.3.10. Уточняємо значення електромагнітного навантаження

$$A = \frac{2I_1 \cdot w_1 \cdot m}{\pi D} = \frac{2 \cdot 139,9 \cdot 20 \cdot 3}{\pi \cdot 12,6} = 423,2 \cdot 10^3 \text{ А/см}.$$

Значення A знаходиться в допустимих межах (див. п. 2.2.3.).

2.3.11. Паз вибираємо закритий [9], площу і розміри паза статора розрахуємо за методикою [6].

Розрахункова площа паза статора

$$S_{пр} = \frac{S_{i3} \cdot n_e \cdot u_{п}}{k_{зп}} = \frac{27,8 \cdot 2 \cdot 5}{0,62} = 448,4 \text{ мм}^2.$$

Висота спинки статора

$$h_c = \frac{\Phi}{2B_c \cdot l \cdot k_c \cdot 10^{-4}} = \frac{0,086}{2 \cdot 1,57 \cdot 90 \cdot 0,95 \cdot 10^{-4}} = 3,2 \text{ см}.$$

Ширина зубця

$$b_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_1}{B_{z1} \cdot k_c} = \frac{0,71 \cdot 1,65}{1,73 \cdot 0,95} = 0,71 \text{ см}.$$

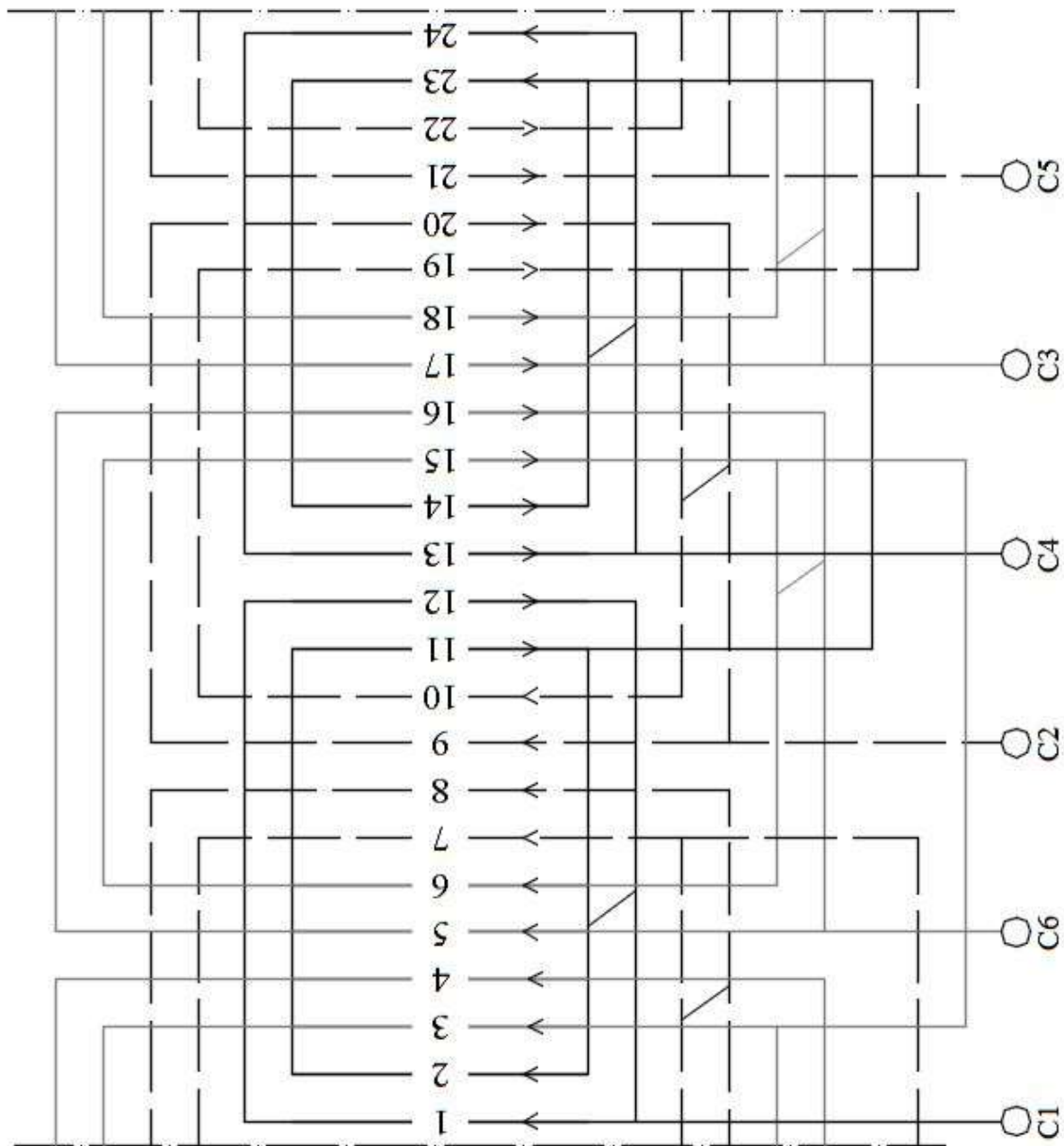


Рис.2.1.Обмотка статора ($p=1$; $z_1=24$; $q=4$; $a_1=1$)

2.3.12. Розміри паза у штампі приймаємо (рис. 2.2.) $h_{ш} = 0,3$ мм,

$$h_{п} = \frac{D_c - D}{2} - h_c = \frac{25,7 - 12,6}{2} - 3,2 = 3,35 \text{ см};$$

$$b_1 = \frac{\pi(D + 2h_{п})}{z_1} - b_{z1} = \frac{\pi(12,6 + 2 \cdot 3,35)}{24} - 0,71 = 1,82 \text{ см};$$

$$b_2 = \frac{\pi(D + 2h_{ш}) - z_1 \cdot b_{z1}}{z_1 - \pi} = \frac{\pi(12,6 + 2 \cdot 0,03) - 24 \cdot 0,71}{24 - \pi} = 1,09 \text{ см}.$$

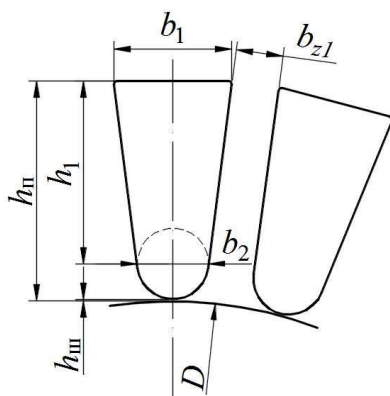
2.3.13. Фактична площа паза

$$h_{п1} = h_{п} - h_{ш} = 33,5 - 0,3 = 33,2 \text{ мм};$$

$$h_1 = h_{п1} - 0,5b_2 = 33,2 - 0,5 \cdot 10,9 = 27,75 \text{ мм};$$

$$S_{п} = \frac{h_1(b_1 + b_2)}{2} + \pi \frac{b_2^2}{8} = \frac{27,75(18,2 + 10,9)}{2} + \pi \frac{10,9^2}{8} = 450,4 \text{ мм}^2.$$

2.3.14. Коефіцієнт заповнення паза



$$k_{зп} = \frac{S_{із} \cdot u_{п} \cdot n_e}{S_{п}} = \frac{27,8 \cdot 5 \cdot 2}{450,4} = 0,617.$$

2.4. Пази, ярмо і обмотка ротора

2.4.1. Число пазів ротора приймаємо $z_2=22$.

2.4.2. Зовнішній діаметр ротора

$$D_p = D - 2\delta = 12,6 - 2 \cdot 0,15 = 12,3 \text{ см.}$$

Рис.2.2. Паз статора

2.4.3. Зубцевий розподіл ротора

$$t_2 = \frac{\pi D_p}{z_2} = \frac{\pi \cdot 12,3}{22} = 1,76 \text{ см.}$$

2.4.4. Коефіцієнт приведення струмів

$$v_i = \frac{2m w_1 k_{01}}{z_2} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 20 \cdot 0,96}{22} = 5,24.$$

2.4.5. Струм у стрижні ротора

$$I_c = I_2 = I_1 \cdot k_i \cdot v_i = 139,6 \cdot 0,906 \cdot 5,24 = 662,3 \text{ А},$$

де $k_i = 0,21 + 0,8 \cdot \cos(\varphi) = 0,21 + 0,8 \cdot 0,87 = 0,906$ – коефіцієнт, що враховує вплив струму намагнічування і опору обмоток на відносини струмів I_1/I_2 .

2.4.6. Площа поперечного перерізу стрижня при щільності струму

$$S_{ср} = \frac{I_2}{J_2} = \frac{662,3}{5,5} = 120,41 \text{ мм}^2,$$

де $J_2=5,5 \text{ А/мм}^2$ – щільності струму в стрижні ротора.

2.4.7. Паз ротора вибираємо грушоподібний закритий.

Довжина $l_2 = l = 90$ см, $h_{\text{шп}} = h_{\text{ш}} = 0,3$ мм.

2.4.8. Припустима ширина зубця ротора при індукції $B_{z2} = 1,65$ Тл [9]

$$b_{z2} = \frac{B_{\delta} \cdot t_2}{B_{z2} \cdot k_c} = \frac{0,71 \cdot 1,76}{1,7 \cdot 0,95} = 0,77 \text{ см.}$$

2.4.9. Розміри паза ротора (рис. 2.3, а):

$$b_{1p} = \frac{\pi(D_p - 2h_{\text{шп}}) - z_2 \cdot b_{z2}}{z_2} = \frac{\pi(12,3 - 2 \cdot 0,03) - 28 \cdot 0,77}{22} = 0,85 \text{ см;}$$

$$b_{2p} = \sqrt{\frac{b_{1p}^2 \left(\frac{z_2}{\pi} + \frac{\pi}{2} \right) - 4S_{\text{сп}}}{\frac{z_2}{\pi} - \frac{\pi}{2}}} = \sqrt{\frac{0,85^2 \left(\frac{22}{\pi} + \frac{\pi}{2} \right) - 4 \cdot 120,42}{\frac{22}{\pi} - \frac{\pi}{2}}} = 0,5 \text{ см;}$$

$$h_{1p} = (b_{1p} - b_{2p}) \frac{z_2}{2\pi} = (0,85 - 0,5) \frac{22}{2\pi} = 1,22 \text{ см.}$$

2.4.10. Повна висота паза ротора

$$h_{п2} = h_{1p} + \frac{b_{1p} + b_{2p}}{2} = 1,22 + \frac{0,85 + 0,5}{2} = 1,89 \text{ см.}$$

2.4.11. Перерахуємо площу поперечного перерізу стрижня і щільність струму у обмотці ротора

$$S_c = \frac{\pi}{8} (b_{1p}^2 + b_{2p}^2) + \frac{h_{1p}}{2} (b_{1p} + b_{2p}) = \frac{\pi}{8} (8,5^2 + 5^2) + \frac{12,2}{2} (8,5 + 5) = 120,54 \text{ мм}^2;$$

$$J_2 = \frac{I_2}{S_c} = \frac{662,3}{120,54} = 5,49 \text{ А/мм}^2.$$

2.4.12. Ширина зубця ротора: на рівні головки зубця

$$b_{z2\Gamma} = \left(\frac{D_{z2\Gamma} \cdot \pi}{z_2} \right) - b_{1p} = \left(\frac{11,39 \cdot \pi}{22} \right) - 0,85 = 0,776 \text{ см;}$$

на рівні впадини паза

$$b_{z2\Pi} = \left(\frac{D_{z2\Pi} \cdot \pi}{z_2} \right) - b_{2p} = \left(\frac{8,95 \cdot \pi}{22} \right) - 0,5 = 0,778 \text{ см,}$$

$$\text{де } D_{z2\Gamma} = D_p - 2 \left(h_{\text{шп}} + \frac{b_{1p}}{2} \right) = 12,3 - 2 \left(0,03 + \frac{0,85}{2} \right) = 11,39 \text{ см,}$$

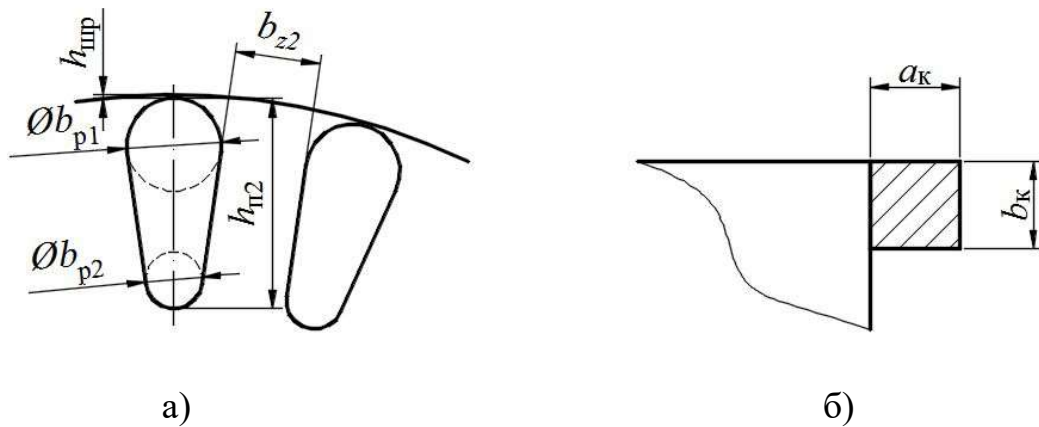


Рис.2.3. Розміри паза ротора -а, короткозамкненого кільця - б

$$D_{z2п} = D_p - 2 \left(h_{1p} + h_{шп} + \frac{b_{1p}}{2} \right) = 12,3 - 2 \left(1,22 + 0,03 + \frac{0,85}{2} \right) = 8,95 \text{ см} -$$

відповідні діаметри. Для подальших розрахунків приймаємо $b_{z2}=0,78$ см.

2.4.13. Індукція в зубці ротора

$$B_{z2} = \frac{B_{\delta} \cdot t_2}{b_{z2} \cdot k_c} = \frac{0,71 \cdot 1,76}{0,78 \cdot 0,95} = 1,69 \text{ Тл.}$$

2.4.14. Діаметр вала визначаємо за результатами механічного розрахунку.

Попередньо за аналогією з електродвигунами, що серійно випускаються приймаємо $d_b=7,5$ см.

2.4.15. Фактична висота ярма ротора

$$h_b = 0,5 h_0 D = 0,5 \cdot 0,51 \cdot 12,3 = 3,14 \text{ см,}$$

де $h_0=0,51$ в.о. – глибина проникнення магнітного потоку в вал електродвигуна за графіком рис.2.6 [9].

2.4.16. Індукція в ярмі ротора

$$B_p = \frac{\Phi}{2 h_b \cdot l \cdot k_{c1} \cdot 10^{-4}} = \frac{0,086}{3,14 \cdot 90 \cdot 10^{-4}} = 1,52 \text{ Тл,}$$

де $k_{c1}=1$ – коефіцієнт заповнення сталлю вала двигуна.

2.4.17. Струм в короткозамкненим кільці

$$I_k = \frac{I_2}{2 \sin \left(\frac{p\pi}{z_2} \right)} = \frac{662,3}{2 \sin \left(\frac{\pi}{22} \right)} = 2326,8 \text{ А.}$$

2.4.16. Перетин короткозамкнутого кільця

$$S_k = \frac{I_k}{J_k} = \frac{2326,8}{5,2} = 447,5 \text{ мм}^2,$$

де $J_k=5,2 \text{ А/мм}^2$ – щільність струму дещо менше, ніж в стрижні.

2.4.17. Розміри короткозамкнутого кільця (рис.2.3,б)

$a_k=22,5 \text{ мм}$, $b_k=20 \text{ мм}$.

2.4.18. Фактичне значення перетину короткозамкнутого кільця

$$S_k = a_k b_k = 22,5 \cdot 20 = 450 \text{ мм}^2.$$

2.5. Розрахунок намагнічуючого струму при холостому ході

2.5.1. Складаємо на основі розрахункових даних ескіз магнітної системи електродвигуна (рис. 2.4.), на якому зображена згідно [9] тільки трубка І.

2.5.2. Знаходимо поперечні розміри індукційної трубки І для перетинів $S_1...S_6$ в ярмі статора і для перетинів $S_{1в}...S_{6в}$ в ярмі ротора. При цьому поперечні розміри $h_{в41}... h_{в61}$ отримані з розрахунку, а $h_{в21}$ і $h_{в31}$ визначені графічно, виходячи з передбачуваного найкоротшого шляху для силових ліній. Розрахунок проведемо за допомогою програми *Mathcad 15*. Результати розрахунку приведені в таблицях 2.1. і 2.2.

2.5.3. Ярмо і зубці статора:

$n=0,1..5$

$$h_{1n} = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{z_1}\right) h_c}{\sum_{i=0}^n \cos\left(\frac{\pi}{z_1} + \frac{2\pi i}{z_1}\right)}.$$

Таблиця 2.1. Поперечні розміри індукційної трубки І статора

h_{11}	h_{12}	h_{13}	h_{14}	h_{15}	h_{16}	h_{z1}	l_{11}	l_{12}	l_{13}	l_{14}	l_{15}	l_{16}
3,2	1,66	1,17	0,96	0,86	0,83	2,95	3,7	3,1	3,1	3,1	3,1	1,55

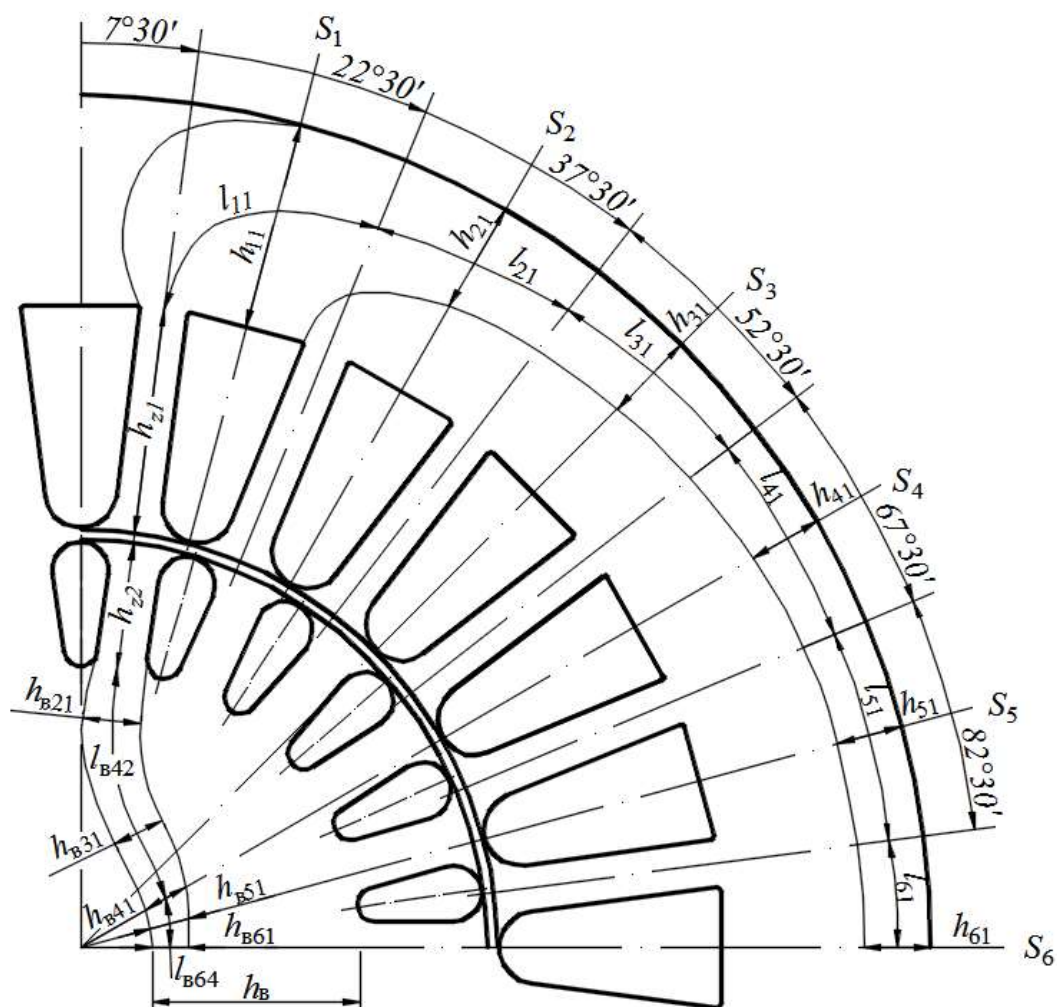


Рис.2.4. Ескіз магнітної системи електродвигуна

2.5.4. Ярмо і зубці ротора:

У зв'язку з тим що, як видно з рис.1.1 магнітний потік трубки VI замикається навколо паза статора, розташованого на осі перетину S_6 , в ярмі ротора матимемо п'ять індукційних трубок (на відміну від шести в ярмі статора). З огляду на це, знаходимо поперечні розміри індукційної трубки l в ярмі ротора, при цьому $h_{B31}, h_{B21}, l_{B46}, l_{B24}, h_{z2}$, знаходимо з графічних побудов

$$n=4,3..2$$

$$h_{2n} = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{z_1}\right) h_B}{\sum_{i=0}^n \cos\left(\frac{\pi}{z_1} + \frac{2\pi i}{z_1}\right)}.$$

Таблиця 2.2. Поперечні розміри індукційної трубки I ротора

$h_{в61}$	$h_{в51}$	$h_{в41}$	$h_{в31}$	$h_{в21}$	$h_{з2}$	$l_{в64}$	$l_{в42}$
0,841	0,938	1,149	1,2	1,25	1,46	0,8	3,7

2.5.5 Визначаємо значення індукції для окремих ділянок магнітопроводу трубки I.

Потоки для трубки I в статорі і роторі:

$$\Phi_{сI} = t_1 B_{\delta} l = 1,65 \cdot 90 \cdot B_{\delta} = 148,5 B_{\delta};$$

$$\Phi_{pI} = t_2 B_{\delta} l = 1,76 \cdot 90 \cdot B_{\delta} = 158,4 B_{\delta}.$$

Індукція в зубцях і ярмі статора

$$B_{z1} = \frac{\Phi_{сI}}{b_{z1} k_c l} = \frac{148,5 B_{\delta}}{0,71 \cdot 0,95 \cdot 90} = 2,457 B_{\delta}.$$

Аналогічно

$$B_{11} = \frac{148,5 B_{\delta}}{h_{11} k_c l} = \frac{148,5 B_{\delta}}{3,2 \cdot 0,95 \cdot 90} = 0,543 B_{\delta};$$

$$B_{21} = \frac{148,5 B_{\delta}}{h_{12} k_c l} = \frac{148,5 B_{\delta}}{1,66 \cdot 0,95 \cdot 90} = 1,049 B_{\delta};$$

$$B_{31} = \frac{148,5 B_{\delta}}{h_{13} k_c l} = \frac{148,5 B_{\delta}}{1,17 \cdot 0,95 \cdot 90} = 1,483 B_{\delta};$$

$$B_{41} = \frac{148,5 B_{\delta}}{h_{14} k_c l} = \frac{148,5 B_{\delta}}{0,96 \cdot 0,95 \cdot 90} = 1,816 B_{\delta};$$

$$B_{51} = \frac{148,5 B_{\delta}}{h_{15} k_c l} = \frac{148,5 B_{\delta}}{0,86 \cdot 0,95 \cdot 90} = 2,026 B_{\delta};$$

$$B_{61} = \frac{148,5 B_{\delta}}{h_{16} k_c l} = \frac{148,5 B_{\delta}}{0,83 \cdot 0,95 \cdot 90} = 2,097 B_{\delta}.$$

Індукція в ярмі і зубцях ротора

$$B_{в61} = \frac{\Phi_{pI}}{h_{в61} k_c l} = \frac{158,4 B_{\delta}}{0,841 \cdot 0,95 \cdot 90} = 2,202 B_{\delta};$$

$$B_{в51} = \frac{158,4 B_{\delta}}{h_{в51} k_c l} = \frac{158,4 B_{\delta}}{0,938 \cdot 0,95 \cdot 90} = 1,974 B_{\delta};$$

$$B_{B41} = \frac{158,5B_{\delta}}{h_{B41}k_c l} = \frac{158,4B_{\delta}}{1,149 \cdot 0,95 \cdot 90} = 1,612B_{\delta};$$

$$B_{B31} = \frac{158,5B_{\delta}}{h_{B31}k_c l} = \frac{158,4B_{\delta}}{1,2 \cdot 0,95 \cdot 90} = 1,544B_{\delta};$$

$$B_{B21} = \frac{158,5B_{\delta}}{h_{B21}k_c l} = \frac{158,4B_{\delta}}{1,25 \cdot 0,95 \cdot 90} = 1,482B_{\delta};$$

$$B_{z2} = \frac{\Phi_{pl}}{b_{z2}k_c l} = \frac{158,4B_{\delta}}{0,78 \cdot 0,95 \cdot 90} = 2,375B_{\delta}.$$

2.5.6. За відповідним кривим намагнічування для статора і ротора П.3 [9] знайдемо значення напруженості магнітного поля H_i . При цьому напруженості ділянок згідно [9] знаходяться за формулами

$$H_{B64} = \frac{1}{6}(H_{B61} + 4H_{B51} + H_{B41});$$

$$H_{B42} = \frac{1}{6}(H_{B41} + 4H_{B31} + H_{B21}).$$

2.5.7. Далі визначимо магнітну напругу на всіх ділянках трубки l (табл.2.3.)

$$F_i = H_i \cdot l_i.$$

2.5.8. Магнітна напруга повітряного зазору

$$F_{\delta} = 0,8 \cdot 10^4 \cdot B_{\delta} \cdot k_{\delta} \cdot \delta = 0,8 \cdot 10^4 \cdot B_{\delta} \cdot 1 \cdot 0,15 = 1200 B_{\delta} \text{ А},$$

де $k_{\delta}=1$ – коефіцієнт повітряного зазору, так як пази статора і ротора закриті.

Таблиця 2.3. Розрахунок кривої намагнічування

№ п/п	Параметр	Одиниця виміру	B_{δ} , Тл				
			0,2	0,4	0,6	0,71	0,8
1.	B_{z1}	Тл	0,491	0,983	1,474	1,744	1,965
2.	B_{11}	Тл	0,109	0,217	0,326	0,385	0,434
3.	B_{21}	Тл	0,21	0,419	0,629	0,744	0,839
4.	B_{31}	Тл	0,297	0,593	0,89	1,053	1,186
5.	B_{41}	Тл	0,363	0,726	1,09	1,289	1,453
6.	B_{51}	Тл	0,405	0,81	1,215	1,438	1,62

Продовження таблиці 2.3.

7.	B_{61}	ТЛ	0,419	0,839	1,258	1,489	1,678
8.	B_{B61}	ТЛ	0,44	0,881	1,321	1,563	1,762
9.	B_{B51}	ТЛ	0,395	0,79	1,185	1,402	1,579
10.	B_{B41}	ТЛ	0,322	0,645	0,967	1,144	1,29
11.	B_{B31}	ТЛ	0,309	0,618	0,926	1,096	1,235
12.	B_{B21}	ТЛ	0,296	0,593	0,889	1,052	1,186
13.	B_{z2}	ТЛ	0,475	0,95	1,425	1,686	1,9
14.	H_{z1}	А/см	0,629	1,077	5,087	47,47	175,5
15.	H_{11}	А/см	0,178	0,343	0,484	0,547	0,588
16.	H_{21}	А/см	0,332	0,577	0,721	0,822	0,923
17.	H_{31}	А/см	0,449	0,695	0,979	1,181	1,373
18.	H_{41}	А/см	0,525	0,805	1,237	1,906	4,196
19.	H_{51}	А/см	0,565	0,891	1,462	3,738	20,52
20.	H_{61}	А/см	0,577	0,923	1,675	5,917	29,33
21.	H_{B61}	А/см	5,191	10,41	26,44	46,06	82,34
22.	H_{B51}	А/см	4,749	9,196	18,33	30,1	48,37
23.	H_{B41}	А/см	4,024	7,532	11,66	16,4	24,98
24.	H_{B31}	А/см	3,888	7,167	11,02	15,09	21,67
25.	H_{B21}	А/см	3,764	6,837	10,52	13,67	18,4
26.	H_{B64}	А/см	4,702	9,121	18,57	30,47	50,13
27.	H_{B42}	А/см	3,89	7,173	11,05	15,07	21,68
28.	H_{z2}	А/см	0,618	1,041	3,422	31,0	130,09
29.	$F_{z1} = h_{z1} H_{z1} = 2,95 H_{z1}$	А	1,856	3,178	15	140	517,7
30.	$F_{11} = l_{11} H_{11} = 3,7 H_{11}$	А	0,657	1,269	1,79	2,022	2,177
31.	$F_{21} = l_{21} H_{21} = 3,1 H_{21}$	А	1,03	1,787	2,236	2,549	2,862
32.	$F_{31} = l_{31} H_{31} = 3,1 H_{31}$	А	1,393	2,155	3,036	3,662	4,257
33.	$F_{41} = l_{41} H_{41} = 3,1 H_{41}$	А	1,627	2,494	3,834	5,908	13,0

Продовження таблиці 2.3.

34.	$F_{51} = l_{51} H_{51} = 3,1 H_{51}$	A	1,75	2,763	4,531	11,59	63,62
35.	$F_{61} = l_{61} H_{61} = 1,55 H_{61}$	A	0,894	1,431	2,597	9,172	45,47
36.	$F_{B64} = l_{B64} H_{B64} = 0,8 H_{B64}$	A	4,702	9,121	18,57	30,47	50,13
37.	$F_{B42} = l_{B42} H_{B42} = 3,7 H_{B42}$	A	3,89	7,173	11,05	15,07	21,68
38.	$F_{z2} = h_{z2} H_{z2} = 1,46 H_{z2}$	A	0,902	1,519	4,997	45,26	189,9
39.	F_8	A	240	480	720	852	960
40.	F_Σ	A	268,3	530,4	813,8	1152	1919
41.	$F_{2p} = 2 F_\Sigma$	A	536,5	1060	1627	2304,7	3838
42.	k_μ		1,118	1,105	1,13	1,353	1,999

2.5.9. Струм, що намагнічує

$$I_\mu = \frac{p \cdot F_{2p}}{0,9 m_1 w_1 k_{01}} = \frac{2304,7}{0,9 \cdot 3 \cdot 20 \cdot 0,96} = 44,46 \text{ А},$$

в процентному відношенні до номінального струму

$$I_\mu^* = \frac{I_\mu}{I_H} 100\% = \frac{44,46}{139,6} 100\% = 31,8 \%,$$

де $F_{2p} = 2304,7$ А з табл.2.3. для $B_8 = 0,71$ Тл.

2.6. Активні і індуктивні опори обмоток

2.6.1. Довжина лобової частини обмотки статора

$$\tau_y = \frac{\pi(D + h_{пл})}{2p} = \frac{\pi(12,6 + 3,32)}{2} = 25,01 \text{ см.}$$

2.6.2. Середня довжина піввітка обмотки статора

$$l_{cp1} = l + l_{л1} = 90 + 39,26 = 129,3 \text{ см},$$

де $l_{л1} = k\tau_y + 2b_{л1} = 1,45 \cdot 25,01 + 2 \cdot 1,5 = 39,26$ см – довжина лобових з'єднань;

$k = 1,45$ – коефіцієнт, $b_{л1} = 1,5$ см – довжина вильоту прямолінійної частини котушки по [9].

2.6.3. Активний опір фази статора при температурі 20 °C

$$r_{1,20} = \frac{2 \cdot w_1 \cdot l_{cp1}}{5700 \cdot 2S_M} = \frac{20 \cdot 192,3}{5700 \cdot 10,02} = 0,0453 \text{ Ом.}$$

2.6.4. Активний опір фази статора в нагрітому стані

$$r_1 = r_{1,20} [1 + \alpha (\Theta_p - 20)] = 0,0453 [1 + 0,004(45 - 20)] = 0,0498 \text{ Ом,}$$

де $\Theta_p = 45$ °C – робоча температура обмотки;

$\alpha = 0,004 \text{ K}^{-1}$ – температурний коефіцієнт опору міді.

2.6.5. Активний опір стрижня ротора при температурі 20 °C

$$r_{c,20} = \frac{l}{2300 S_c} = \frac{90}{2300 \cdot 120,54} = 3,25 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.}$$

2.6.6. Активний опір частини короткозамкненого кільця між сусідніми стрижнями при температурі 20 °C

$$r_{k,20} = \frac{\pi D_{кл}}{2300 \cdot S_k \cdot z_2} = \frac{\pi 10,05}{2300 \cdot 450 \cdot 22} = 1,39 \cdot 10^{-6} \text{ Ом,}$$

де $D_{кл} = D_p - a_k = 12,3 - 2,25 = 10,05$ см – середній діаметр кільця.

2.6.7. Коефіцієнт приведення параметрів білячої клітини до обмотці статор

$$k_{\pi} = 4m \frac{(w_1 k_{01})^2}{z_2} = 4 \cdot 3 \frac{(20 \cdot 0,96)^2}{22} = 201,1.$$

2.6.8. Активний опір обмотки ротора при температурі 20 °C

$$r_{2,20} = r_{c,20} + \frac{2r_{k,20}}{\Delta^2} = 3,25 \cdot 10^{-4} + \frac{2 \cdot 1,39 \cdot 10^{-6}}{0,285^2} = 3,59 \cdot 10^{-4} \text{ Ом,}$$

де $\Delta = 2 \sin \left(\pi \cdot \frac{p}{z_2} \right) = 2 \sin \left(\pi \cdot \frac{1}{22} \right) = 0,285$ – кутовий параметр згідно [6].

2.6.9. Приведений активний опір обмотки ротора при температурі 20 °C

$$r'_{2,20} = r_{2,20} k_{\pi} = 3,59 \cdot 10^{-4} \cdot 201,1 = 0,072 \text{ Ом.}$$

2.6.10. Приведений активний опір обмотки ротора в нагрітому стані

$$r'_2 = r'_{2,20} [1 + \alpha_1 (\Theta_p - 20)] = 0,072 [1 + 0,0043(45 - 20)] = 0,0794 \text{ Ом,}$$

де $\alpha_1 = 0,004 \text{ K}^{-1}$ – температурний коефіцієнт опору алюмінію.

2.6.11. Коефіцієнт магнітної провідності пазового розсіювання обмотки

статора

$$\lambda_{\pi 1} = k_{\beta} \frac{h_{31}}{3b_2} + \left(0,785 + \frac{h_{21}}{b_2} + 0,3 + 1,12 \cdot 10^3 \frac{h_{\text{ш}}}{I_1 u_{\pi}} \right) \cdot k'_{\beta} =$$
$$= \frac{27,65}{3 \cdot 10,9} \left(1,085 + \frac{0,05}{10,9} + 1,12 \cdot 10^3 \frac{0,3}{139,6 \cdot 5} \right) = 2,42,$$

де $k_{\beta} = k'_{\beta} = 1$ – коефіцієнти, що враховують укорочення кроку для всіх одношарових обмоток [1];

$h_{31} = h_1 - 2\Delta_{i3} = 27,75 - 2 \cdot 0,05 = 27,65$ мм; $h_{21} = \Delta_{i3} = 0,05$ мм згідно [6].

2.6.12. Коефіцієнт магнітної провідності лобового розсіювання

$$\lambda_{\pi 1} = 0,34 \frac{q}{l} (l_{\pi 1} - 0,64 \cdot \beta \cdot \tau) = 0,34 \frac{4}{90} (39,26 - 0,64 \cdot 1 \cdot 19,79) = 0,402,$$

де $\beta = 1$ – вкорочення кроку для одношарових обмоток з діаметральним кроком.

2.6.13. Коефіцієнт магнітної провідності диференціального розсіювання

$$\lambda_{\pi 1} = 0,9 \frac{t_1 \cdot (q \cdot k_{01})^2}{\delta \cdot k_{\delta}} (k_{\text{ш}1} \cdot k_{\text{р}1} \cdot k_{\text{д}1}) = 0,9 \frac{4,65 \cdot (4 \cdot 0,96)^2}{0,15 \cdot 1} (1 \cdot 0,76 \cdot 0,0086) = 0,987,$$

де $k_{\text{ш}1} = 1$ – коефіцієнт, що враховує вплив відкритості паза статора для закритого паза [6];

$k_{\text{р}1} = 0,76$ – коефіцієнт демпфування (табл.7-3 [6]);

$k_{\text{д}1} = 0,0086$ – коефіцієнт, що враховує відношення сумарної ЕРС, наведених вищими гармоніками, до ЕРС від першої гармоніки (табл.7-2а [6]).

2.6.14. Індуктивний опір обмотки статора

$$x_1 = 15,8 \frac{f}{100} \left(\frac{w_1}{100} \right)^2 \frac{l \cdot 10^{-2}}{pq} \lambda_1 = 15,8 \frac{50}{100} \left(\frac{20}{100} \right)^2 \frac{90 \cdot 10^{-2}}{4} 3,81 = 0,271 \text{ Ом},$$

де $\lambda_1 = \lambda_{\pi 1} + \lambda_{\pi 1} + \lambda_{\pi 1} = 2,42 + 0,402 + 0,987 = 3,81$ – сумарний коефіцієнт магнітної провідності розсіювання обмотки статора.

2.6.15. Коефіцієнт магнітної провідності пазового розсіювання короткозамкненого ротора

$$\lambda_{\pi 2} = \frac{h_{3p}}{3 \cdot b_{lp}} \left(1 - \pi \frac{b_{lp}^2}{8S_c} \right) + 0,66 + 0,3 + 1,12 \cdot 10^3 \frac{h_{\text{ш}}}{I_2} =$$

$$= \frac{14,2}{3 \cdot 8,5} \left(1 - \pi \frac{8,5^2}{8 \cdot 120,54} \right) + 0,96 + 1,12 \cdot 10^3 \frac{0,3}{662,28} = 1,793,$$

де $h_{3p} = h_{1p} + 0,4b_{2p} = 12,2 + 0,4 \cdot 5 = 14,2$ мм – розрахункова висота паза ротора [6].

2.6.16. Коефіцієнт магнітної провідності диференціального розсіювання

$$\lambda_{д2} = 0,9t_2 \left(\frac{z_2}{6p} \right)^2 \frac{k_{д2}}{\delta \cdot k_{\delta}} = 0,9 \cdot 1,76 \left(\frac{22}{6} \right)^2 \frac{0,0085}{0,15 \cdot 1} = 1,21,$$

де $k_{д2} = 0,0085$ – коефіцієнт диференціального розсіювання ротора по рис.2.17[6]
для

$$q_2 = z_2 / 2pt = 22 / 2 \cdot 1 \cdot 3 = 3,67.$$

2.6.17. Коефіцієнт магнітної провідності розсіювання короткозамкнених кілець литий клітини

$$\lambda_{кл} = \left(\frac{2,9D_{кл.ср}}{z_2 l k_{пр2}^2} \right) \log \left(\frac{2,35D_{кл.ср}}{a_k + b_k} \right) = \left(\frac{2,9 \cdot 100,5}{22 \cdot 900 \cdot 0,285^2} \right) \log \left(\frac{2,35 \cdot 100,5}{22,5 + 20} \right) = 1,35,$$

де $D_{кл.ср} = D_p - a_k = 123 - 22,5 = 100,5$ мм – середній діаметр замикаючих кілець;

$k_{пр2} = 2 \sin(\pi p / z_2) = 2 \sin(\pi / 22) = 0,285$ – коефіцієнт приведення струму кільця до току стрижня.

2.6.18. Індуктивний опір обмотки ротора

$$x_2 = 7,9 f \cdot l \cdot \lambda_2 \cdot 10^{-9} = 7,9 \cdot 50 \cdot 900 \cdot 3,14 = 0,00116 \text{ Ом},$$

де $\lambda_2 = \lambda_{п2} + \lambda_{кл} + \lambda_{д2} = 1,793 + 1,35 + 1,21 = 3,14$ – сумарний коефіцієнт магнітної провідності розсіювання обмотки ротора.

2.6.19. Приводимо до числа витків статора

$$x'_2 = x_2 k_{п} = 0,00116 \cdot 201,1 = 0,224 \text{ Ом}.$$

2.7. Втрати і ККД

2.7.1. Втрати в обмотці статора

$$P_{м1} = m I_1^2 r_{л1} = 3 \cdot 139,6^2 \cdot 0,0498 = 2912 \text{ Вт}.$$

2.7.2. Втрати в обмотці ротора

$$P_{M2} = mI_2'^2 r_2' = 3 \cdot 118,1^2 \cdot 0,0794 = 3322 \text{ Вт},$$

де $I_2' = 0,36 \frac{\sqrt{3} \cdot P_2 \cdot 10^3}{U} = 0,36 \frac{\sqrt{3} \cdot 125 \cdot 10^3}{660} = 118,1 \text{ А}$ - рекомендується для заглибних двигунів.

2.7.3. Маса ярма статора

$$m_{с.я} = \gamma_c \pi (D_c - h_c) h_c k_c l \cdot 10^{-3} = 7,8 \pi \cdot (25,7 - 3,2) \cdot 3,2 \cdot 0,95 \cdot 90 \cdot 10^{-3} = 151 \text{ кг},$$

де $\gamma_c = 7,8 \text{ кг/см}^3$ – щільність електротехнічної сталі.

2.7.4. Маса зубців статора

$$m_{с.з} = \gamma_c S_{с.з} k_c l \cdot 10^{-3} = 7,8 \cdot 59,77 \cdot 0,95 \cdot 90 \cdot 10^{-3} = 39,86 \text{ кг},$$

$$\text{де } S_{с.з} = \pi \frac{(D + 2h_{\pi})^2 - D^2}{4} - z_1 S_{\pi} \cdot 10^{-2} = \pi \frac{(12,6 + 2 \cdot 3,35)^2 - 12,6^2}{4} - 24 \cdot 450,4 \cdot 10^{-2} =$$

$$= 59,77 \text{ см}^2 - \text{площа зубців статора.}$$

2.7.5. Розрахункові втрати в ярмі статора

$$P_{с.я} = k_{д.я} p_{с.я} m_{с.я} \cdot 10^{-3} = 1,9 \cdot 6,16 \cdot 151 \cdot 10^{-3} = 1,767 \text{ кВт},$$

де $k_{д.з} = 2,1$ – коефіцієнт, що враховує вплив нерівномірності розподілу магнітного потоку по перетинах ділянки магнітопроводу і технологічні фактори;

$p_{с.я} = p_{1/50} \cdot B_c^2 = 2,5 \cdot 1,57^2 = 6,16 \text{ Вт/кг}$; $p_{1/50} = 2,5 \text{ Вт/кг}$ – питомі втрати в сталі марки 2013.

2.7.6. Розрахункові втрати в зубцях статора

$$P_{с.з} = k_{д.з} p_{с.з} m_{с.з} \cdot 10^{-3} = 2,1 \cdot 7,48 \cdot 39,86 \cdot 10^{-3} = 0,626 \text{ кВт},$$

де $k_{д.з} = 2,1$ – коефіцієнт, що враховує вплив нерівномірності розподілу магнітного потоку по перетинах ділянки магнітопроводу і технологічні фактори;

$p_{с.з} = p_{1/50} \cdot B_{z1}^2 = 2,5 \cdot 1,73^2 = 7,48 \text{ Вт/кг}$ – питомі втрати в сталі зубців.

2.7.7. Сумарні втрати в сталі

$$P_c = P_{с.я} + P_{с.з} = 1,767 + 0,626 = 2,393 \text{ кВт}.$$

2.7.8. Механічні втрати. У зв'язку з тим, що осьове зусилля від насоса не перевищує 600 Н, застосовуємо гумово-металевий впертий підшипник з $d_{п.у.} = 13,0 \text{ см}$. Крім того, з урахуванням уніфікації, застосовуємо гумово-металеві напрямні

підшипники ($n_{п.н} = 3$ шт.) з розмірами $d_{п.н} \times b_{п.н} = 7 \text{ см} \times 7 \text{ см}$. При цьому верхній підшипник завжди здвоєний. Тоді:

$$S_{п.у} = \pi \frac{d_{п.у}^2}{4} = \pi \frac{13^2}{4} = 132,73 \text{ см}^2;$$

$$S_{п.н} = d_{п.н} \cdot b_{п.н} = 7 \cdot 7 = 49 \text{ см}^2.$$

2.7.9. Механічні втрати в підшипниках

$$P_{п} = P_{п.у} + n_{п.н} P_{п.н} = 700 + 3 \cdot 75 = 925 \text{ Вт},$$

де $P_{п.у} = f(S_{п.у}) = 700 \text{ Вт}$, $P_{п.н} = f(S_{п.н}) = 75 \text{ Вт}$ – по рис.2.9 [9].

2.7.10. Втрати на тертя поверхні ротора про воду

$$P_{тр} = 2,25 D_p^4 \cdot \lambda_B \ln_H^3 \cdot 10^{-11} = 2,25 \cdot 12,3^4 \cdot 0,0016 \cdot 90 \cdot 2925^3 \cdot 10^{-11} = 1345 \text{ Вт},$$

де $\lambda_B = \lambda_0 e^{k_\lambda \cdot l} \cdot 10^{-3} = 0,706 e^{0,0055 \cdot 90} \cdot 10^{-3} = 0,0016$ – коефіцієнт опору руху рідини в зазорі;

$$\lambda_0 = \frac{(D_p - 8,7)^2 + 34}{(D_p + 17,2)} \cdot \frac{(\delta_0 + 5)}{2(\delta_0 - 2)^2 + 4,85} = \frac{(12,3 - 8,7)^2 + 34}{(12,3 + 17,2)} \cdot \frac{(4,97 + 5)}{2(4,97 - 2)^2 + 4,85} = 0,706;$$

$$\delta_0 = \frac{\delta}{0,026 e^{10 \cdot \Delta_{п}}} = \frac{0,15}{0,026 e^{10 \cdot 0,015}} = 4,97 \text{ – відносний зазор};$$

$\Delta_{п} = 0,015 \text{ см}$ – приймаємо на основі досвіду проектування;

$$k_\lambda = \frac{(D_p - 7,8)^2 + 10,7}{(D_p + 13) \cdot 9 \cdot \delta_0^2} = \frac{(12,3 - 7,8)^2 + 10,7}{(12,3 + 13) \cdot 9 \cdot 4,97^2} = 0,0055 \text{ – емпіричний коефіцієнт};$$

$n_H = 2925 \text{ об/хв}$ – номінальна швидкість обертання приймається за даними серійних машин.

2.7.11. Загальні механічні втрати

$$P_{мех} = P_{п} + P_{тр} = 925 + 1345 = 2270 \text{ Вт}.$$

2.7.12. Додаткові втрати приймаємо

$$P_d = 0,005 \frac{P_2 \cdot 10^3}{\eta} = 0,005 \frac{125 \cdot 10^3}{0,9} = 694 \text{ Вт}.$$

2.7.13. Сумарні втрати

$$\Sigma P = P_{м1} + P_{м2} + P_c + P_{мех} + P_d = 2912 + 3322 + 2393 + 2270 + 694 = 11591 \text{ Вт}.$$

2.7.14. Споживана потужність

$$P_1 = P_2 + \Sigma P = 125000 + 11591 = 136591 \text{ Вт.}$$

2.7.15. ККД двигуна

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{125 \cdot 10^3}{136591} = 0,915.$$

2.7.16. Електромагнітна потужність

$$P_{12} = P_1 - P_{m1} - P_c = 13,66 - 2,912 - 2,39 = 131,3 \text{ кВт.}$$

2.7.17. Номінальне ковзання і частота обертання:

$$s = \frac{P_{m2}}{P_{12}} = \frac{3,322}{131,13} = 0,0253;$$

$$n_H = n(1 - s) = 3000(1 - 0,0253) = 2851 \text{ об/хв.}$$

2.8. Коефіцієнт потужності

2.8.1. Втрати холостого ходу

$$P_{xx} = P_{m0} + P_c + P_{мех} = 0,295 + 2,39 + 2,27 = 4,96 \text{ кВт,}$$

$$\text{де } P_{m0} = 3I_{\mu}^2 r_1 \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 44,46 \cdot 0,05 \cdot 10^{-3} = 0,295 \text{ кВт.}$$

2.8.2. Активна і реактивна складові струму холостого ходу:

$$I_{a0} = \frac{P_{xx} \cdot 10^3}{\sqrt{3}U} = \frac{4,96 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 660} = 4,34 \text{ А;}$$

$$I_{p0} = I_{\mu} = 44,46 \text{ А.}$$

2.8.3. Повний струм холостого ходу:

$$I_0 = \sqrt{I_{a0}^2 + I_{p0}^2} = \sqrt{4,34^2 + 44,46^2} = 4,34 \text{ А.}$$

2.8.4. Активна складова струму

$$I_a = \frac{P_1 \cdot 10^3}{\sqrt{3}U} = \frac{136,6 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 660} = 119 \text{ А.}$$

2.8.5. Коефіцієнт потужності холостого ходу дорівнює

$$\cos \varphi_0 = \frac{I_{a0}}{I_0} = \frac{4,34}{119} = 0,036.$$

2.8.6. Коефіцієнт потужності при навантаженні

$$\cos \varphi = \frac{I_a}{\sqrt{\left[\sqrt{(I_{a0} + I_2')^2 - I_a^2} + I_\mu \right]^2 + I_a^2}} =$$

$$= \frac{119}{\sqrt{\left[\sqrt{(4,34 + 118,1)^2 - 119^2} + 44,46 \right]^2 + 119^2}} = 0,852.$$

2.9. Робочі характеристики

2.9.1. Для розрахунку і побудови робочих характеристик скористаємося методикою, викладеної в [6]. Спочатку розрахуємо параметри схеми заміщення:

$$r_{12} = \frac{P_c \cdot 10^3}{m I_\mu^2} = \frac{2,393 \cdot 10^3}{3 \cdot 44,46^2} = 0,4 \text{ Ом};$$

$$x_{12} = \frac{U}{\sqrt{3} I_\mu} - x_1 = \frac{660}{\sqrt{3} \cdot 44,46} - 0,271 = 8,3 \text{ Ом};$$

$$\gamma = \arctan \left[\frac{r_1 x_{12} - r_{12} x_1}{r_{12}(r_1 + r_{12}) + x_{12}(x_{12} + x_1)} \right] = \arctan \left[\frac{0,0498 \cdot 8,3 - 0,4 \cdot 0,271}{0,4(0,0498 + 0,4) + 8,3(8,3 + 0,271)} \right] = 0,245^\circ;$$

$$c_1 = 1 + \frac{x_1}{x_{21}} = 1 + \frac{0,271}{8,3} = 1,03.$$

2.9.2. Активна і реактивна складові струму холостого ходу:

2.9.3. Розрахуємо наступні коефіцієнти:

$$a' = c_1^2 = 1,03^2 = 1,06; a = c_1 \cdot r_1 = 1,03 \cdot 0,0498 = 0,0513;$$

$$b' = 0; b = c_1 \cdot (x_1 + c_1 \cdot x_2') = 1,03 \cdot (0,271 + 1,03 \cdot 0,224) = 0,517.$$

2.9.4. Втрати, що не змінюються при зміні ковзання

$$P_{\text{const}} = P_c + P_{\text{мех}} = 2,39 + 2,27 = 4,66 \text{ кВт}.$$

2.9.5. Розрахункові формули для побудови робочих характеристик:

$$A = a' \frac{r_2'}{s}; B = b' \frac{r_2'}{s};$$

$$R = a + A; X = b + B;$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}; I_2'' = \frac{U}{Z};$$

$$\cos \varphi_2' = \frac{R}{Z}; \sin \varphi_2' = \frac{X}{Z};$$

$$I_{1a} = I_{0a} + I_2'' \cdot \cos \varphi_2'; I_{1p} = I_{0p} + I_2'' \cdot \sin \varphi_2';$$

$$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}; I_2' = c_1 \cdot I_2'';$$

$$P_1 = \sqrt{3}UI_{1a}; P_d = P_{дн} \left(\frac{I_1}{I_{1н}} \right)^2;$$

$$P_{m1} = mI_1^2 r_1; P_{m2} = mI_2'^2 r_2';$$

$$\Sigma P = P_{m1} + P_{m2} + P_d + P_{const}; P_2 = P_1 - \Sigma P;$$

$$\eta = 1 - \frac{\Sigma P}{P_1}; \cos \varphi = \frac{I_{1a}}{I_a}.$$

Переймаючись значеннями ковзання, розраховуємо робочі характеристики.
Результати розрахунку приведені в табл.2.4, характеристики на рис. 2.5.

Таблиця 2.4. Розрахунок робочих характеристик

№ п/п	Параметр	Одиниця виміру	s				
			0,01	0,015	0,02	0,0265	0,03
1.	A	Ом	8,42	5,62	4,21	3,18	2,81
2.	B	Ом	0	0	0	0	0
3.	R	Ом	8,48	5,67	4,26	3,23	2,86
4.	X	Ом	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52
5.	Z	Ом	8,49	5,69	4,3	3,27	2,91
6.	I ₂ ''	A	44,86	66,96	88,73	116,5	131,1
7.	cos φ ₂ '		0,998	0,996	0,993	0,987	0,984
8.	sin φ ₂ '		0,061	0,091	0,12	0,158	0,178
9.	I _{1a}	A	49,13	71,02	92,42	119,36	133,38
10.	I _{1p}	A	47,19	50,54	55,14	62,87	67,79

Продовження таблиці 2.4.

11.	I_1	А	68,13	87,17	107,62	134,9	149,62
12.	I_2	А	46,22	68,97	91,39	119,97	135,07
13.	P_1	Вт	56165	81185	105650	136442	152478
14.	P_d	Вт	165,3	270,6	412,5	648,1	797,2
15.	P_{m1}	Вт	693,4	1135,2	1730,4	2718,8	3344,6
16.	P_{m2}	Вт	508,9	1132,9	1989,4	3428,6	4345,7
17.	ΣP	Вт	6027,5	7198,7	8792,2	11455	13148
18.	P_2	Вт	50137	73987	96858	124986	139330
19.	η		0,893	0,911	0,917	0,916	0,914
20.	$\cos \varphi$		0,721	0,815	0,859	0,885	0,891

2.9.6. Номінальні дані спроектованого двигуна:

$P_{2H} = 125$ кВт; $I_{1H} = 134,9$ А; $s_H = 0,0265$; $\cos \varphi_H = 0,885$; $\eta_H = 0,919$.

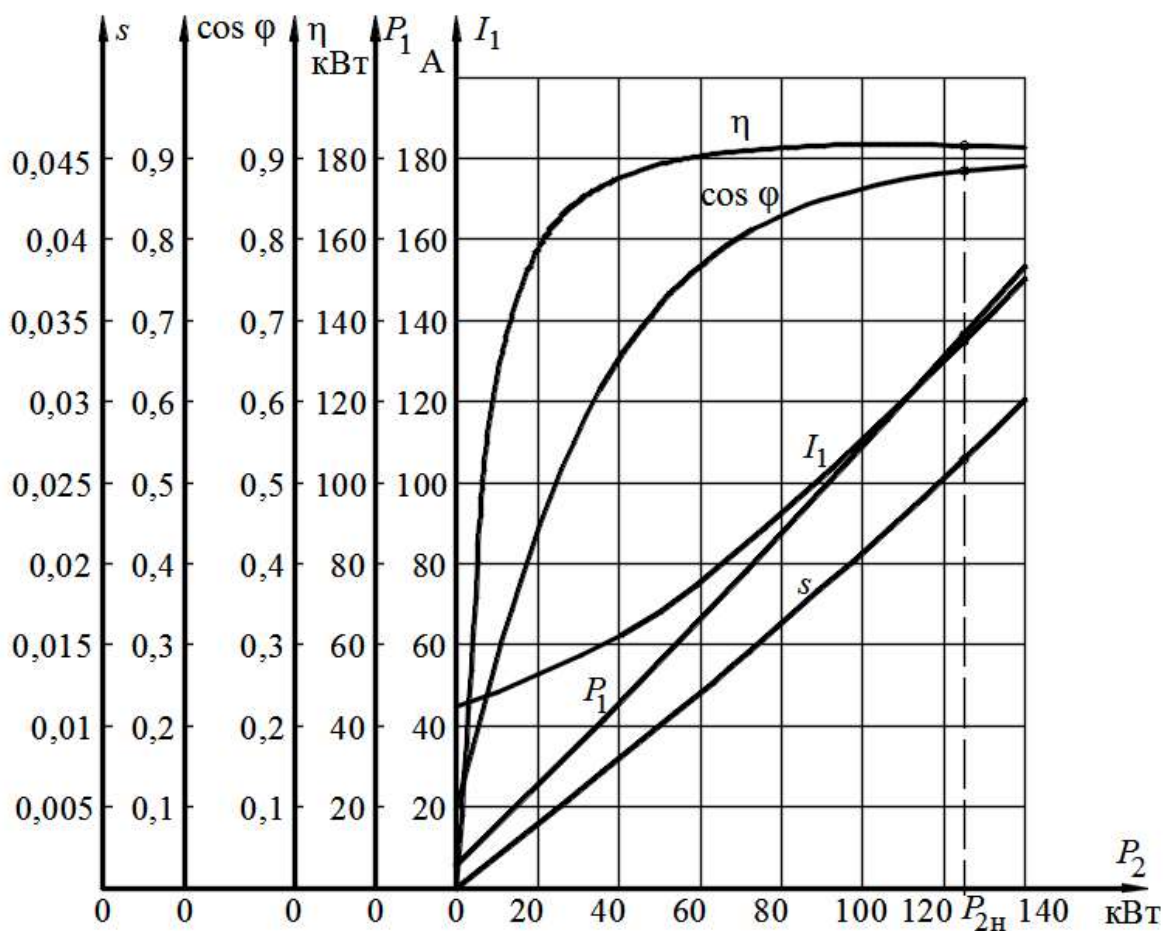


Рис.2.5. Робочі характеристики спроектованого двигуна

2.10. Пускові характеристики

2.10.1. Пускові характеристики розраховуємо за методикою [6], для чого задаємося поряд значень ковзання s і за формулами 2.1...2.22 визначаємо значення необхідних параметрів. Визначаємо приведену висоту стрижня

$$\xi = 65,15 h_{\text{ст}} \sqrt{s} \quad (2.1)$$

2.10.2. За графіками рис.6-46 [6] знаходимо значення коефіцієнтів φ і φ' .

2.10.3. Активний опір обмотки ротора

$$h_r = \frac{h_{\text{ст}}}{1 + \varphi}. \quad (2.2)$$

2.10.4. Перетин стрижня ротора, обмежене висотою h_r

$$S_r = \pi \frac{b_{1p}^2}{8} + \frac{(b_{1p} - b_r) \cdot (h_{1p} - 0,5b_{1p})}{2}, \quad (2.3)$$

де $b_r = b_{1p} - \frac{(b_{1p} - b_{2p}) \cdot (h_r - 0,5b_{1p})}{h_{1p}}$ – відповідна ширина паза ротора.

2.10.5. Коефіцієнт зміни опору стрижнів ротора під дією ефекту витіснення струму

$$k_r = \frac{S_c}{S_r}. \quad (2.4)$$

2.10.6. Коефіцієнт загального збільшення опору фази ротора під впливом ефекту витіснення струму

$$K_R = \frac{r_{\text{с.20}}}{r_{2.20}} (k_r - 1). \quad (2.5)$$

2.10.7. Приведений активний опір ротора з урахуванням дії ефекту витиснутими струму

$$r'_{2\xi} = r'_2 \cdot K_R. \quad (2.6)$$

2.10.8. Коефіцієнт магнітної провідності пазової розсіювання ротора з урахуванням дії ефекту витиснутими струму і зміни кратності пускового струму в залежності від ковзання

$$\lambda_{\pi 2\xi} = \left[\frac{h_{3p}}{3 \cdot b_{lp}} \left(1 - \pi \frac{b_{lp}^2}{8S_c} \right) + 0,66 \right] \cdot \varphi' + 0,3 + 1,12 \cdot 10^3 \frac{h_{ш}}{k_I I_2}. \quad (2.7)$$

12.10.9. Коефіцієнт зміни індуктивного опору фази обмотки ротора під дією ефекту витіснення струму

$$K_x = \frac{\lambda_{\pi 2} + \lambda_{кл} + \lambda_{д2}}{\lambda_{\pi 2\xi} + \lambda_{кл} + \lambda_{д2}}. \quad (2.8)$$

12.10.10. Приведений індуктивний опір ротора з урахуванням дії ефекту витиснутими струму

$$x'_{2\xi} = x'_2 \cdot K_x. \quad (2.9)$$

12.10.11. Струм ротора без урахування впливу насичення

$$I'_2 = \frac{U}{\sqrt{3} \sqrt{\left(r_1 + \frac{r'_{2\xi}}{s} \right)^2 + (x_1 + x'_{2\xi})^2}}. \quad (2.10)$$

12.10.12. Визначимо середню МРС обмотки, віднесену до одного пазу з урахуванням впливу насичення на параметри. Приймаємо $I_1 = I'_2$

$$F_{п.ср} = 0,7 k_{нас} \cdot I_1 \frac{u_{п}}{a} \left(k'_{\beta} + k_{y1} + k_{01} \frac{z_1}{z_2} \right). \quad (2.11)$$

12.10.13. Фіктивна індукція потоку розсіювання в повітряному зазорі

$$B_{\phi\delta} = \frac{F_{п.ср} \cdot 10^{-6}}{1,6\delta \cdot C_N}, \quad (2.12)$$

де $C_N = 0,64 + 2,5 \sqrt{\frac{\delta}{t_1 + t_2}} = 0,64 + 2,5 \sqrt{\frac{1,5}{16,5 + 17,6}} = 1,164$ – коефіцієнт зміни

магнітної індукції в повітряному зазорі під дією ефекту насичення.

12.10.14. За рис.6-50 [6] знаходимо коефіцієнт χ_{δ} , що характеризує відношення потоку розсіювання при насиченні до потоку розсіювання ненасиченої машини.

12.10.15. Коефіцієнт магнітної провідності пазового розсіювання обмотки статора з урахуванням впливу насичення

$$\lambda_{\pi 1 \text{нас}} = \lambda_{\pi 1} - \Delta \lambda_{\pi 1 \text{нас}}, \quad (2.13)$$

де $\Delta \lambda_{\pi 1 \text{нас}} = \left(0,3 + 1,12 \cdot 10^3 \frac{h_{\text{ш}}}{I_1 u_{\pi}} \right) \cdot (1 - \chi_{\delta})$ – зміна коефіцієнта магнітної провідності

пазової розсіювання обмотки статора при насиченні.

12.10.16. Коефіцієнт магнітної провідності диференціального розсіювання обмотки статора з урахуванням впливу насичення

$$\lambda_{\text{д1.нас}} = \lambda_{\text{д1}} \cdot \chi_{\delta}. \quad (2.14)$$

12.10.17. Індуктивний опір фази обмотки статора з урахуванням насичення

$$x_{1 \text{нас}} = x_1 \frac{\lambda_{\pi 1 \text{нас}} + \lambda_{\text{л1}} + \lambda_{\text{д1нас}}}{\lambda_{\pi 1} + \lambda_{\text{л1}} + \lambda_{\text{д1}}}. \quad (2.15)$$

12.10.18. Аналогічно розрахуємо індуктивний опір фази обмотки ротора з урахуванням насичення. для чого визначимо:

коефіцієнт магнітної провідності пазового розсіювання

$$\lambda_{\pi 2 \xi \text{нас}} = \lambda_{\pi 2 \xi} - \Delta \lambda_{\pi 2 \text{нас}}, \quad (2.16)$$

де $\Delta \lambda_{\pi 2 \text{нас}} = \left(0,3 + 1,12 \cdot 10^3 \frac{h_{\text{ш}}}{I_2 \cdot k_I} \right) \cdot (1 - \chi_{\delta})$ – зміна коефіцієнта магнітної провідності

пазової розсіювання обмотки ротора при насиченні;

коефіцієнт магнітної провідності диференціального розсіювання

$$\lambda_{\text{д2.нас}} = \lambda_{\text{д2}} \cdot \chi_{\delta}; \quad (2.17)$$

безпосередньо індуктивний опір

$$x_{2 \xi \text{нас}} = x_2 \frac{\lambda_{\pi 2 \xi \text{нас}} + \lambda_{\text{кл}} + \lambda_{\text{д2нас}}}{\lambda_{\pi 2} + \lambda_{\text{кл}} + \lambda_{\text{д2}}}. \quad (2.18)$$

2.10.19. Опір взаємної індукції обмоток в пусковому режимі

$$x_{12 \pi} = x_{12} \frac{F_p}{F \delta} = 8,3 \frac{2304,7}{960} = 19,93.$$

2.10.20. Розрахунок струмів

$$I'_2 = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{a_{\pi}^2 + b_{\pi}^2}}; \quad I_1 = I'_2 \frac{\sqrt{a_{\pi}^2 + (b_{\pi} + x_{12 \pi})^2}}{c_{\pi 1 \text{нас}} \cdot x_{12 \pi}}, \quad (2.19)$$

$$\text{де } c_{\text{плнас}} = 1 + \frac{x_{1\text{нас}}}{x_{12\text{п}}} - \text{коефіцієнт, що враховує ефект насичення}; \quad (2.20)$$

$$a_{\text{п}} = r_1 + c_{\text{плнас}} \frac{r'_{2\xi}}{s}; b_{\text{п}} = x_{1\text{нас}} + c_{\text{плнас}} x'_{2\xi\text{нас}} - \text{опори схеми заміщення} \quad (2.21)$$

с урахуванням насичення.

2.10.21. Розрахунок пускових струму і моменту в відносних одиницях

$$I_1^* = \frac{I_{1\text{п}}}{I_{1\text{н}}}; M^* = \left(\frac{I'_{2\text{п}}}{I'_{2\text{н}}} \right)^2 K_R \frac{s_{\text{н}}}{s}. \quad (2.22)$$

2.10.22. Розрахунок кратності пускових струму і моменту ($s_{\text{п}} = 1$)

$$k_{I\text{п}} = \frac{I_{1\text{п}}}{I_{1\text{н}}} = \frac{884,3}{134,9} = 6,56; k_{M\text{п}} = \left(\frac{I'_{2\text{п}}}{I'_{2\text{н}}} \right)^2 K_R \frac{s_{\text{н}}}{s_{\text{п}}} = \left(\frac{877,1}{126,5} \right)^2 1,06 \frac{0,0265}{1} = 1,39.$$

Результати розрахунку за формулами 2.1...2.22 зведені в таблицю 2.5, механічні характеристики представлені на рис.2.6.

Таблиця 2.5. Розрахунок механічних характеристик

№ п/п	Параметр	Одини- ця виміру	s						
			0,1	0,18	0,265	0,35	0,5	0,8	1,0
1.	ξ (2.1)		0,389	0,522	0,628	0,728	0,871	1,1	1,231
2.	φ рис.6-46 [6]		0,002	0,007	0,014	0,025	0,051	0,12	0,165
3.	φ' рис.6-47 [6]		0,99	0,985	0,98	0,975	0,97	0,94	0,93
4.	k_r (2.4)		0,949	0,952	0,957	0,965	0,983	1,033	1,067
5.	K_R (2.5)		0,953	0,957	0,961	0,968	0,985	1,03	1,06
6.	$r'_{2\xi}$ (2.6)	Ом	0,076	0,076	0,076	0,077	0,078	0,082	0,084
7.	K_x (2.8)		0,997	0,968	0,94	0,904	0,883	0,855	0,841
8.	$x'_{2\xi}$ (2.9)	Ом	0,223	0,217	0,211	0,202	0,198	0,192	0,188
9.	$k_{\text{нас}}$		1,0	1,1	1,15	1,2	1,3	1,4	1,5
10.	$B_{\phi\delta}$ (2.12)	Тл	1,033	1,584	1,9	2,152	2,48	2,809	3,063

Продовження таблиці 2.5.

11.	χ_δ рис.6-50 [9]		0,97	0,91	0,86	0,83	0,76	0,72	0,69
12.	$x_{1\text{нас}}$ (2.15)	Ом	0,269	0,265	0,261	0,259	0,254	0,251	0,249
13.	$x'_{2\xi\text{нас}}$ (2.18)	Ом	0,221	0,209	0,198	0,188	0,177	0,167	0,162
14.	$c_{1\text{пнас}}$ (2.20)		1,013	1,013	1,013	1,013	1,013	1,013	1,013
15.	$a_{\text{п}}$ (2.21)	Ом	0,817	0,477	0,347	0,272	0,208	0,153	0,135
16.	$b_{\text{п}}$ (2.21)	Ом	0,493	0,477	0,462	0,449	0,433	0,421	0,413
17.	I'_2 (2.19)	А	399,4	564,9	659,2	725,3	792,5	850,7	877,1
18.	I_1 (2.19)	А	404,1	571	665,9	732,2	799,6	857,9	884,3
19.	I_1^* (2.22)	В.О.	2,9	4,09	4,77	5,25	5,71	6,145	6,36
20.	M^* (2.22)	В.О.	2,57	2,91	2,79	2,54	2,182	1,67	1,49

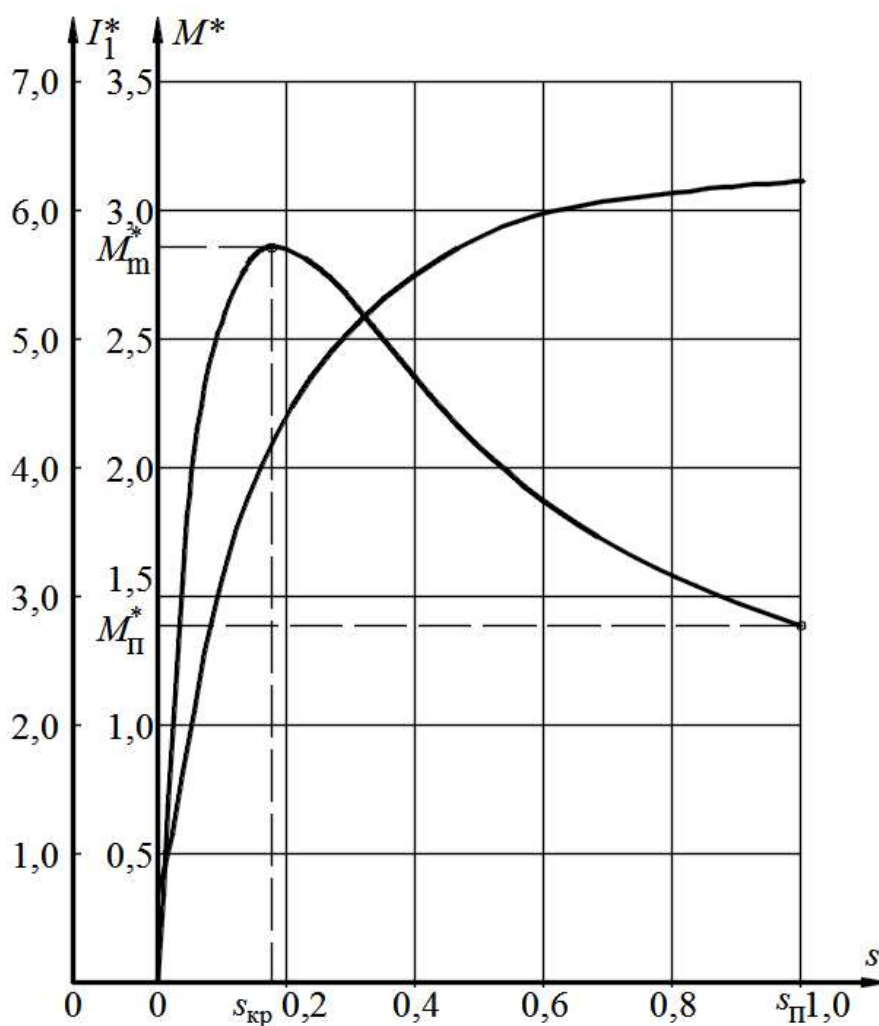


Рис.2.6. Механічні характеристики спроектованого двигуна

2.10.22. Визначимо значення критичного ковзання і кратність максимального моменту

$$s_{кр} = \frac{r_2'}{\frac{x_{1нас}}{c_{п1нас}} + x'_{2\xi нас}} = \frac{0,079}{\frac{0,262}{1,013} + 0,208} = 0,17;$$

$$k_{Mm} = \left(\frac{I_{2m}'}{I_{2н}'} \right)^2 K_{Rm} \frac{s_n}{s_{кр}} = \left(\frac{548}{126,5} \right)^2 0,96 \cdot \frac{0,0265}{0,17} = 2,86,$$

де $K_{Rm} = 0,96$, $I_{2m} = 548$ А – параметри взяті з таблиці 2.5 для ковзання $s_{кр}$.

Отримані значення кратності струмів і моментів близькі до аналогічних значень промислових двигунів [8].

2.11. Механічні розрахунки

2.11.1. Визначимо максимальне одностороннє магнітне тяжіння, для чого побудуємо графіки $T = f(B_\delta)$, $T = f(k_\mu)$ табл.2.5., рис.2.7.

$$T = \frac{80\varepsilon}{2,8k_\mu - \varepsilon} B_\delta^2 \tau = \frac{80 \cdot 0,133}{2,8k_\mu - 0,133} B_\delta^2 \cdot 19,79 \text{ Н/см},$$

де $\varepsilon = e/\delta = 0,2/1,5 = 0,133$; e – початковий ексцентриситет, визначається одностороннім зазором в напрямних підшипниках.

Таблиця 2.6. Залежності $T = f(B_\delta)$, $T = f(k_\mu)$

B_δ	Тл	0,4	0,4	0,6	0,71	0,8
k_μ		1,118	1,105	1,13	1,353	1,999
T	Н/см	2,81	11,38	25	29,05	24,66

За графіком знаходимо $T_{\max} = 29,1$ Н/см.

2.11.2. Радіальна складова гідродинамічної сили

$$R = \frac{\varepsilon \gamma_v D_p^3 \ln^2}{900} = \frac{0,133 \cdot 1000 \cdot 0,123^3 \cdot 0,9 \cdot 285 \text{ І}^2}{900} = 2012 \text{ Н},$$

де $\gamma_v = 1000$ кг/м³ – щільність води.

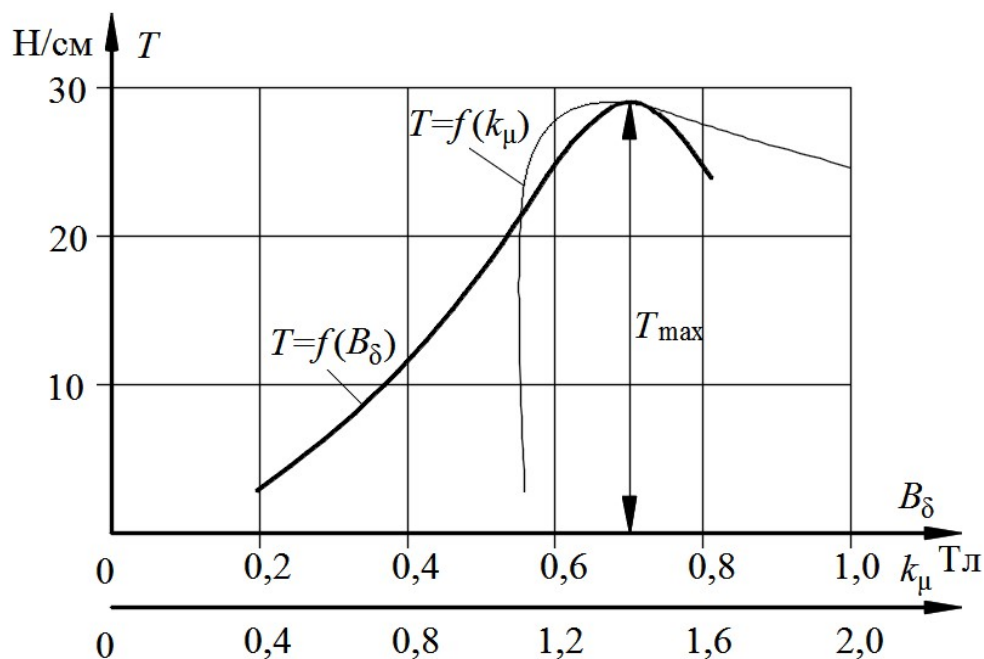


Рис.2.7. Залежності $T=f(B_\delta)$, $T=f(k_\mu)$

2.11.3. Маса ротора складається з масі сталі і алюмінію обмотки:

$$m_{\text{ст.р}} = \gamma_{\text{с}} S_{\text{ст}} l \cdot 10^{-3} = 7,8 \cdot 92,3 \cdot 90 \cdot 10^{-3} = 64,79 \text{ кг},$$

де $S_{\text{ст}} = \pi \frac{D_{\text{р}}^2}{4} - z_2 S_{\text{с}} 10^{-2} = \pi \frac{12,3^2}{4} - 22 \cdot 120,54 \cdot 10^{-2} = 92,3 \text{ см}^2$ – площа сталі пакета ротора.

$$m_{\text{ал.с}} = \gamma_{\text{ал}} z_2 l'_2 S_{\text{с}} \cdot 10^{-2} = 2,6 \cdot 22 \cdot 92 \cdot 120,54 \cdot 10^{-3} = 6,34 \text{ кг};$$

$$m_{\text{ал.к}} = \gamma_{\text{ал}} 2\pi D_{\text{кл}} S_{\text{к}} \cdot 10^{-2} = 2,6 \cdot 10,05 \cdot 450 \cdot 10^{-3} = 0,739 \text{ кг},$$

де $\gamma_{\text{ал}} = 2,6 \cdot 10^{-3} \text{ кг/см}^3$ – щільність алюмінію;

$l'_2 = l_2 + b_{\text{к}} = 90 + 2 = 92 \text{ см}$ – довжина стрижня.

$$m_{\text{р}} = m_{\text{ст.р}} + m_{\text{ал.с}} + m_{\text{ал.к}} = 64,79 + 6,34 + 0,739 = 71,87 \text{ кг}.$$

2.11.4. Прогин ротора від розподіленої сили

$$f_{\text{р}} = \frac{5q_1 l^4}{384 A_{\text{в}}} \left[\frac{64a_{\text{п}}^3}{5l} + \sigma K_A \cdot \left(1 + \frac{8a_{\text{п}}}{l} + \frac{96a_{\text{п}}^2}{5l^2} \right) \right] =$$

$$= \frac{5 \cdot 59,29 \cdot 90^4}{384 A_{\text{в}}} \left[\frac{64 \cdot 8,5^3}{5 \cdot 90} + 1,1 \cdot 0,35 \cdot \left(1 + \frac{8 \cdot 8,5}{90} + \frac{96a_{\text{п}}^2}{5 \cdot 90^2} \right) \right] = 0,0117 \text{ см},$$

де $q_1 = T_{\max} + \frac{R}{l} + 9,81 \frac{m_p}{l} = 29,1 + \frac{2012}{90} + 9,81 \frac{71,87}{90} = 59,29 \text{ Н/см}$ – навантаження на одиницю довжини пакета ротора;

$$K_A = \frac{A_B}{A_B + A_{\Pi}} = 0,35 \text{ – рекомендується на підставі досвідчених даних [9];}$$

$$A_B = E \cdot J_B = 2,1 \cdot 10^7 \cdot 155,3 = 326,1 \cdot 10^7 \text{ Н/см}^2 \text{ – жорсткість вала;}$$

$$E = 2,1 \cdot 10^7 \text{ – модуль пружності стали [9];}$$

$$J_B = \pi \frac{d_B^4}{64} = 2,1 \cdot 10^7 \cdot 155,3 = 326,1 \cdot 10^7 \text{ см}^4 \text{ – екваторіальний момент інерції перерізу вала під пакетом;}$$

$\sigma = 1,1$ – коефіцієнт, що враховує зниження жорсткості пакета при його нагріванні;

$a_{\Pi} = 8,5 \text{ см}$ – відстань від краю пакета ротора до направляючого підшипника.

2.11.5. Початковий прогин ротора [9]

$$f_{\Pi} = f_p \cdot \frac{T_{\max} + \frac{R}{l}}{q_1} = 0,0117 \cdot \frac{29,1 + \frac{2012}{90}}{59,29} = 0,0102 \text{ см.}$$

2.11.6. Прогин ротора від власної маси

$$f_G = f_p \cdot \left(9,81 \frac{m_p}{l \cdot q_1} \right) = 0,0117 \cdot \left(9,81 \frac{71,87}{90 \cdot 59,29} \right) = 0,0015 \text{ см.}$$

2.11.7. Сталий прогин ротора

$$f_M = \frac{f_{\Pi}}{1 - m_e} = \frac{0,0102}{1 - 0,508} = 0,0206 \text{ см,}$$

де $m_e = f_{\Pi}/e = 0,0102/0,02 = 0,508$ – початковий ексцентриситет ротора.

2.11.8. Результируючий прогин ротора

$$\Sigma f = f_G + f_M = 0,0015 + 0,0206 = 0,0231 \text{ см.}$$

2.11.9. Умова допустимого прогину [9]

$$\Sigma f + e < \frac{\delta}{2} = 0,0231 + 0,02 = 0,0431 < \frac{0,15}{2} = 0,075 \text{ см.}$$

2.11.10. Критична частота обертання. Знайдемо попередньо для випадку сталого обертання ротора [9]

$$C_{TR} = \frac{T_{\max} l + R}{e} = \frac{29,1 \cdot 90 + 2012}{0,02} = 231550 \text{ Н/см};$$

$$C_G = \frac{G}{f_G} = \frac{9,81 \cdot 71,87}{0,0015} = 456340 \text{ Н/см};$$

$$n_{\text{кр}} = 300 \sqrt{\frac{1,57 C_G - C_{TR}}{9,81 m_p}} = 300 \sqrt{\frac{1,57 \cdot 456340 - 231550}{9,81 \cdot 71,87}} = 7868 \text{ об/хв.}$$

Критична частота повинна відрізнятися від номінальної не менше ніж на 30% [9]. Отриманий результат задовольняє цій умові.

2.12. Тепловий розрахунок

2.12.1. Термічна провідність ярма пакета статора

$$\Lambda_{j1} = \pi \lambda_{Fe} k_c l \frac{D_c - h_c}{h_c} = \pi \cdot 0,373 \cdot 0,95 \cdot 90 \frac{25,7 - 3,2}{3,2} = 704 \text{ Вт/}^\circ\text{C},$$

де $\lambda_{Fe} = 0,373 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}$ – теплопровідність електротехнічної сталі 2013 [9];

2.12.2. Термічна провідність зубця пакета статора

$$\Lambda_{z1} = 2 \lambda_{Fe} k_c l \frac{z_1 b_{z1}}{h_{\pi}} = 2 \cdot 0,373 \cdot 0,95 \cdot 90 \frac{24 \cdot 0,707}{3,35} = 323 \text{ Вт/}^\circ\text{C}.$$

2.12.3. Термічна провідність пазової ізоляції

$$\Lambda_{\pi} = z_1 \Pi_{\pi} l \frac{\lambda_{\pi i}}{\Delta_{i3}} = 24 \cdot 10,79 \cdot 90 \frac{0,004186}{0,05} = 1951 \text{ Вт/}^\circ\text{C},$$

де $\Pi_{\pi} = (\pi \cdot b_2 + 2h_{11} + b_1) \cdot 10^{-1} = (\pi \cdot 10,9 + 2 \cdot 27,75 + 18,2) \cdot 10^{-1} = 10,79 \text{ см}$ – периметр пазової ізоляції;

$\lambda_{\pi i} = 0,004186 \text{ Вт/см} \cdot ^\circ\text{C}$ – теплопровідність пазової ізоляції;

$$\Lambda_{\pi j} = \Lambda_{\pi} b_1 \frac{10^{-1}}{\Pi_{\pi}} = 1951 \cdot 18,2 \frac{10^{-1}}{10,79} = 329,1 \text{ Вт/}^\circ\text{C};$$

$$\Lambda_{\pi z2} = \Lambda_{\pi} h_{\pi} \frac{10^{-1}}{\Pi_{\pi}} = 1951 \cdot 3,35 \frac{10^{-1}}{10,79} = 605,7 \text{ Вт/}^\circ\text{C};$$

$\Lambda_{\pi z1} = \Lambda_{\pi} - \Lambda_{\pi j} - \Lambda_{\pi z2} = 1951 - 329,1 - 605,7 = 1016,2 \text{ Вт/}^\circ\text{C}$ термічна провідність відносних ділянок.

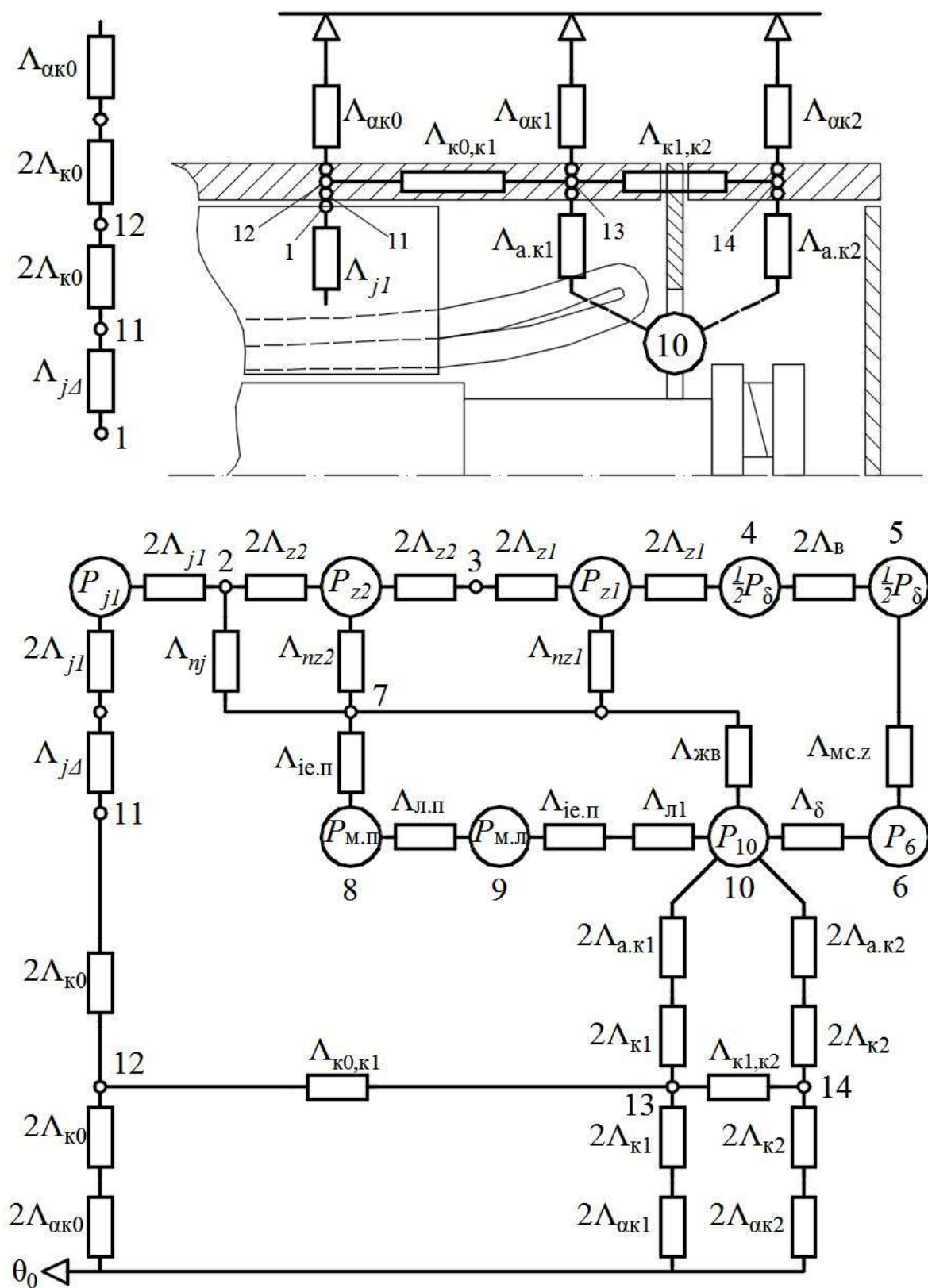


Рис.2.8. Уточнена еквівалентна теплова схема стаціонарного нагріву заглибного двигуна без примусової циркуляції охолоджуючої води

2.12.4 Еквівалентна термічна провідність пазової частини обмотки статора

$$\Lambda_{ie.п} = \frac{z_1 \Pi_1 l}{0,2 \frac{b_{п1} - 2\Delta_{i3}}{d_{i3} \cdot 10^{-1}} \left(\frac{\Delta}{\lambda_{i3}} + \frac{\Delta'}{\lambda_e} \right)} = \frac{24 \cdot 73,7 \cdot 90 \cdot 10^{-1}}{0,2 \frac{1,46 - 2 \cdot 0,05}{5,95 \cdot 10^{-1}} \left(\frac{0,0925}{0,00162} + \frac{0,094}{0,0317} \right)} = 575 \text{ Вт/}^\circ\text{C},$$

де $\Pi_1 = b_1 + 2(h_{п1} - 0,5b_2) = 18,2 + 2(33,2 - 0,5 \cdot 10,9) = 73,7 \text{ мм}$ – периметр пазової ізоляції,

$\Delta = 0,5 \cdot (d_{i3} - d_{пр}) \cdot 10^{-1} = 0,5 \cdot (5,95 - 4,05) \cdot 10^{-1} = 0,0925 \text{ см}$ – товщина ізоляції проводу;

$$\Delta' = \frac{d_{i3}}{2} \cdot \frac{\frac{\pi}{6} - \sin \frac{\pi}{6}}{\frac{\pi}{6}} + \frac{\delta_0}{2} = \frac{5,95}{2} \cdot \frac{\frac{\pi}{6} - \sin \frac{\pi}{6}}{\frac{\pi}{6}} + \frac{1,61}{2} = 0,94 \text{ мм};$$

$$\delta_0 = d_{i3} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{k_{зп}}} - 1 \right) = 5,95 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{0,617}} - 1 \right) = 1,61 \text{ мм};$$

$\lambda_{i3} = 0,00162 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}$ – теплопровідність ізоляції обмотки статора по табл. П - 4 [9];

$\lambda_e = \varepsilon_K \lambda_{жв} = 4,9 \cdot 0,00647 = 0,0317 \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}$ – еквівалентна теплопровідність охолоджуючої води [9].

2.12.5. Еквівалентна термічна провідність пучка лобовій частині обмотки статора

$$\lambda_{ie.п} = \lambda_{ie.п} \frac{l_{л1}}{l} = 575 \frac{39,26}{90} = 251 \text{ Вт/}^\circ\text{C}$$

2.12.6. Термічна провідність від пакета осердя статора до води всередині двигуна

$$\begin{aligned} \Lambda_{жв} &= \frac{4(S'_{п} - u_{п} n_e S_{i3}) \cdot l \cdot 10^{-8} \cdot z_1 \cdot \alpha}{d_{i3} \cdot 10^{-3}} = \\ &= \frac{4(444,98 - 5 \cdot 2 \cdot 27,8) \cdot 90 \cdot 10^{-8} \cdot 24 \cdot 1000}{5,95 \cdot 10^{-3}} = 2445 \text{ Вт/}^\circ\text{C}, \end{aligned}$$

де

$$S'_{п} = S_{п} - \Delta_{i3} \left(\pi b_2 + b_1 + 2 \left[\sqrt{\left(\frac{b_1 - b_2}{2} \right)^2 + h_{11}^2} \right] \right) =$$

$$= 450,4 - 0,05 \left(\pi \cdot 10,9 + 18,2 + 2 \left[\sqrt{\left(\frac{18,2 - 10,9}{2} \right)^2 + 27,75^2} \right] \right) = 444,98 \text{ мм}^2$$

– площа паза статора за винятком пазової ізоляції.

2.12.7. Параметри теплопередачі в зазорі між статором і ротором:

Число Тейлора для середнього радіусу повітряного зазору

$$T_a = \frac{(\delta \cdot 10^{-2})^3 r_{\delta, \text{cp}} \cdot 10^{-2} \cdot n_{\text{н}}^2}{v^2 \cdot 9,55} = \frac{(0,15 \cdot 10^{-2})^3 r_{\delta, \text{cp}} \cdot 10^{-2} \cdot 2922^2}{(66,3 \cdot 10^{-8})^2 \cdot 9,55} = 4,47 \cdot 10^7,$$

де $r_{\delta, \text{cp}} = 0,5(D - \delta) = 0,5 \cdot (12,6 - 0,15) = 6,22 \text{ см}$ – середній радіус повітряного зазору;

$v = 66,3 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$ – кінематична в'язкість води;

Число Нуссельта характеризує інтенсивність процесу конвективного обміну

$$Nu = 0,462 \cdot T_a^{0,241} Pr^{0,4} = 0,462 \cdot (4,47 \cdot 10^7)^{0,241} 4,34^{0,4} = 58;$$

де $Pr = 4,34$ Число Прандтля враховує вплив фізичних властивостей теплоносія на тепловіддачу;

Коефіцієнт теплопередачі

$$\alpha_{\delta} = \frac{Nu \cdot \lambda_{\text{в}}}{2\delta \cdot 10^{-2}} = \frac{58 \cdot 0,633}{2 \cdot 0,15 \cdot 10^{-2}} = 12238 \text{ Вт}/(\text{°C} \cdot \text{м}^2),$$

де $\lambda_{\text{в}} = 0,633 \text{ Вт}/\text{м} \cdot \text{°C}$ – теплопровідність води [9].

2.12.8. Конвективна складова термічної провідності зазору

$$\Lambda_{\delta} = \frac{\alpha_{\delta} \cdot \pi D_p l \cdot 10^{-4}}{2} = \frac{12238 \cdot \pi \cdot 12,3 \cdot 90 \cdot 10^{-4}}{2} = 2128 \text{ Вт}/\text{°C}.$$

2.12.9. Термічна провідність ротора (рис.2.X)

$$\begin{aligned} \Lambda_{\text{м2}} &= \frac{\lambda_{Fe} \cdot \pi (D_p - h_{\text{ш}} \cdot 10^{-1}) \cdot k_c \cdot l \cdot 10^{-4}}{h_{\text{ш}} \cdot 10^{-1}} = \\ &= \frac{0,373 \cdot \pi (12,3 - 0,3 \cdot 10^{-1}) \cdot 0,95 \cdot 90 \cdot 10^{-4}}{0,3 \cdot 10^{-1}} = 40977 \text{ Вт}/\text{°C}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Lambda_{\text{cz}} &= \frac{3 \cdot l \cdot z_2}{h_{\text{ш2}}} (\lambda_{Fe} k_c b_{z2} - b_{\text{p,cp}} \cdot \lambda_{\text{м2}}) = \\ &= \frac{3 \cdot 90 \cdot 22}{1,89} (0,373 \cdot 0,95 \cdot 0,78 - 0,675 \cdot 2,26) = 5663 \text{ Вт}/\text{°C}, \end{aligned}$$

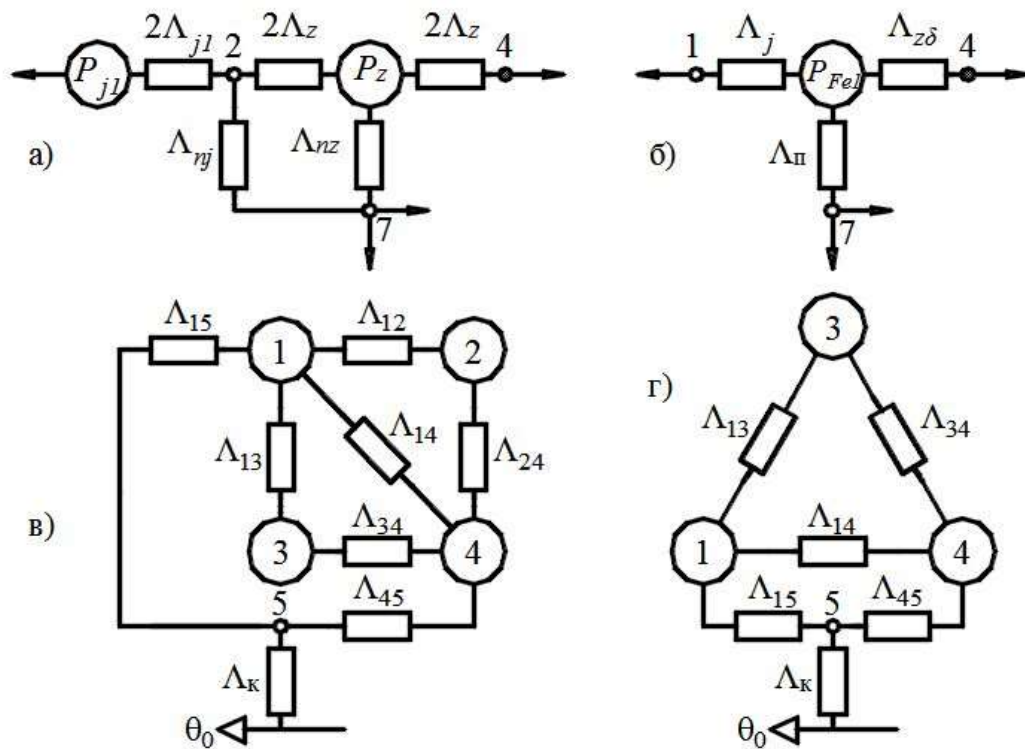
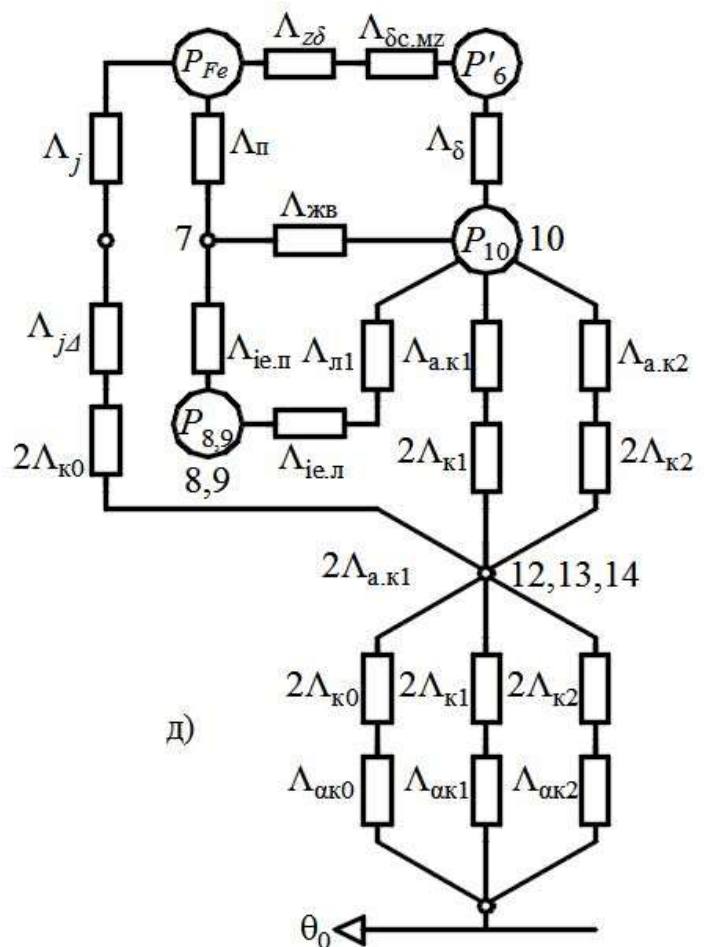


Рис.2.9.Спрощені

еквівалентні теплові схеми до розрахунку ротора (а, б) і на половину довжини (в, г, д) з боку напольгливої підшипника: 1 - осердя статора; 2 - обмотка ротора; 3 обмотка статора; 4 - вода всередині двигуна; 5 - корпус двигуна



де $\lambda_{m2} = 2,26 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$ – теплопровідність стрижня ротора [9];

$b_{p,cp} = 0,675$ см – середня ширина паза ротора;

$$\Lambda_{m.cz} = \frac{\Lambda_{cz} \cdot \Lambda_{m2}}{\Lambda_{cz} + \Lambda_{m2}} = \frac{5663 \cdot 40977}{5663 + 40977} = 4975 \text{ Вт/}^{\circ}\text{C};$$

де $D_{k2} = D_p - 2a_k = 12,3 - 2 \cdot 2,25 = 7,8$ см – менший діаметр короткозамкненого кільця;

$$\Lambda_{\delta k} = \frac{\lambda_{жв} \cdot \pi (D_p^2 - D_{k2}^2)}{2\delta_k} = \frac{0,00647 \cdot \pi (12,3^2 - 7,8^2)}{2 \cdot 0,005} = 183,8 \text{ Вт/}^{\circ}\text{C},$$

$$\Lambda_{\alpha\delta k} = 2\alpha_{\delta} \cdot \left[\frac{\pi}{4} (D_p^2 - D_{k2}^2) \cdot 10^{-4} + \pi \cdot D_p a_k \cdot 10^{-2} \right] =$$

$$= 2 \cdot 12238 \cdot \left[\frac{\pi}{4} (12,3^2 - 7,8^2) \cdot 10^{-4} + \pi \cdot 12,3 \cdot 22,5 \cdot 10^{-5} \right] = 386,7 \text{ Вт/}^{\circ}\text{C};$$

$$\Lambda_{6.10} = \frac{\Lambda_{\delta k} \cdot \Lambda_{\alpha\delta k}}{\Lambda_{\delta k} + \Lambda_{\alpha\delta k}} = \frac{183,8 \cdot 386,7}{183,8 + 386,7} = 124,6 \text{ Вт/}^{\circ}\text{C}.$$

2.12.10. Конвективна складова термічної провідності лобовій частині обмотки статора

$$\Lambda_{л1} = \frac{\pi \cdot d_{iz} \cdot 10^{-3} \cdot u_{п} \cdot n_e \cdot \alpha_{л1} (l_{cp1} - l) \cdot 10^{-2} z_1 \cdot k_{лп}}{2} =$$

$$= \frac{\pi \cdot 5,95 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 2 \cdot 2993 (129,3 - 90) \cdot 10^{-2} \cdot 24 \cdot 0,5}{2} = 1308 \text{ Вт/}^{\circ}\text{C},$$

де $\alpha_{л1} = 484(1 + 6,645v^{0,512}) = 484(1 + 6,645 \cdot 9,409^{0,512}) = 2993 \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C)}$ – коефіцієнт тепловіддачі лобовій частині обмотки статора [9];

$$v = \pi D_p \cdot 10^{-2} \frac{n_n}{60 \cdot 2} = \pi \cdot 12,3 \cdot 10^{-2} \frac{2922}{60 \cdot 2} = 9,409 \text{ м/с} – \text{окружна швидкість ротора.}$$

2.12.11. Термічна провідність від внутрішньої води до теплообмінних поверхнях корпусу в зоні лобових частин обмотки статора

$$\Lambda_{a.k1} = 2\pi D_c \cdot 10^{-2} \alpha_{a.k1} \cdot l_{ak1} = 2\pi \cdot 25,7 \cdot 10^{-2} 1986 \cdot 0,24 = 769,7 \text{ Вт/}^{\circ}\text{C},$$

де $\alpha_{a.k1} = 600(1 + 0,717v^{0,522}) = 600(1 + 0,7179,409^{0,522}) = 1986 \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C)}$ – коефіцієнт тепловіддачі корпусу в зоні лобових частин обмотки статора [9].

2.12.12. Термічна провідність від внутрішньої води до корпусу підп'ятника

$$\Lambda_{a.k2} = 2\pi D_{a.k2} \cdot \alpha_{a.k2} \cdot l_{ak2} = 2\pi \cdot 0,085 \cdot 5852 \cdot 0,21 = 3282 \text{ Вт/}^{\circ}\text{C},$$

де $\alpha_{a.k2} = 890(1 + 2,46v^{0,365}) = 890(1 + 2,46 \cdot 9,409^{0,365}) = 5852 \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C)}$ –

коефіцієнт тепловіддачі корпусу підп'ятника [9].

$D_{a.k2} = 85$ мм – діаметр корпусу підп'ятника;

2.12.13. Термічна провідність зазору між корпусом і пакетом статора

$$\Lambda_{j,\Delta} = \frac{\lambda_B}{\Delta_{j1}} \pi D_c \cdot l \cdot 10^{-4} = \frac{0,633}{0,0001} \pi \cdot 25,7 \cdot 90 \cdot 10^{-4} = 4600 \text{ Вт/}^\circ\text{C},$$

де $\Delta_{j1} = 0,0001$ м – зазор між корпусом і пакетом статора.

2.12.14. Термічна провідність стінок корпусу на різних ділянках

$$\Lambda_{k0} = \frac{\lambda_{k0}}{h_k} \pi D_{k.cp} \cdot l \cdot 10^{-4} = \frac{59}{0,008} \pi \cdot 26,5 \cdot 90 \cdot 10^{-4} = 5526 \text{ Вт/}^\circ\text{C},$$

де $\lambda_{k0} = 59$ Вт/(м·°C) – теплопровідність корпусу;

$D_{k.cp} = h_k + D_c \cdot 10^{-2} = 0,008 + 25,7 \cdot 10^{-2} = 0,265$ м – середній діаметр корпуса.

$$\Lambda_{k1} = \frac{\lambda_{k0}}{h_k} \pi D_{k.cp} \cdot l_{a.k1} \cdot 10^{-4} = \frac{59}{0,008} \pi \cdot 26,5 \cdot 24 \cdot 10^{-4} = 1474 \text{ Вт/}^\circ\text{C};$$

$$\Lambda_{k2} = \frac{\lambda_{k0}}{h_k} \pi d_{п.у} \cdot l_{a.k2} \cdot 10^{-4} = \frac{59}{0,008} \pi \cdot 13 \cdot 21 \cdot 10^{-4} = 632,5 \text{ Вт/}^\circ\text{C}.$$

2.12.15. Значеннями термічної провідності в аксіальному напрямку $\lambda_{k0.k1}$ і $\lambda_{k0.k1}$ (рис.2.) нехтуємо через їхню малу величину [9].

2.12.16. Термічна провідність від теплообмінних поверхонь корпусу до навколишнього воді:

$$\Lambda_{\alpha k0} = \alpha_{k0} \pi D_k \cdot l \cdot 10^{-5} = 850 \cdot \pi \cdot 273 \cdot 90 \cdot 10^{-5} = 656,1 \text{ Вт/}^\circ\text{C};$$

$$\Lambda_{\alpha k1} = \alpha_{k1} \pi D_k \cdot (l_{a.k1} + l_{a.k2}) \cdot 10^{-3} = 850 \cdot \pi \cdot 273 \cdot (0,24 + 0,21) \cdot 10^{-3} = 328,1 \text{ Вт/}^\circ\text{C};$$

$$\Lambda_{\alpha k2} = \alpha_{k2} \pi D_c \cdot l_{k2} \cdot 10^{-3} k_{пв} = 850 \cdot \pi \cdot 257 \cdot 0,099 \cdot 10^{-3} \cdot 2,07 = 140,6 \text{ Вт/}^\circ\text{C},$$

де $\alpha_{k0} = \alpha_{k1} = \alpha_{k2} = 850$ Вт/(м²·°C) – коефіцієнт тепловіддачі від теплообмінних поверхонь корпусу до навколишнього воді;

$k_{пв} = 2,07$ – коефіцієнт збільшення площі подп'ятника за рахунок оребрення.

2.12.17. Розподіл втрат в міді обмотки статора:

втрати в пазовій частині

$$P_8 = P_{m1} \frac{l}{l + l_{л1}} = 2719 \cdot \frac{90}{90 + 39,26} = 1893 \text{ Вт};$$

втрати в лобовій частині

$$P_9 = P_{m1} - P_8 = 2719 - 1893 = 826 \text{ Вт.}$$

2.12.18. Втрати в сталі статора

втрати в ярмі статора $P_{с.я} = 1767 \text{ Вт}$;

до втрат в зубцях статора віднесена половина додаткових втрат

$$P_{z1} = P_{с.з} \cdot 10^3 + 0,5 \cdot P_{дн} = 0,626 \cdot 10^3 + 0,5 \cdot 634,5 = 943,2 \text{ Вт.}$$

2.12.19. Механічні втрати $P_{мех} = 2270 \text{ Вт}$, в тому числі втрати на тертя пакета ротора про воду. Тоді

$$P_4 = P_5 = 0,5 \cdot (0,85 \cdot P_{тр}) = 0,5 \cdot (0,85 \cdot 1345) = 571,6 \text{ Вт.}$$

2.12.20. Втрати в вузлі 10 дорівнюють сумі втрат в підшипниках і половині втрат на тертя об воду торцевих поверхонь ротора

$$P_{10} = P_{п} + 0,5 \cdot (0,15 \cdot P_{тр}) = 925 + 0,5 \cdot (0,15 \cdot 1345) = 1026 \text{ Вт.}$$

2.12.21. Втрати в обмотки ротора $P_{m2} = 3429 \text{ Вт}$. Тоді

$$P_6 = P_{m2} + 0,5 \cdot (0,15 \cdot P_{тр} + P_{дн}) = 3429 + 0,5 \cdot (0,15 \cdot 1345 + 634,5) = 3847 \text{ Вт.}$$

2.12.22. Перевіримо сумарні втрати двигуна

$$\begin{aligned} P_{\Sigma} &= P_{m1} + P_6 + P_{10} + P_4 + P_5 + P_{z1} + P_{с.я} = \\ &= 2719 + 3847 + 1026 + 571,6 + 571,6 + 943,2 + 1767 = 11445 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

Отримане значення збігається зі значенням, отриманим в. п.2.7.13 з достатньою точністю.

2.12.23. Термічні провідності між окремими тілами еквівалентної теплової схеми:

$$\begin{aligned} \Lambda_K &= \frac{2\Lambda_{к0} \cdot \Lambda_{\alpha к0}}{2\Lambda_{к0} + \Lambda_{\alpha к0}} + \frac{2\Lambda_{к1} \cdot \Lambda_{\alpha к1}}{2\Lambda_{к1} + \Lambda_{\alpha к1}} + \frac{2\Lambda_{к2} \cdot \Lambda_{\alpha к2}}{2\Lambda_{к2} + \Lambda_{\alpha к2}} = \\ &= \frac{2 \cdot 5526 \cdot 656,1}{2 \cdot 5526 + 656,1} + \frac{2 \cdot 1474 \cdot 328,1}{2 \cdot 1474 + 328,1} + \frac{2 \cdot 632,5 \cdot 140,6}{2 \cdot 632,5 + 140,6} = 1041 \text{ Вт/}^\circ\text{C}; \end{aligned}$$

$$\Lambda_{13} = \frac{\Lambda_{п} \cdot \Lambda_{іє.п}}{\Lambda_{п} + \Lambda_{іє.п} + \Lambda_{жв}} = \frac{1951 \cdot 575}{1951 + 575 + 2445} = 225,7 \text{ Вт/}^\circ\text{C};$$

$$\Lambda_{14} = \frac{\Lambda_{п} \cdot \Lambda_{жв}}{\Lambda_{п} + \Lambda_{іє.п} + \Lambda_{жв}} = \frac{1951 \cdot 2445}{1951 + 575 + 2445} = 959,6 \text{ Вт/}^\circ\text{C};$$

$$\Lambda_{15} = \frac{1}{\frac{1}{\Lambda_{j1}} + \frac{1}{\Lambda_{j,\Delta}} + \frac{1}{2\Lambda_{\kappa 0}}} = \frac{1}{\frac{1}{704} + \frac{1}{4600} + \frac{1}{2 \cdot 5526}} = 578,6 \text{ Вт/}^{\circ}\text{C};$$

$$\Lambda_{34} = \frac{\Lambda_{\text{л1}} \cdot \Lambda_{\text{іе.л}}}{\Lambda_{\text{л1}} + \Lambda_{\text{іе.л}}} + \frac{\Lambda_{\text{іе.п}} \cdot \Lambda_{\text{жв}}}{\Lambda_{\text{п}} + \Lambda_{\text{іе.п}} + \Lambda_{\text{жв}}} = \frac{1308 \cdot 251}{1308 + 251} + \frac{575 \cdot 2445}{1951 + 575 + 2445} = 493,4 \text{ Вт/}^{\circ}\text{C};$$

$$\Lambda_{45} = \frac{2\Lambda_{\kappa 1} \cdot \Lambda_{\text{а.к1}}}{\Lambda_{\kappa 1} + \Lambda_{\text{а.к1}}} + \frac{2\Lambda_{\kappa 2} \cdot \Lambda_{\text{а.к2}}}{\Lambda_{\kappa 2} + \Lambda_{\text{а.к2}}} = \frac{2 \cdot 1474 \cdot 769,7}{2 \cdot 1474 + 769,7} + \frac{2 \cdot 632,5 \cdot 328,2}{2 \cdot 632,5 + 328,2} = 870,9 \text{ Вт/}^{\circ}\text{C}.$$

2.12.24. Елементи головної діагоналі матриці термічних провідностей:

$$\Lambda_{11} = \Lambda_{13} + \Lambda_{14} + \Lambda_{15} = 225,7 + 959,6 + 578,6 = 1763,9 \text{ Вт/}^{\circ}\text{C};$$

$$\Lambda_{33} = \Lambda_{13} + \Lambda_{34} = 225,7 + 493,4 = 719,1 \text{ Вт/}^{\circ}\text{C};$$

$$\Lambda_{44} = \Lambda_{14} + \Lambda_{34} + \Lambda_{45} = 959,6 + 493,4 + 870,9 = 2323,9 \text{ Вт/}^{\circ}\text{C}.$$

2.12.25. Коефіцієнти взаємовпливу

$$k_{31} = \frac{\Lambda_{14}\Lambda_{34} + \Lambda_{13}\Lambda_{44}}{\Lambda_{11} \cdot \Lambda_{44} - \Lambda_{14}^2} = \frac{959,6 \cdot 493,4 + 225,7 \cdot 2323,9}{1763,9 \cdot 2323,9 - 959,6^2} = 0,314;$$

$$k_{34} = \frac{\Lambda_{11}\Lambda_{34} + \Lambda_{13}\Lambda_{14}}{\Lambda_{11} \cdot \Lambda_{44} - \Lambda_{14}^2} = \frac{1763,9 \cdot 493,4 + 225,7 \cdot 959,6}{1763,9 \cdot 2323,9 - 959,6^2} = 0,357.$$

2.12.26. Еквівалентна термічна провідність тіла 3 до корпусу

$$\Lambda_3 = \Lambda_{33} - (k_{31}\Lambda_{13} + k_{34}\Lambda_{45}) = 719,1 - (0,314 \cdot 225,7 + 0,357 \cdot 870,9) = 479,5 \text{ Вт/}^{\circ}\text{C}.$$

2.12.27. Втрати тіл в еквівалентної схемі:

$$P_1 = P_c + 0,5 \cdot (0,15 \cdot P_{\text{тр}} + P_{\text{дн}}) = 2393 + 0,5 \cdot (0,15 \cdot 1345 + 634,5) = 3383 \text{ Вт};$$

$$P_3 = P_{\text{м1}} = 2719 \text{ Вт};$$

$$P_4 = P_{\text{м2}} + (P_{\text{мех}} - 0,5 \cdot P_{\text{тр}}) + 0,5 P_{\text{дн}} = 3429 + (2270 - 0,5 \cdot 1345) + 0,5 \cdot 634,5 = 5344 \text{ Вт};$$

$$P_{\Sigma\epsilon} = P_1 + P_3 + P_4 = 3383 + 2719 + 0,5 \cdot 5344 = 11445 \text{ Вт}.$$

2.12.28. Перевищення температури обмотки статора над температурою охолоджуючої води

$$\theta_3 = \frac{k_{31}P_1 + k_{34}P_4 + P_3}{\Lambda_3} + \frac{P_{\Sigma\epsilon}}{\Lambda_{\kappa}} = \frac{0,314 \cdot 3383 + 0,357 \cdot 5344 + 2719}{479,5} + \frac{11445}{1041} = 22,7 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Значення перевищення температури обмотки статора знаходиться в допустимих межах.

					141. 4301з. БР. ПЗ. РЗ				
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Автоматизована система керування насосною станцією водонапірної башти	Лім.	Лист	Листів	
Розроб.	Подиряко І.Г.								
Керівник	Александровський						63	7	
Консульт.						ННІАЕ НУК			
Н. контр.									
В.о зав. каф.	Обрубов А.В.								

3. АВТОМАТИЗОВАНА СХЕМА КЕРУВАННЯ НАСОСНОЮ СТАНЦІЄЮ ВОДОНАПІРНОЇ БАШТИ

Принцип роботи насосної станції: вода від джерела — це може бути свердловина, центральний водопровід та ін. — за допомогою заглибного насоса надходить у накопичувальну ємність, яка може монтуватися як на землі, так і під землею. Далі із цієї ємності насоси подають воду споживачам. За рівнем води у ємності стежить контролер за допомогою датчиків рівня. Також можливий варіант забору води насосами із водойми.

Основні вимоги до насосних станцій:

- забезпечення напору та подачі відповідно до графіка водопостачання або водовідведення для нормальних та аварійних режимів;
- мінімальні витрати на їх будівництво та експлуатацію;
- надійність (безперебійність роботи залежно від значущості об'єкта);
- необхідний термін експлуатації (залежно від важливості об'єкта);
- простота та зручність в експлуатації та обслуговуванні;
- широке застосування автоматики та телемеханіки;
- Можливість дистанційного управління;
- мінімізація архітектурних форм будівель та споруд;
- мінімізація впливу на довкілля в період будівництва та експлуатації станцій;
- Облік перспективного збільшення продуктивності станцій.

Автоматика насосних станцій повинна забезпечувати стабільний тиск, захист насоса від поломок (сухий хід, перевантаження) та автоматичне керування (ввімкнення/вимкнення) датчиками тиску або потоку

Основні вимоги до автоматики:

- Функціональність: автоматичне увімкнення насоса при падінні тиску (розбір води) та відключення при припиненні споживання.
- Захист «сухого ходу»: обов'язкова наявність датчика (поплавок, реле тиску/потоку), що відключає насос за відсутності води в джерелі для

					141. 4301з. БР. ПЗ. РЗ	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		64

запобігання перегріву.

- Гідравлічні налаштування: регулювання тиску включення повинно враховувати висоту водоспоживання, а різниця між тиском включення та вимкнення повинна становити не менше 0,8 бар.

- Захист електродвигуна: увімкнення термореле або автоматичних вимикачів для захисту від перевантажень струмом, коротких замикань та перегріву.

- Типи автоматики: застосування реле тиску з гідроаккумулятором чи контролерів потоку (електронних пресконтролів).

- Зворотний клапан: наявність обов'язкового зворотного клапана на всмоктувальній магістралі для утримання тиску.

Найбільш поширені в даний час насосні станції, що подають воду у водонапірні вежі Рожновського [11]. Приклад конструкції такої станції наведено на рис.3.1. Безпосередньо у свердловині 5 знаходяться електродвигун заглибній конструкції 1, насос 2 та датчик сухого ходу (на рис.3.1 не показаний). Датчик сухого ходу (поплавковий або електродний) встановлюється трохи вище рівня всмоктуючого патрубку насоса (або вище насоса) в свердловині. При падінні води нижче цього рівня датчик відключає живлення, запобігаючи роботі всуху, що запобігає перегріву двигуна. Двигун 1 підключений до системи автоматичного керування 12, яка знаходиться в приміщенні насосної станції 11, за допомогою кабелю 6, прикріпленого до водопідйомної труби хомутами 4. Там же встановлено манометр 8, що контролює тиск води. Для керування потоком води, обслуговування системи та захисту обладнання в насосній станції використовуються засувки 9 (запірна арматура - кульові крани або засувки). Вони дозволяють перекрити воду, щоб зняти насос або фільтр без зливу всієї системи, регулювати напір і запобігати зворотному струму рідини. У бак водонапірної башти 12 вода подається трубопроводом 10. Там же встановлені датчики рівня контролю рівня води 14, водозливна труба 13, призначена для аварійного скидання води при перевищенні рівня води вище встановленого. На самому верху водонапірної

					141. 4301з. БР. ПЗ. РЗ	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		65

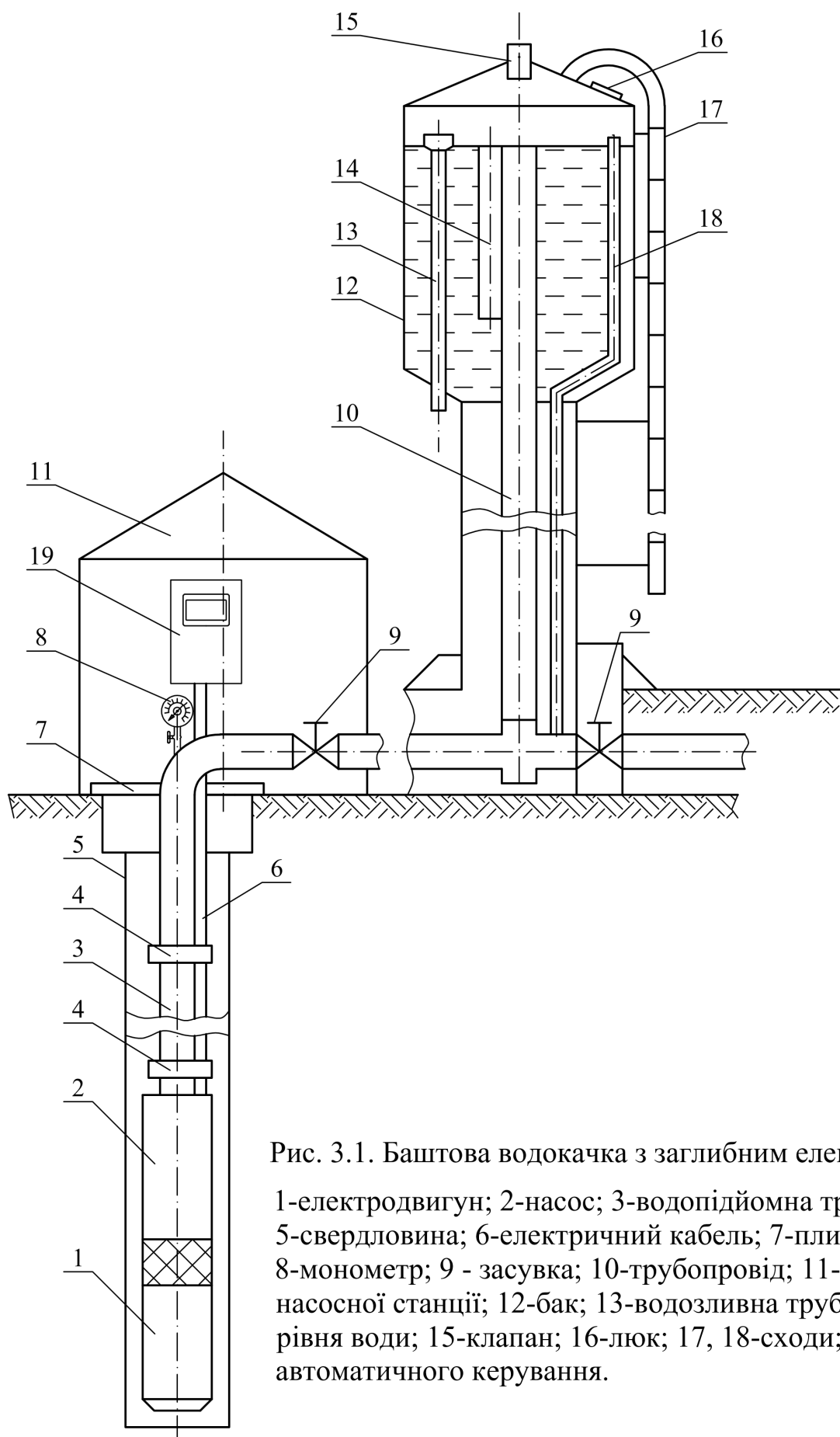


Рис. 3.1. Баштова водокачка з заглибним електродвигуном
 1-електродвигун; 2-насос; 3-водопідйомна труба; 4-хомут;
 5-свердловина; 6-електричний кабель; 7-плита;
 8-монітор; 9 - засувка; 10-трубопровід; 11-приміщення
 насосної станції; 12-бак; 13-водозливна труба; 14-датчик
 рівня води; 15-кран; 16-люк; 17, 18-сходи; 19-система
 автоматичного керування.

Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

141. 4301з. БР. ПЗ. РЗ

Лист

66

башти розташований клапан 15 (зазвичай повітряний або переливний) потрібен регулювання тиску повітря всередині бака 12. Він дозволяє повітря виходити, коли бак наповнюється водою, і заходити, коли вода витрачається, запобігаючи вакууму, який може деформувати або зруйнувати конструкцію.

На рис. 3.2 наведено схему автоматизації управління заглибним насосом за рівнем води в баку водонапірної башти, яка реалізована на релейно-контактних елементах [12].

Схема має два режими роботи: ручний "Р" та автоматичний "А". Режим задається перемикачем *SA1*. У ручному режимі запуск насоса здійснюється за стандартною схемою натисканням кнопки *SB1* "Пуск". Причому включення насоса в будь-якому режимі можливе лише в тому випадку, якщо замкнутий ланцюг датчика «сухого ходу» ДСХ (*SL3*), що контролює рівень води в свердловині і, таким чином, замкнений контакт *KV2.1* реле *KV2* в ланцюзі живлення котушки магнітного пускача *KM1*. При цьому замикаються силові контакти *KM1.1* магнітного пускача *KM1* і блок-контакт *KM1.4*, що забезпечує подачу напруги на котушку *KM1* при відпусканні кнопки *SB1* "Пуск", загоряється лампочка *HL2* "Насос включений". Вимкнення насоса в ручному режимі здійснюється кнопкою *SB2* "Стоп". При цьому загоряється лампочка *HL1* "Насос вимкнений" і гасне лампочка *HL2* "Насос увімкнений".

При встановленні перемикача *SA1* в положення «А» та включенні автоматичного вимикача *QF* подається напруга на електричну схему керування. Якщо рівень води в напірному баку знаходиться нижче електрода нижнього рівня датчика ДР, то контакти *SL1* і *SL2* у схемі розімкнені, реле *KV1* знеструмлено і його контакти *KV1.1* в ланцюзі котушки магнітного пускача *KM1* замкнуті. У цьому випадку магнітний пускач увімкне електродвигун насоса, одночасно згасне сигнальна лампа *HL1* і загориться лампа *HL2*. Насос подаватиме воду в напірний бак.

Коли вода заповнить простір між електродом нижнього рівня *SL2* і корпусом датчика ДР, підключеним до нульового дроту, ланцюг *SL2*

замкнеться, але реле *KV1* не ввімкнеться, оскільки його контакти *KV1.2*, послідовно включені з *SL2*, розімкнені.

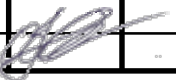
Коли вода досягне електрода верхнього рівня, ланцюг *SL1* замкнеться, реле *KV1* включиться і, розімкнувши свої контакти *KV1.1* в ланцюзі котушки магнітного пускача *КМ*, відключить останній, а замкнувши контакти , що замикають *KV1.2*, стане на саможивлення через ланцюг датчика *SL2*. Електродвигун *AD* насоса відключиться, згасне сигнальна лампа *HL2* і загориться лампа *HL1*. Повторне включення електродвигуна насоса відбудеться при зниженні рівня води до положення, коли розімкнеться ланцюг *SL2* і реле *KV1* буде відключено.

Основним недоліком управління за рівнем є схильність до зледеніння електродів датчиків рівня ДР в зимовий час, через що насос не вимикається і відбувається переливання води з бака. Бувають випадки руйнування водонапірних башт із-за намерзання великої маси льоду з їхньої поверхні. Для усунення цього недоліку в схемі встановлений нагрівач *ЕК*, що підключається до напруги силовими контактами *КМ2.1* магнітного пускача *КМ2*, який у свою чергу керується терморегулятором *АТ*, сигнал управління на який подається датчик температури *ВТ*.

Крім того, у схемі передбачена індикація наявності *HL5* та відсутності *HL 4* "сухого ходу" та рівня води вище за нижню межу *HL3*.

Для захисту від перевантаження, короткого замикання, неприпустимого (аварійного) зниження напруги в схемі встановлено автоматичний вимикач *QF*. Теплове реле *КК1* захищає двигун *AD* насоса від перегріву у разі перевантаження.

					141. 4301з. БР. ПЗ. РЗ	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		69

					141. 4301з. БР. ПЗ. Р4			
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Охорона праці	Лім.	Лист	Листів
Розроб.	Подиряко І Г.							
Керівник	Александровський						70	10
Консульт.						ННІАЕ НУК		
Н. контр.								
В.о. зав. каф.	Обрубов А.В.							

4. ОХОРОНА ПРАЦІ

Вступ

Охорона праці – система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів і засобів, спрямованих на збереження здоров'я і працездатності людини під час роботи.

Основні положення охорони праці записані в загальних і соціальних правилах по техніці безпеки і виробничій санітарії, що регламентують проектування, пристрій і зміст виробничих і допоміжних приміщень, огороження машин, механізмів, належний стан вентиляції і висвітлення. Усі вимоги безпеки праці, що пред'являються до виробничої сфери, устаткуванню, а також до працюючого, повинні неухильно дотримуватися.

У поняття охорони праці входять:

- трудове законодавство;
- техніка безпеки – система організаційних і технічних заходів і засобів, що запобігають вплив на робочих небезпечних виробничих факторів;
- виробнича санітарія – система організаційних, гігієнічних і санітарно-технічних заходів і засобів, що запобігають на працюючих вплив шкідливих виробничих факторів.

4.1. Аналіз небезпечних і шкідливих факторів, характерних при роботі з двигуном

У даному дипломній роботі спроектований заглибний асинхронний двигун, що має наступні параметри:

Номінальна потужність $P_{\text{ном}} = 125 \text{ кВт};$

Номінальна напруга $U_{\text{н}} = 660 \text{ В}.$

					141. 43013. БР. ПЗ. Р4	Лист
						71
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Асинхронні двигуни є джерелами небезпеки. Тому їхнє технічне обслуговування й експлуатація вимагають обов'язкового виконання цілого комплексу заходів щодо охорони праці, що передбачені правилами техніки безпеки. Вони спрямовані на загальне оздоровлення праці, підвищення його ефективності (якості і продуктивності) і попередження виробничого травматизму.

Експлуатація і технічне обслуговування електроагрегатів з безконтактний двигунами постійного струму, здійснюються відповідно до правил і інструкцій з їх технічної експлуатації, а також із правилами устрою електроустановок (ПУЕ) .

Щоб уникнути нещасних випадків при роботі з електроагрегатами загальні положення цих документів забороняють:

1. Допускати до самостійної роботи на електроагрегатах осіб, що не досягли 18 років, а також осіб, що не мають посвідчення на право управління електроагрегатами;
2. Робити ремонтні операції на працюючому двигуні чи усувати які-небудь, навіть самі дрібні, несправності;
3. Залишати працюючий двигун без нагляду.

4.1.1. Шум і вібрація

Шум – сукупність звуків різної інтенсивності і частоти, що безладно змінюються в часі і викликають у працюючих неприємні суб'єктивні відчуття.

Припустимий рівень звукового тиску відповідно до ДОСТ12.1.003-86 – 80дБ. При 4...5 годинному впливі шуму з рівнем більш 85дБ крім змін в органі слуху настають порушення нервово-психічної діяльності, наслідком чого є зниження працездатності.

Поріг болючого відчуття – 120..130дБ. При 140дБ відбувається розрив барабанної перетинки [10].

Діапазон допустимих шумів, що рекомендується, усередині приміщень:

- для сну і відпочинку 30...40дБ;

					141. 4301з. БР. ПЗ. Р4	Лист
						72
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

- для розумової праці 45...55дБ;
- для виробничих цехів 56...70дБ.

У результаті тривалого впливу шуму в працюючого може виникнути шумова хвороба, що приводить до втрати слуху.

4.1.2. Електромагнітне випромінювання

Електромагнітні поля виникають при використанні електротермічних установок індукційного і діелектричного нагрівання. Вплив електромагнітного поля на людину залежить від напруг електричних і магнітних полів, частоти коливань, розміру поверхні, що опромінюється, і індивідуальних особливостей організму.

Дія електромагнітного поля на людину виявляється в орієнтації молекул по напрямку електромагнітного поля і нагріванні тканин за рахунок перемінної поляризації діелектрика і появи струмів провідності.

Перегрів особливо шкідливий для тканин із слаборозвиненою судинною або системою з великим змістом рідини (очі, мозок, шлунок, нирки). Опромінення очей викликає помутніння кришталика (катаракту).

При впливі полів з характеристиками вище гранично припустимого рівня розвиваються порушення нервової, серцево-судинної систем, органів подиху, травлення і деяких біохімічних показників крові.

4.1.3. Поразка електричним струмом

Проходячи через людське тіло електричний струм робить термічну, електролітичну і біологічну дію.

Термічна дія виражається в опіках окремих частин тіла, нагріванні судин, нервів і інших тканин.

Електролітичний вплив виражається в розкладанні крові та інших органічних рідин, що викликає порушення їхнього фізико-хімічного складу.

Біологічний вплив виражається в подразненні і порушенні живих тканин організму, що супроводжується мимовільним судорожним скороченням м'язів.

Дія електричного струму приводить до електричних травм, що поділяються на два види:

1. Місцеві електричні травми:

- електричні опіки;
- електричні знаки;
- металізація шкіри;
- механічні ушкодження;
- електрофтальмія – запалення зовнішніх оболонок очей, у результаті впливу ультрафіолетових променів електричної дуги.

2. Електричні удари:

- скорочення м'язів без втрати свідомості;
- скорочення м'язів із втратою свідомості та дихання;
- утрата свідомості і порушення роботи серця;
- клінічна смерть.

Величина електричного струму є головною небезпечною величиною :

1. $I = 0,6..1,5$ мА, $f = 50$ Гц – відчутний граничний струм.
2. $I = 10..15$ мА, $f = 50$ Гц – граничний струм тримання – викликає хворобливі судороги м'язів рук і голосових зв'язувальних, які людина не може перебороти.
3. $I = 25..50$ мА, $f = 50$ Гц – дія струму поширюється на м'язи грудної клітки, що приводить до утруднення дихання або його припинення.
4. $I = 50..100$ мА, $f = 50$ Гц – струм фібриляції – впливає на м'язи серця. При тривалому протіканні від 1 до 3 секунд серце зупиняється [10].

Найбільш небезпечні частоти – до 100 Гц. Постійний струм у 4...5 разів безпечніше, чим перемінний на частоті 50 Гц і напрузі до 500В. При більшій напрузі постійний струм небезпечніше перемінного [10].

4.2. Розрахунок захисного заземлення заглибного двигуна

При експлуатації двигуна існує небезпека поразки електричним струмом при випадковому замиканні фазового проводу мережі на корпус. Для запобігання нещасного випадку корпуса електричних машин потрібно заземлювати.

Захисне заземлення – навмисне з'єднання з землею металевих частин устаткування, що не знаходяться під напругою в звичайних умовах, але можуть виявитися під напругою в результаті ушкодження ізоляції.

Призначення захисного заземлення – усунення небезпеки поразки людей електричним струмом з появою напруги на конструктивних частинах двигуна.

У правилах пристрою електричних установок ПУЕ-2017 (Україна) зазначено, що при напрузі нижче 1000 В опір пристрою, що заземлює, має бути не більш $R_z \leq 4$ Ом. Заземлення проектного заглибного асинхронного двигуна виконується зі сталевий оцинкованої труби діаметром 25 мм, довжиною 2 м. Розташовані заземлювачі вертикально по контуру на відстані один від одного, рівного довжині заземлювача 2 м. Їх верхні кінці знаходяться на глибині 0,7 м і з'єднані сталевий смугою шириною 40 мм.

Розрахуємо параметри заземлювача.

4.2.1. При проектуванні заземлюючих пристроїв необхідно в якості розрахункового брати найбільше можливе протягом року значення питомого опору ґрунту, тобто орієнтуватися на найгірший випадок. У зв'язку з цим в розрахунках питомий опір ґрунту приймається

$$\rho = \rho_r \cdot \psi = 60 \cdot 1,7 = 102 \text{ Ом}\cdot\text{м},$$

де $\rho_r = 60 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ – питомий опір ґрунту (в нашому випадку глини) при 10...20% вологості;

$\psi = 1,7$ – коефіцієнт сезонності; враховує можливе підвищення питомого опору протягом року [4].

4.2.2. Опір одного вертикального стрижневого заземлювача [4]:

					141. 43013. БР. ПЗ. Р4	Лист
						75
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

$$R_{\epsilon} = \frac{\rho}{2\pi l} \left[\ln\left(\frac{2l}{d}\right) + 0,5 \ln\left(\frac{4t+l}{4t-l}\right) \right] =$$

$$= \frac{102}{2\pi \cdot 2} \left[\ln\left(\frac{2 \cdot 2}{0,025}\right) + 0,5 \ln\left(\frac{4 \cdot 1,7 + 2}{4 \cdot 1,7 - 2}\right) \right] = 43,6 \text{ Ом},$$

де $l = 2 \text{ м}$ – довжина заземлювача;

$t = t_0 + 0,5 \cdot l = 0,7 + 0,5 \cdot 2 = 1,7 \text{ м}$ – відстань середньої точки електрода від поверхні землі (рис.4.1);

$t_0 = 0,7 \text{ м}$ – глибина, на якій знаходяться верхні кінці електродів;

$d = 25 \text{ мм}$ – діаметр електрода.

4.2.3. Число заземлювачів, попередньо беручи коефіцієнт використання заземлювача $\eta' = 1$:

$$n' = \frac{R_{\text{в}}}{\eta' \cdot R_3} = \frac{43,6}{1 \cdot 4} = 10,9.$$

Приймається $n = 11$. Уточнений коефіцієнт використання $\eta_{\text{в}} = 0,46$ при розміщенні заземлювачів по контуру (табл.22.[4]). Перерахуємо

$$n = \frac{R_{\text{в}}}{\eta_{\text{в}} \cdot R_3} = \frac{43,6}{0,46 \cdot 4} = 23,7. \text{ Приймаємо } n = 24.$$

4.2.4. Фактичний опір групи вертикальних заземлювачів

$$R_{\text{в.гр}} = \frac{R_{\text{в}}}{n \cdot \eta_{\text{в}}} = \frac{43,6}{24 \cdot 0,46} = 3,95 \text{ Ом}.$$

Для зв'язку вертикальних електродів, використовується сталеві сполучна смуга.

4.2.5. Опір смугового горизонтального заземлювача:

$$R_{\text{г}} = \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln\left(\frac{2L^2}{b \cdot t_0}\right) \right] = \frac{102}{2\pi \cdot 50,4} \left[\ln\left(\frac{2 \cdot 50,4^2}{0,04 \cdot 0,7}\right) \right] = 3,9 \text{ Ом},$$

де: $L = 1,05 \cdot a \cdot n = 1,05 \cdot 2 \cdot 24 = 50,4 \text{ м}$ – довжина сталеві сполучної смуги;

$a = 2 \text{ м}$ – відстань між електродами.

4.2.6. Опір розтікання струму знаходиться з урахуванням коефіцієнта

					141. 4301з. БР. ПЗ. Р4	Лист
						76
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

використання смуги (табл.1.23 [4]) $\eta_r = 0,27$:

$$R_r = \frac{R'_r}{\eta_r} = \frac{3,9}{0,27} = 14,4 \text{ Ом.}$$

4.2.7. Визначимо загальний опір заземлення пристрою заземлення:

$$R_{3.гр} = \frac{R_r \cdot R_{в.гр}}{R_r + R_{в.гр}} = \frac{14,4 \cdot 3,95}{14,4 + 3,95} = 3,1 \text{ Ом.}$$

Опір $R_{3.гр} = 3,1 \text{ Ом}$. Отже, $R_{3.гр} < R_3 = 4 \text{ Ом}$, що відповідає нормованому значенню.

4.3. Розробка заходів щодо забезпечення безпеки під час експлуатації та обслуговування обладнання

4.3.1. Протипожежні заходи

Технічне обслуговування й експлуатація електричного агрегату зв'язано з ризиком виникнення пожежі. Щоб не допустити цього, варто строго дотримувати наступні основні вимоги (правила) протипожежної безпеки:

1. Якщо електроагрегат встановлений і експлуатується в приміщенні, то воно повинно бути не нижче 4 ступеня вогнестійкості; спеціально обладнано; розташоване не ближче 10 м від житлових, виробничих і адміністративних будинків. У противному випадку агрегат повинний бути розміщений на відкритій площадці, чи під навісом у спеціально підготовленому укритті.
2. Приміщення, у якому встановлений діючий агрегат, повинне бути обладнано витяжною вентиляцією і засобами пожежегасіння (пінними вогнегасниками шухлядами з піском, лопатами, відрами, багром).
3. Місце установки агрегату необхідно звільнити від сторонніх предметів, не зв'язаних з його обслуговуванням та експлуатацією, і утримувати його в чистоті; не розливати поблизу його легкозаймисті

					141. 4301з. БР. ПЗ. Р4	Лист
						77
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

рідини.

При виникненні пожежі користатися тільки вуглекислотними вогнегасниками.

4.3.2. Міри електробезпеки

У процесі технічного обслуговування та експлуатації агрегатів поряд з можливістю виникнення пожеж велику небезпеку для життя і здоров'я обслуговуючого персоналу та інших людей представляє поразка електричним струмом. Небезпека поразки виникає внаслідок того, що на агрегат (у нашому випадку – двигун) впливають зовнішні фактори: температура, вологість, вібрації та ін.

Як правило, поразка електричним струмом відбувається в результаті:

- необережного дотику до неізольованих струмоведучих частин агрегату (затискач, клеми, контакти);
- необережного дотику до ушкоджених проводів і кабелю живильної мережі двигуна;
- дотику до частин двигуна, що нормально не знаходиться під напругою (наприклад, корпус двигуна), але що виявляється під напругою внаслідок ушкодження ізоляції;
- перебування поблизу місця з'єднання з землею ушкоджених проводів і кабелів живильної мережі двигуна.

Для того щоб виключити можливість поразки електричним струмом при обслуговуванні двигуна, розроблений цілий комплекс мір і правил техніки електробезпеки, що вимагають:

1. не допускати до обслуговування двигуна непідготовлений персонал;
2. не порушувати інструкцій з техніки електробезпеки і правил експлуатації двигуна.

У відповідності з другим положенням **забороняється:**

1. експлуатувати незаземлений двигун;
2. доторкатися до струмоведучих частин двигуна під час його роботи;

					141. 4301з. БР. ПЗ. Р4	Лист
						78
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

3. усувати несправність на працюючому двигуні;
4. працювати під напругою без застосування засобів індивідуального захисту й електроінструментів, без рукояток з ізольованим покриттям.

Небезпека поразки струмом з'являється унаслідок виникнення аварійних режимів роботи, що можуть бути викликані порушенням нормального стану електроізоляції двигуна чи корпусу землі.

Тому в процесі технічного обслуговування й експлуатації агрегату потрібно систематично перевіряти стан ізоляції і проводів за допомогою омметра. Експлуатувати двигун з якими-небудь несправностями в його електричній частині категорично забороняється.

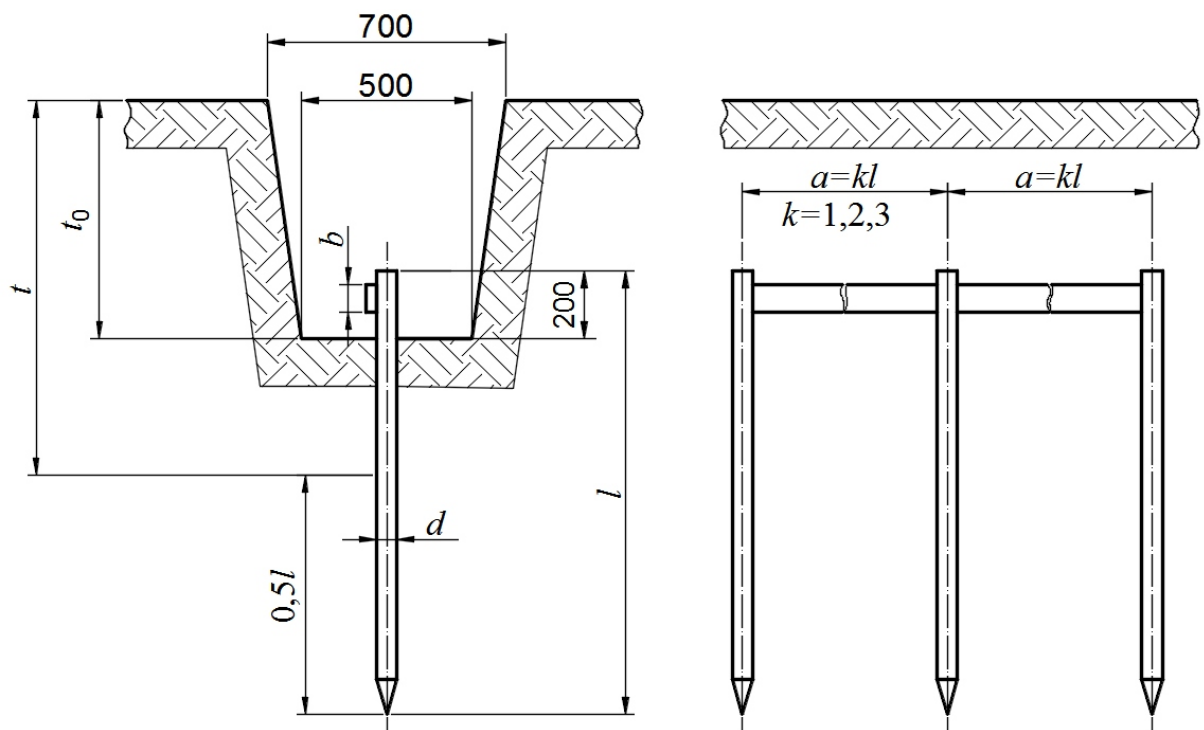


Рис. 4.1. Схема заземлення

Висновок

По отриманим даним, опір заземлення не перевищує 4 Ом, що задовольняє правилам ПУЕ-2017 і розрахована система заземлення забезпечує усунення небезпеки поразки людей електричним струмом, що підвищує безпеку при експлуатації заглибного асинхронного двигуна.

ВИСНОВКИ З ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ

У даному дипломній роботі на підставі проведеного аналізу умов роботи і пов'язаних з ними особливостей конструкції і розрахунків був спроектований заглибний асинхронний двигун, який має наступні технічні характеристики:

Номинальна потужність $P_{\text{ном}}$, кВт	125.
Фазна і лінійна напруги $U_{\text{ф}} / U_{\text{л}}$, В	380/660.
Коефіцієнт потужності $\cos(\varphi)$	0.885.
ККД, %	91,9.
Кратність пускового моменту	1,39.
Кратність пускового струму	6,56.

Слід зазначити, що технічні характеристики спроектованого заглибного асинхронного двигуна близькі за своїми значеннями до аналогічних промислових зразків.

В даний час інтенсивний розвиток промисловості, сільського господарства, транспорту, зростання населення, підвищення його життєвого рівня та поліпшення побутових умов веде до досить різкого збільшення споживання води. У рішенні проблеми покриття дефіциту водного балансу підйом підземних вод за допомогою електронасосів є найбільш ефективним і економічним.

Розроблений заглибний асинхронний двигун, що працює в якості приводу свердловинні насоса системи водопостачання підприємства дозволяє підвищити надійність і безпеку, знизити вагогабаритні показники двигуна і насосного агрегату в цілому, а також максимально автоматизувати процес керування.

Розроблена автоматизована система керування насосної станцією водонапірної башти, що відповідає всім вимогам, що пред'являються як до самих насосних станцій, так і до систем керування.

					141. 4301з. БР. ПЗ. Д			
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Додатки	Лім.	Лист	Листів
Розроб.	Подиряко І.Г.						81	3
Керівник	Александровський							
Консульт.								
Н. контр.								
В.о зав. каф.	Обрубов А.В.					ННІАЕ НУК		

Додаток А

Крива намагнічування двигуна

Таблиця А.1. Крива намагнічування двигуна

Φ	Вб	0	0,0242	0,0484	0,0727	0,086	0,0969
F_{2p}	А	0	537	1061	1628	2305	3839

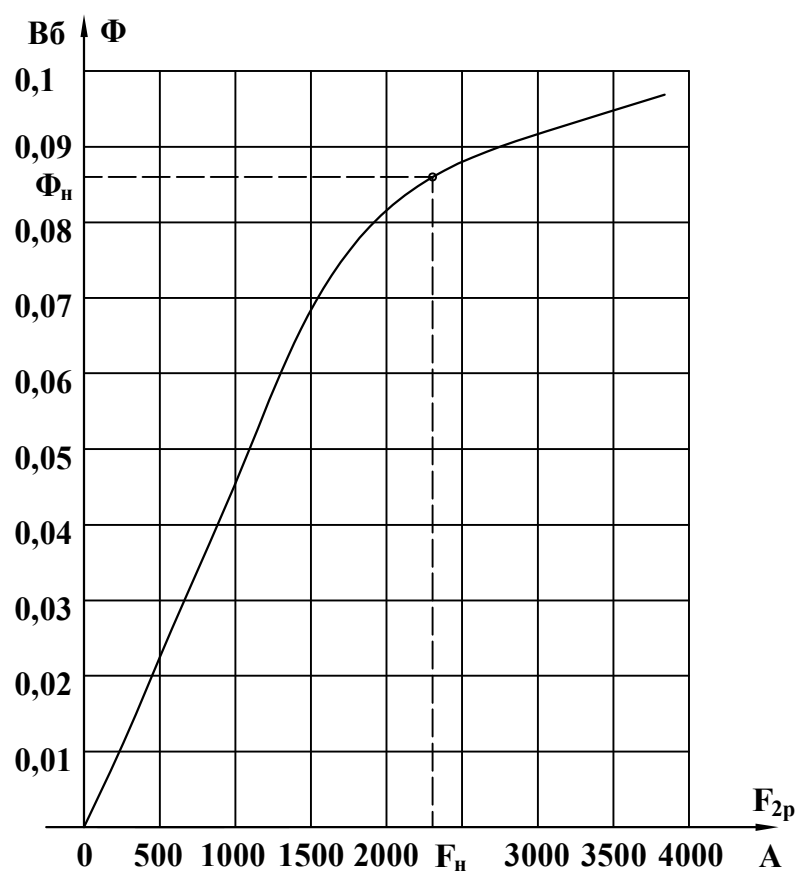


Рис.А1. Крива намагнічування двигуна $\Phi=f(F_{2p})$

Додаток Б

Таблиця Б1. Умовні позначення

ФОРМАТ	ЗОНА	ПОЗ	ПОЗНАЧЕННЯ	НАЙМЕНУВАННЯ	КІЛ-СТЬ	ПРИМІТКА
		1		Кришка транспортувальна	1	
		2		Шпилька М10	14	
		3		Гайка М10	14	
		4		Шайба пружинна	14	
		5		Кільце ущільнювальне	2	
		6		Кільце упорне	1	
		7		Щит підшипниковий	1	
		8		Обмотка статора	1	
		9		Кільце обмежувальне	2	
		10		Кільце балансувальне	2	
		11		Вал	1	
		12		Пакет ротора	1	
		13		Пакет статора	1	
		14		Кільце стопорне	2	
		15		Втулка підшипникова	3	
		16		Підшипник направляючий	3	
		17		Корпус двигуна	1	
		18		П'ята	1	
		19		Підп'ятник	1	
		20		Упор сферичний	1	
		21		Корпус підп'ятника	1	
		22		Діафрагма	1	
		23		Днище	1	

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Белорусов Н.И. Электрические кабели, провода и шнуры [справочник] / Н.И. Белорусов, А.Е. Саакян, А.И. Яковлева. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 536с.
2. Гольдберг О. Д., Проектирование электрических машин / О.Д. Гольдберг, Я. С. Гурин, И. С. Свириденко. – М.: Высшая школа, 1984. — 431с.
3. Гончар В.Ф. Електрообладнання і автоматизація сільськогосподарських агрегатів і установок/ В.Ф. Гончар. – К.:Вища школа, 1985. –207с.
4. Долин П.А., Справочник по технике безопасности/ Долин П.А. –М.: Энергоатомиздат, 1984. . – 824с.
5. Михеев А.М. Основы теплопередачи / А.М. Михеев, И.М. Михеева. – Л.:Энергия, 1970. – 342с.
6. Проектирование электрических машин / [Ф.А. Горяинов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин]; Под ред. И.П. Копылова.– М.:Энергия, 1980. – 497с.
7. Сергеев П.С. Проектирование электрических машин Изд. 3-е / П.С. Сергеев, Н.В. Виноградов, Ф.А. Горяинов. – М.:Энергия, 1970. – 632с.
8. Справочник по электрическим машинам в 2х т. / [под ред. И.П. Копылова, Б.К. Ключкова].– М.:Энергоатомиздат, Т.2. – 1989.– 688 с.
9. Счастливый Г.Г. Погружные асинхронные электродвигатели / Г.Г. Счастливый, В.Г. Семак, Г.М. Федоренко. – М.: Энергоатомиздат, 1983.–168 с.
10. Кузьменко В.К. Охрана труда в судостроении / В.К. Кузьменко, С.П. Авениров, В.А. Козлов. – Л.: Судостроение, 1975.–346с.
11. <https://electricalschool.info/main/electroshemy/741-avtomatizacija-nasosov-i-nasosnykh.html>.
12. <https://sbk.ltd.ua/ru/stati/33-avtomaticheskoe-upravlenie-nasosom-vodonapornoj-bashni.html>.