

**СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

Інститут, факультет інженерії
(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра електричної інженерії
(повна назва кафедри)

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до дипломного проекту (роботи)
освітньо-кваліфікаційного рівня спеціаліст
(бакалавр, спеціаліст, магістр)

напряму підготовки 050702 «Електромеханіка»
(шифр і назва напряму підготовки)

спеціальності 7.05070201 «Електричні машини і апарати»
(шифр і назва спеціальності)

на тему Асинхронний двигун приводу відцентрового насосу

Виконав: студент групи ЕМА-16дс

Коростельова В.Б.
(прізвище, та ініціали) (підпис)

Керівник Шведчикова І.О.
(прізвище та ініціали) (підпис)

Завідувач кафедри Жидков А.Б.
(прізвище та ініціали) (підпис)

Рецензент: Романченко О.В.
(прізвище та ініціали)

імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Інститут, факультет інженерії

Кафедра електричної інженерії

Освітньо-кваліфікаційний рівень спеціаліст

(бакалавр, спеціаліст, магістр)

Напрямок підготовки 050702 «Електромеханіка»

(шифр і назва)

Спеціальність 7.05070201 «Електричні машини і апарати»

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Жидков А.Б.
“ ___ ” _____ 20__ року

З А В Д А Н Н Я НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТУ

Коростельова Вікторія Борисівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Асинхронний двигун приводу відцентрового насосу

Спец. завдання: розрахувати та спроектувати електродвигун з покращеними експлуатаційними показниками

Керівник проекту Шведчикова Ірина Олексіївна, д.т.н., проф.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “ ___ ” _____ 2017 року

№ _____

2. Строк подання студентом проекту (роботи) _____

3. Вихідні дані до проекту (роботи):

Номинальна частота мережі..... **50** Гц.

<u>Напруга фазна ...</u>	380	В.
<u>Синхронна частота обертання.....</u>	1500	об/хв.

Потужність двигуна $P_{ном}=1,0\text{кВт}$, виконання IP – 44, режим роботи-тривалий S1.

4.Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити Вступ. 1. Огляд конструкцій та технічне обґрунтування теми проекту. 2. Технічне завдання на розробку двигуна. 3. Електромагнітний розрахунок двигуна. 4. Тепловий розрахунок двигуна. 5. Розрахунок вала двигуна. 6. Система управління електроприводом. 7. Розрахунок техніко-економічних параметрів пристрою. Висновки.

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

1. Складальне креслення двигуна (2хА1). 2. Деталювання двигуна (1хА1). 3. Характеристики двигуна (2хА2). 4. Плакат по економічному розрахунку (1хА1).

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить 117 стор., 19 рис., 15 табл., 13 бібл. найм.

ВІДЦЕНТРОВИЙ НАСОС, ЕЛЕКТРОДВИГУН АСИНХРОННИЙ, КОРОТКО-ЗАМКНЕНИЙ РОТОР, МАГНІТНИЙ ЛАНЦЮГ, РОБОЧІ ТА ПУСКОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ТЕПЛОВИЙ І ВЕНТИЛЯЦІЙНИЙ РОЗРАХУНКИ, МЕХАНІЧНИЙ РОЗРАХУНОК ВАЛА, СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ, ЕЛЕКТОПРИВОД

Розроблено електродвигун трифазний с короткозамкненим ротором для приводу відцентрового насосу. Наведено розрахунок магнітного ланцюга для номінального режиму і визначені основні розміри електродвигуна. Побудовані робочі і пускові характеристики двигуна при живленні від трифазної мережі. Виконано тепловий та вентиляційний розрахунки. Приведена система управління електроприводом. Розраховані техніко-економічні показники електродвигуна насосу.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ПД 201.000.000.ПЗ			
Розроб.		Коростельова			Асинхронний двигун приводу відцентрового насосу		Аркуш	Аркушів
Перевір.		Шведчикова						
Реценз.								
Н. контр.								
Затверд.		Жидков						
						ОНУ ім. В. Даля, гр. ЕМА-16дс		

ЗМІСТ

ВСТУП.....		6
1. ОГЛЯД КОНСТРУКЦІЙ ТА ТЕХНІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ТЕМИ ПРОЕК-		8
1.1. ТУ.....	Різнов	8
1.2. иди насосних установок та їх характеристики.....		16
1.3. Аналіз насосних установок з асинхронними двигунами.....		26
Особливості конструкції двигуна, що проектується.....		
2. ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ НА РОЗРОБКУ ДВИГУНА.....		28
3. ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ РОЗРАХУНОК.....		30
3.1. Вибір головних розмірів.....		30
3.2. Визначення числа пазів, витків і перетину проводу обмотки статора.....		32
3.3. Розрахунок розмірів зубцової зони статора.....		35
3.4. Розрахунок ротора.....		39
3.5. Розрахунок струму, що намагнічує.....		43
3.6. Параметри робочого режиму.....		46
3.7. Втрати в сталі.....		54
3.8. Розрахунок робочих характеристик.....		58
3.9. Розрахунок пускових характеристик.....		61
Висновки до розділу 3.....		72
4. ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК ДВИГУНА.....		73
Висновки до розділу 4.....		78
5. РОЗРАХУНОК ВАЛА ДВИГУНА.....		79
5.1. Вихідні дані для розрахунку вала.....		79
5.2. Розрахунок вала на твердість.....		80
5.3. Розрахунок вала на міцність.....		83
Висновки до розділу 5.....		86
6. СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТОПРИВОДОМ КОМПРЕСОРА....		89
7. РОЗРАХУНОК ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СПРО-		90
ЕКТОВАНОГО ВИРОБУ.....		
Висновки до розділу 7.....		101
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....		102
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....		104
ДОДАТКИ.....		108

					ПД 201.000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ріалів. Існують живильні насоси котельних установок теплових електростанцій, суднові насоси, насоси для нафтової, хімічної, паперової, харчової й іншої галузей промисловості. Насоси використовуються при виконанні будівельних робіт (намив земляних споруд, водозниження, відкачування води з котлованів, подача бетону й будівельних розчинів до споруд), при розробці родовищ і транспортуванні корисних копалин гідравлічним способом, при гідровидаленні відходів виробничих підприємств. Як допоміжні пристрої насоси використовують для забезпечення, змащення й охолодження машин.

Таким чином, насоси є одним з найпоширеніших видів машин, їх конструктивна розмаїтість надзвичайно велика, тому розробка ефективного та надійного електроприводу для насосів є актуальним та важливим питанням, яке буде вирішене в даному дипломному проекті.

					ПД 201.000.000 ПЗ	АВК.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$P_r = \rho g H, \quad (1.1)$$

ρ – щільність рідини, кг/м³; g – прискорення вільного падіння.

Розглянемо ще декілька характеристик насосу, які будуть використані при подальших розрахунках [2].

Повний напір (Total Dynamic Head, TDH) – різниця тиску рідини між вхідним та вихідним патрубками насосу. TDH змінюється в залежності від подачі насосу. Крива зміни TDH або *Q-H* характеристика – це основна характеристика будь-якого насосу. Кожному значенню частоти обертання насосу відповідає своя характеристика TDH.

Максимальний напір (TDH_{max}) – максимальний тиск, який насос може створити при нульовій подачі. Відповідає максимальній висоті стовпа рідини.

Потужність, витрачена насосом, потрібна для створення напору й подолання всіх видів втрат, неминучих при перетворенні механічної енергії на енергію руху рідини по трубопроводах. Вимірювана у кВт потужність насоса визначає потужність привідного двигуна й сумарну потужність насосної станції.

Корисна потужність (P_u), що передається рідині, розраховується за формулою

$$P_u = \rho g H Q \text{ (Вт)}. \quad (1.2)$$

Коефіцієнт корисної дії враховує всі види втрат, пов'язаних з перетворенням насосом механічної енергії двигуна в енергію рідини, що рухається. ККД визначає економічну доцільність експлуатації насоса зі зміною інших його робочих параметрів (напору, подачі, потужності) [2].

Механічна потужність (N) розраховується з урахуванням ККД (η) насосу

$$N = P_u / \eta = \rho g H Q / \eta. \quad (1.3)$$

									АРК..
									9
Зм.	АРК..	№ докцим.	Підпис	Дата	ПД ПЗ 2011.000.000 ПЗ				

ККД насосу змінюється в залежності від подачі Q . Він дорівнює нулю, якщо напір або подача також рівні нулю. В цьому випадку енергія рідини не передається.

Найбільш вживаною є класифікація насосних систем, заснована на особливостях їх принципу дії. В залежності від цього всі існуючі насоси можуть бути поділені на два види: динамічні й об'ємні. У динамічних насосах рідина рухається під силовим впливом у камері постійного об'єму, що поєднана із підводними і відводними пристроями. Залежно від виду силового впливу на рідину динамічні насоси, у свою чергу, розподіляються на лопатеві насоси й насоси тертя.

Об'ємні насоси працюють за принципом витиснення рідини з камери за рахунок зменшення її обсягу. Періодична зміна обсягу камери відбувається за рахунок зворотно-поступального або обертового руху робочого органу насоса. Позмінне заповнення камери перекачуваною рідиною та її спорожнювання забезпечуються клапанними пристроями вхідного й вихідного патрубків насоса [2].

Вибір типу насоса в кожному конкретному випадку відбувається з урахуванням його експлуатаційних і конструктивних якостей, що найбільш повно задовольняють технологічному призначенню насосної станції [1]. Порівняно з іншими видами динамічні насоси відрізняються простотою конструкції, високим ступенем уніфікації вузлів насосів одного типу, невеликими габаритними розмірами, низькою вартістю. Перевага динамічних насосів полягає також у можливості безпосереднього з'єднання валів насосів з валами електродвигунів, швидкохідних турбін і регулювання подачі насосів у широких межах.

Динамічні насоси підрозділяються на відцентрові та вихрові. Переваги відцентрових насосів перед поршневыми: висока продуктивність і рівномірна подача; компактність і швидкість (можливість безпосереднього приєднання до електродвигуна); простота пристрою, що дозволяє виготовляти їх з хімічно стійких, що важко піддаються механічній обробці матеріалів; можливість пе-

					ПД 201.000.000 ПЗ	Арк..
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		

рекачування рідин, що містять тверді зважені частки, завдяки більшим зазорам між лопатками й відсутності клапанів; можливість встановлення на легких фундаментах. До недоліків відцентрових насосів варто віднести досить низький напір, а також зменшення продуктивності при збільшенні опору мережі й різке зниження ККД при зменшенні продуктивності.

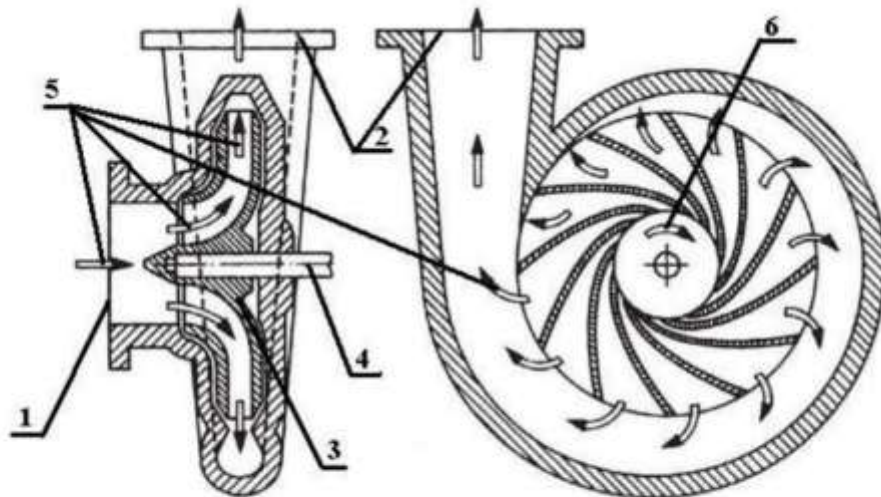
Відцентровий насос належить до групи лопатевих насосів. Відцентрові насоси перетворюють механічну енергію, що підводиться зовні до лопаток робочого колеса та яка передається до рідини, у потенційну (тиск) та кінетичну (витрати) енергію. Відцентрові насоси мають дуже широкий діапазон потужностей, витрат та тиску. Так, потужність промислових насосів лежить в межах від одиниць кіловат до декількох десятків мегават. За призначенням розрізняють наступні групи насосів: комунального та промислового водопостачання; заглибні для подачі води або нафти з свердловин; циркуляційні; поживні; водовідливу; для транспорту нафти, пульпи та ін.

Відцентрові насоси для перекачки води та інших рідин споживають до 25% усієї електроенергії, що виробляється. Робота цих систем відрізняється нерівномірним споживанням води, теплової енергії, повітря протягом доби в залежності від погодних умов, пори року. Вони є найбільш вживаним різновидом насосних систем, які використовуються, наприклад, в хімічних, нафтохімічних, біотехнологічних виробництвах, для транспортування різних крапельних рідин трубопроводами з метою забезпечення потоком необхідної швидкості [1].

На рис. 1.1 наведені основні частини одноступеневого відцентрового насосу: корпус насосу із всмоктуючим 1 та нагнітаючим 2 патрубками, робоче колесо 3, закріплене на валу 4. Рідина подається по всмоктуючому патрубку 1 та відводиться по нагнітаючому патрубку 2. Рідина, що знаходиться між патрубками, приводиться в обертання разом з робочим колесом. При цьому кожна частинка рідини переміщується по складній траєкторії. По-перше, відцентрова сила, що відкидає рідину, змушуючи її рухатися радіально, уздовж лопа-

					ПД 20110000000 ПЗ	Арк..
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		

ток від осі колеса до периферії. По-друге, рідина, що захоплюється лопатками колеса, яке обертається, окрім радіальної швидкості, набуває ще й колової швидкості, однакової зі швидкістю колеса. Враховуючи, що колова швидкість на периферії колеса більша, ніж біля входу в лопатки, то абсолютна (рівнодіюча) швидкість рідини на виході з колеса більша, ніж на вході. Таким чином, рідина, що проходить через робоче колесо відцентрового насоса, набуває додаткової кількості енергії [2].



1 – всмоктуючий патрубок; 2 – нагнітаючий патрубок; 3 – робоче колесо;
4 – вал; 5 – напрям руху робочої рідини в камері насосу; 6 – напрям руху валу

Рис.1.1. Основні частини відцентрового насосу

На рис.1.2 показані відцентрові насоси з приводом від трифазного асинхронного двигуна, який на сьогодні є найбільш розповсюдженим в промисловості.



а)



б)

Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата

ПД 201.000.000 ПЗ

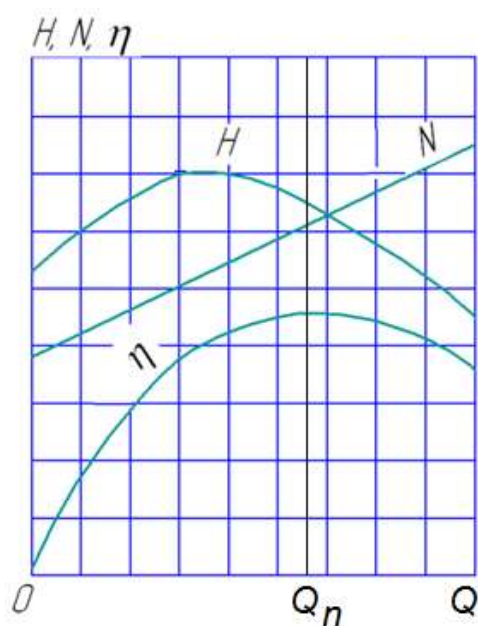
Арк..

Рис.1.2. Типові схеми двигуна і відцентрового насоса:

а) насос з металевим корпусом; б) насос з корпусом із пластику

При підключенні до мережі ці двигуни обертаються з постійною швидкістю, але можуть бути застосовані разом з перетворювачами частоти, працюючи на різних частотах обертання. Для підвищення тиску при збереженні витрат декілька насосів можуть бути з'єднані послідовно, коли подача води одним насосом здійснюється у всмоктувальний патрубок другого насоса. В свою чергу, паралельна робота насосів – це сумісна робота кількох насосів на один загальний або кілька зв'язаних між собою напірних трубопроводів

Для правильної експлуатації відцентрових насосів і їх підбору необхідно знати, як змінюються основні параметри насосів при різних умовах їх роботи. Величини, що характеризують роботу відцентрового насоса при даному числі обертів, зазвичай зображають у вигляді графічних залежностей напору H , потужності N і ККД η від продуктивності Q . Приклад енергетичних характеристик відцентрового насоса зображено на рис. 1.3. Основою вважають характеристику $H - Q$, тому що витрати потужності N і ККД є наслідком роботи по створенню подачі Q і напору H , які, відповідно, і є метою застосування насоса.



						ПД 201.000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

Рис.1.3. Енергетичні характеристики відцентрового насосу

Номінальна робоча точка (ВЕР, Best Efficiency Point) Q_n визначається як точка характеристики, в якій ККД є максимальним.

Розподільна гідравлічна мережа характеризується наступними характеристиками:

- висотою стовпа рідини між точкою всмоктування та точкою, в якій планується споживання рідини (повна геометрична висота або статичний напір);
- втратами напору, які визначаються як додатковий тиск, необхідний для подолання тертя в трубопроводах.

Схема простої гідравлічної розподільної мережі представлена на рис.1.4. Втрати напору R пропорційні квадрату подачі. Позначення насоса на схемах –

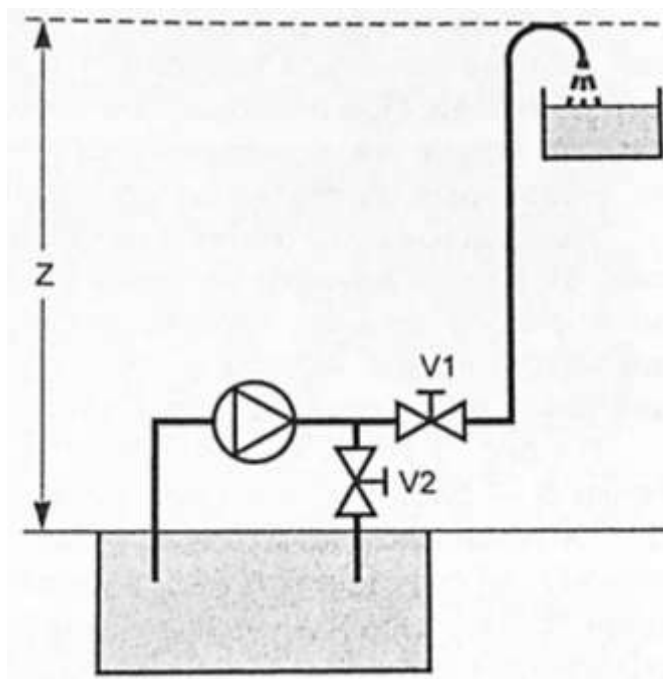


Рис.1.4. Спрощена схема простої гідравлічної розподільної мережі

При зміні в невеликих межах числа обертів n відцентрового насоса (приблизно в 1,5...2 рази) його напір H і потужність N , що споживається, змінюються по залежностях, які називаються законами пропорційності

										Арж..
Зм.	Арж..	№ докум.	Підпис	Дата	ПД ПЗ 201.000.000 ПЗ					

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2; \quad \frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 \quad (1.4)$$

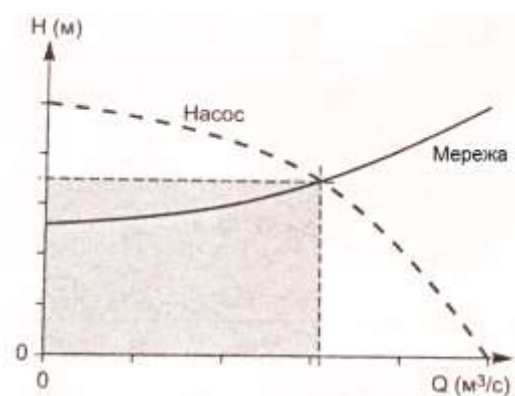
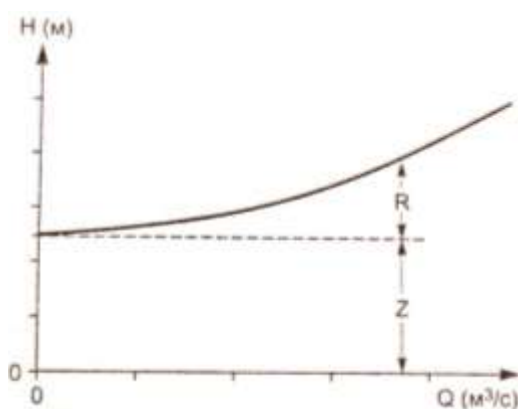
Як впливає з рис. 1.3, зі збільшенням подачі Q потужність N , що споживається насосом, безперервно зростає. При закритому вентиля на нагнітальному трубопроводі ($Q=0$) насос споживає мінімальну кількість енергії, тобто має мінімальну потужність (лише на подолання тертя в підшипниках і сальникових ущільненнях, та на переміщення рідини робочим колесом в корпусі насоса). Тому, щоб не перевантажувати електродвигун, необхідно пускати відцентровий насос при закритій засувці. Вибір насоса та встановлення числа його обертів залежать від умов роботи насоса на мережу, що складається з трубопроводів та апаратів, що в ній встановлено.

Крива, що представляє собою характеристику мережі, показана на рис.1.5 та має форму параболі, вершина якої розташована на осі ординат, на відстані $b=Z$ від початку координат, яка відповідає формулі

$$H = k \cdot Q^2 + b \quad (1.5)$$

де k – величина, що має наближене до постійного значення для даного трубопроводу (мережі).

Робоча точка насоса при встановленні у відповідній мережі визначається перетином характеристик насосу та мережі так, як показано на рис.1.6. В цьому випадку корисна потужність, що передається насосом рідині, пропорційна області затемнення.



Зм.	Арк.	№ док.м.	Підпис	Дата
-----	------	----------	--------	------

ПД 201100000003 ПЗ

Арк..

Рис.1.5. Характеристика мережі: H – напір насосу; Z – висота стовпа рідини; R – втрати напору (динамічний напір)

Рис.1.6. Робоча точка насоса в гідравлічній мережі

1.2. Аналіз насосних установок з асинхронними двигунами

У рух насосні установки приводять синхронні та асинхронні двигуни. Електроприводи установок поділяються на регульовані та нерегульовані. Зазвичай насоси оснащуються нерегульованим електроприводом. Враховуючі, що середньодобове завантаження насосів холодного водопостачання становить 50 ... 55% максимальної, то зміна обертів насосу є найбільш ефективним способом регулювання його параметрів [1, 3-6]. Якщо не змінюється гідравлічний опір мережі, регулювання практично здійснюється зі сталою величиною ККД насосу. Відомо [1, 2], що зменшення швидкості лише на 10% призводить до економії близько 27% енергії. Можливі технічні рішення для зміни обертів насосних установок представлені на рис.1.7.



Рис.1.7. Технічні рішення для зміни обертів насосів [7]

Для зміни швидкості можливе використання нерегульованих електроприводів з асинхронними чи синхронними двигунами, під'єднаних до насосів через муфти [7]. Гасіння зайвої енергії для зменшення швидкості відбувається у муфті (гідравлічній, електричній). Можливі методи зменшення енергоспоживання насосних систем з нерегульованим електроприводом наведені в табл.1.1.

Одним із найбільш поширених методів регулювання подачі є *дроселювання* на стороні нагнітання (рис. 1.8). Крива 1 на рис.1.8 характеризує роботу нерегульованого електроприводу на номінальній частоті обертання, крива 2 – роботу електроприводу при зменшенні частоти обертання. Крива 3 характеризує роботу магістралі при повністю відкритій заслінці, крива 4 – при напівзакритій заслінці.

Таблиця 1.1

Можливі методи зменшення енергоспоживання насосних систем з нерегульованим електроприводом

Методи зменшення енергоспоживання насосних систем	Зменшення енергоспоживання у %
Заміна електродвигунів на більш ефективні	1-3%
Заміна насосів на більш ефективні	1-2%
Регулювання шляхом зміни кількості паралельно працюючих насосів	10-30%
Очищення труб. Застосування фільтрів, та сепараторів для запобігання засмічуванню.	10-20%
Заміна регулювання подачі води заслонкою на регулювання частотою обертання (дроселювання)	до 60%

За формулою (1.3) потужність насосу N пропорційна HQ . Як видно з рис.1.8, при зміні положення заслінки потужність насосу N маже не змінюється: площі прямокутників DBF0 та KAL0 приблизно рівні.

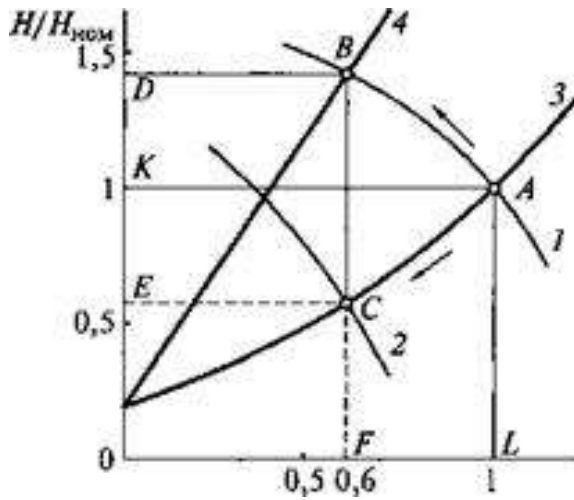


Рис.1.8. Зменшення енергоспоживання насосних систем

Для зміни подачі рідини при постійній частоті обертання насосу також використовують такі технічні рішення, як [2]:

- використання байпасної лінії, коли частина рідини повертається на патрубок, що всмоктує рідину, за допомогою байпасного вентиля (V2 на рис. 1.4). Це дозволяє точно регулювати подачу насосу, але така схема регулювання має низький ККД;
- періодична робота насосів, яка використовується для заповнення резервуарів водонапірних веж. Насос вмикається в той час, коли ціна електроенергії найменша;
- паралельна робота насосів використовується, коли необхідно змінювати подачу в широкому діапазоні. В цьому випадку можливо реалізувати роботу кожного насосу з оптимальним ККД. Іноді в системах використовують «підпірний» насос» (jockey pump) невеликої потужності для підтримки мінімального тиску в мережі, коли основні насоси не працюють. Слід мати на увазі, що при паралельній роботі насосів з різними характеристиками можлива нестабільна робота системи.

Враховуючі вищесказане, можна зробити висновок. Існуючі системи водопостачання з нерегульованим електроприводом не забезпечують помітного зниження споживаної потужності при зменшенні витрати води, а також обумовлюють при цьому істотне зростання тиску (напору) в системі, що призво-

дять до витoku води і несприятливо позначається на роботі технологічного обладнання та мереж водопостачання. Більш ефективним є використання керованих електроприводів з асинхронними двигунами. У цьому випадку з мережі живлення за допомогою перетворювача для приводу насосу подається лише енергія, достатня для забезпечення робочого режиму. При зменшенні частоти обертання електроприводу (крива 2 на рис.1.8) площа прямокутника ESF_0 , яка пропорційна потужності N насосу зменшилася майже у два рази у порівнянні з площею DBF_0 , яка відповідає номінальній частоті обертання двигуна.

Найбільшого поширення на даний момент для насосів набувають електроприводи системи *перетворювач частоти – асинхронний двигун* [8-10] (рис.1. 9).

Перетворювач частоти – електронний пристрій для зміни частоти електричного струму. Перетворює трифазний чи однофазний змінний струм частотою 50 (60) Гц у трифазний чи однофазний струм частотою від 1 до 800 Гц. Сучасні перетворювачі частоти окрім регулювання параметрів напруги живлення двигунів надають можливість замкненого регулювання технологічних параметрів насосу та формування “насосних” механічних характеристик, які сприяють плавності їх пуску [11]. Більшість з перетворювачів також реалізує алгоритми векторного керування координатами електропривода, що суттєво покращує його статичні та динамічні характеристики та полегшує інтеграцію електроприводів в складні, багатоконтурні, багатовимірні, розподілені, нестационарні системи керування водопостачанням [12].

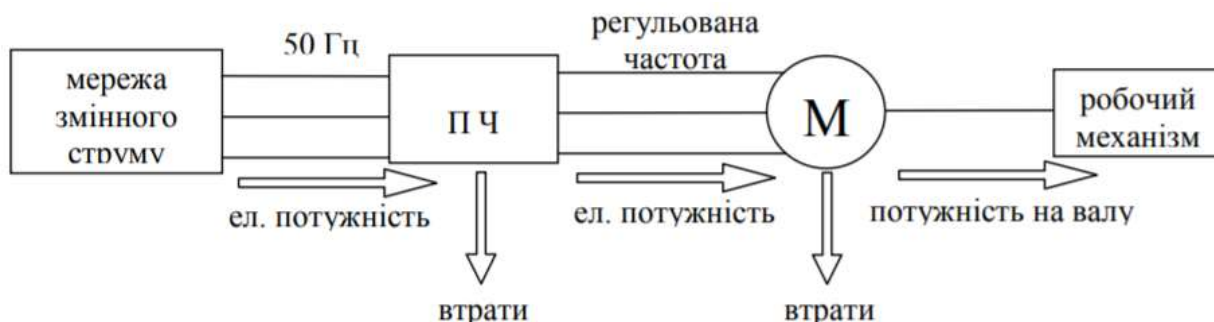


Рис.1.9. Схема системи перетворювач частоти – асинхронний двигун

За допомогою частотного перетворювача зменшується частота струму, а, відповідно, і частота обертання двигуна та продуктивність насосу. За допомогою датчику (тиску або витрат) інформація про напір поступає до перетворювача частоти.

Система тиристорний регулятор напруги (ТРН) – асинхронний двигун має дуже обмежений діапазон регулювання швидкості [7,13-15]. Для його розширення необхідне використання спеціальних двигунів з підвищеним ковзанням або двигунів з фазним ротором, що збільшує втрати активної потужності. Таку систему часто використовують лише для забезпечення плавного пуску насосу, розглядаючи ТРН, як пристрій плавного пуску (soft starter) [13]. Є декілька варіантів реалізації електроприводів з додатковим опором у колі ротора асинхронного двигуна. Це релейно-контакторні схеми, які забезпечують поступове дискретне регулювання швидкості [13], а також схеми з випрямлячем і широтно-імпульсними транзисторними чи тиристорними модуляторами (ключами), які надають можливість плавного регулювання швидкості [16]. Загальним недоліком обох схем є гасіння зайвої енергії на додатковому опорі роторного кола. Підвищити ККД таких систем можливо при поверненні зайвої енергії в мережу живлення. Таку задачу вирішує асинхронно-вентильний каскад, який передбачає ввімкнення в роторне коло паралельно з некерованим випрямлячем керованого інвертора, з'єднаного з мережею через узгоджувальний трансформатор [7, 13, 16, 17].

На рис.1.10 для прикладу показані перетворювачі частоти фірми VACON для водопровідних та для каналізаційних систем із функціями керування потоком. Діапазон напруг цих систем складає від 230 В до 500 В.

										АРК..
Зм.	АРК..	№ док.м.	Підпис	Дата	ПД ПЗ 201100000000 ПЗ					



Рис.1.10. Перетворювачі частоти фірми VACON

Варіанти схем регулювання частоти обертання насосів наступні:

Варіант 1. Один електронасос-один перетворювач. В цьому випадку необхідним і достатнім для споживача буде придбання перетворювача частоти і датчика зворотного зв'язку (тиску, витрати) і прив'язка цього обладнання до існуючого насоса.

Варіант 2. Один насос основний, один насос резервний. У цьому випадку необхідний один перетворювач частоти, датчик зворотного зв'язку (тиску, витрати) і система перемикання (комутації) живлення електронасоса. Система комутації дозволяє в ручному або автоматичному режимі перемикати живлення від перетворювача частоти до основного електронасоса або резервного.

Варіант 3. Система декількох електронасосів основних і резервних, наприклад, 3 + 2. Об'єкт може працювати в ручному або автоматичному режимі. Для реалізації цього завдання необхідний один перетворювач частоти, датчики зворотного зв'язку (тиску, витрати) і станція управління (комутації) живлення на всі електронасоси об'єкта. На відміну від Варіанту 2, станція комутації має розширені можливості управління і захисту.

Варіант 4. Це організація телеметричного (віддаленого) управління насосною станцією з центральної диспетчерської за допомогою одного з перерахованих вище трьох варіантів.

					ПД ПЗ 201100000003 ПЗ	АРК..
ЗМ.	АРК..	№ док.м.	Підпис	Дата		

До приводних електродвигунів насосних агрегатів крім їх великої потужності пред'являється ряд специфічних вимог. Одним з них є необхідність пуску двигунів під навантаженням. Конструкція електродвигуна повинна також допускати досить тривалий обертання ротора у зворотний бік, що викликається зливом води з напірних трубопроводів після відключення електродвигуна від мережі при плановій або аварійній зупинки агрегату. Вельми бажаною для поліпшення умов роботи енергетичних систем, де застосовуються потужні насосні станції, є можливість частих повторних пусків, що, у свою чергу, пред'являє підвищені вимоги до конструкцій обмотки статора і пускової обмотки електродвигуна, нагрівання яких визначає тривалість необхідної паузи між пусками і допустиме число пусків за розглянутий період.

Розглянемо особливості *асинхронних електродвигунів* для насосних систем. При роботі цих двигунів частота обертання магнітного поля статора постійна і залежить від частоти живильної мережі (стандартна частота 50 Гц) і від числа пар полюсів, а частота обертання ротора відрізняється на величину ковзання, складову 0,012-0,06 швидкості магнітного поля статора. Причиною виключно широкого застосування асинхронних електродвигунів є їх простота і невелика вартість.

Залежно від типу обмотки ротора розрізняють асинхронні електродвигуни з короткозамкненим або фазним ротором

Асинхронні електродвигуни короткозамкнені використовуються як електропривод для невеликих насосів. Вони значно дешевше електродвигунів усіх інших типів і, що дуже істотно, обслуговування їх набагато простіше. Пуск цих електродвигунів – прямий асинхронний, при цьому не потрібно будь-яких додаткових пристроїв, що дає можливість значно спростити схему автоматичного керування агрегатами.

Короткозамкнений ротор (рис.1.11) набраний з листів сталі. У пази ротору заливається розплавлений алюміній, внаслідок чого утворюються стержні, які замикаються накоротко торцевими кільцями. Ця конструкція називається «кліткою білки». У асинхронних двигунах великої потужності замість алю-

									АРЖ..
Зм.	АРЖ..	№ док.м.	Підпис	Дата	ПД ПЗ 2011.000.0000 ПЗ				

мінію може застосовуватися мідь. «Біляча клітина» є короткозамкненою обмоткою ротора, звідки власне назва.

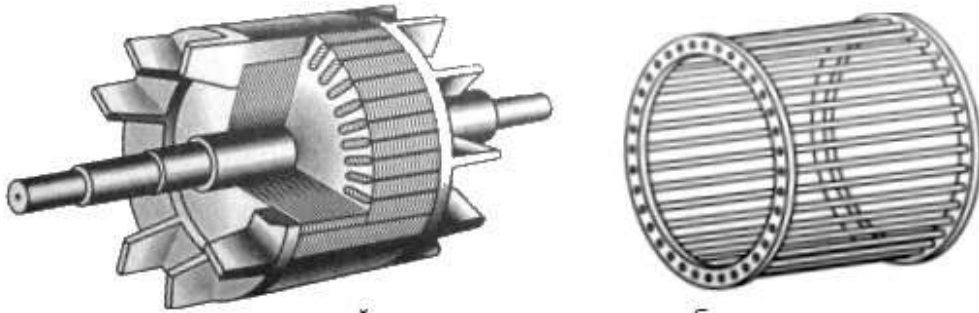


Рис.1.11. Асинхронний двигун з короткозамкненим ротором

При прямому включенні короткозамкнених асинхронних електродвигунів має місце дуже висока кратність пускового струму, який для двигунів потужністю 0,6 - 100 кВт в 5-7 разів вище номінального струму. Такий короткочасний поштовх пускового струму безпечний для двигуна, але викликає різке зниження напруги в мережі, що може несприятливо позначитися на інших споживачів енергії, приєднаних до тієї ж розподільної мережі. З цих причин номінальна потужність асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором, які вмикаються прямим включенням, залежить від потужності мережі і в більшості випадків обмежується 100 кВт.

Математичну модель асинхронної машини з короткозамкненим ротором (формула 1) можна отримати з узагальненої математичної моделі електричної машини [18, 19], якщо обмотки ротора замкнути накоротко. При цьому в загальних рівняннях слід прийняти $u_R = 0$

									АФК..
Зм.	АФК..	№ док.	Підпис	Дата	ПД 201.000.000 ПЗ				

$$\begin{cases} \bar{u}_S = r_S \bar{i}_S + \frac{d\bar{\psi}_S}{dt} + j\alpha_k \bar{\psi}_S, \\ 0 = r_R \bar{i}_R + \frac{d\bar{\psi}_R}{dt} + j(\alpha_k - p\nu) \bar{\psi}_R, \\ \bar{\psi}_S = x_S \bar{i}_S + x_m \bar{i}_R, \\ \bar{\psi}_R = x_m \bar{i}_S + x_R \bar{i}_R, \\ m = k \text{ Mod}(\bar{\psi}_i \times \bar{i}_k), \\ \bar{T}_m - \frac{d\nu}{dt} = m - m_i. \end{cases} \quad (1)$$

Для динамічних систем необхідно враховувати перехідні електромагнітні процеси в машині [18, 19]. У цьому випадку як пару змінних, що описують машину, залишимо просторові вектори статора і потокозчеплення ротора $(\bar{i}_S, \bar{\psi}_R)$, тоді рівняння (1) приймуть вигляд:

$$\bar{u}_S = r \bar{i}_S + x'_S \frac{d\bar{i}_S}{dt} + j\alpha_k x'_S \bar{i}_S - \frac{k_R}{\bar{T}_R} \bar{\psi}_R + jk_R p\nu \bar{\psi}_R, \quad (2)$$

$$0 = -k_R r_R \bar{i}_S + \frac{1}{\bar{T}_R} \bar{\psi}_R + \frac{d\bar{\psi}_R}{dt} + j(\alpha_k - p\nu) \bar{\psi}_R, \quad (3)$$

$$m = k_R \text{ Mod}(\bar{\psi}_R \times \bar{i}_S), \quad (4)$$

$$\bar{T}_m \frac{d\nu}{dt} = m - m_i, \quad (5)$$

$$\text{де } r = (r_S + k_R^2 r_R), \quad x'_S = \left(x_S - \frac{x_m^2}{x_R} \right), \quad k_R = \frac{x_m}{x_R},$$

$$\bar{T}_R = \frac{x_R}{r_R} \text{ – безрозмірні коефіцієнти.}$$

Для того щоб краще зрозуміти фізичні процеси, що відбуваються в асинхронній машині з короткозамкненим ротором, її досліджують у різних системах координат. Для представлення просторових векторів використовується комплексна площина. Рівняння (1)-(5) використовуються при програмуванні для дослідження робочих характеристик асинхронних двигунів електронасосних агрегатів для електротехнологій.

Асинхронні електродвигуни з фазним ротором мають більш складну і дорогу конструкцію, так як обмотки ротора у них з'єднуються з зовнішнім пусковим реостатом через три контактних кільця з ковзаючими по ним щітками

						ПД 2011.000.000 ПЗ	АРЖ..
Зм.	АРЖ..	№ докцим.	Підпис	Дата			

(рис. 1.12). На валу ротора закріплені пакети магнітопровода, а в пазах розміщена трифазна обмотка. Її кінці виведені через отвір у валу в спеціальну коробку. Виводи обмоток приєднані до трьох контактних кілець, ізольованих одне від одного і від вала за допомогою ізоляційних прокладок. До кілець, в свою чергу, щільно примикають графітові або металлографітові щітки, необхідний контакт забезпечується за допомогою щіткотримачів.



Рис.1.12. Конструкція фазного ротора

Перед пуском такого електродвигуна в ланцюг ротора з допомогою реостата вводять додатковий опір, завдяки чому при включення електродвигуна зменшується сила пускового струму. По мірі збільшення частоти обертання двигуна опір поступово зменшується, а після того як електродвигун досягне частоти обертання, близької до нормальної, опір пускового реостата цілком виводять, і двигун продовжує працювати як короткозамкнений.

Для насосів з *горизонтальним* валом застосовуються асинхронні електродвигуни з короткозамкненим ротором єдиної серії 4А потужністю 0,06 - 400 кВт при $\omega > 3000$ об/хв і висоті осі обертання 50-355 мм. Електродвигуни потужністю 0,06 - 0,37 кВт виготовляються на напругу 220 і 380 В; 0,55-11 кВт - на 220, 380 і 660 В; 15-110 кВт - на 220/380 і 380/660 В; 132 - 400 кВт - на 380/660

						ПД 201.000.0003 ПЗ	АРК..
Зм.	АРК..	№ док.м.	Підпис	Дата			

В. Слід зауважити, що в теперішній час двигуни серії 4А не випускаються, вони замінені на серію двигунів АІР.

Для приводу *вертикальних* насосів випускаються асинхронні електродвигуни з короткозамкненим ротором серії ВАН потужністю 315 – 2500 кВт, напругою 6 кВ і номінальною частотою обертання 375-1000 об/хв. Електродвигуни асинхронні вертикальні з короткозамкненим ротором типу ВАН-5 призначені для приводу вертикальних гідравлічних насосів для потреб народного господарства, електродвигуни ВАН-5А для насосів власних потреб АЕС.

Виготовляються електродвигуни серії ВАН у вертикальному підвісному виконанні з під'ятником та двома напрямними підшипниками (один з яких розташований у верхній хрестовині, інший – в нижній), з фланцевим кінцем валу для приєднання до насоса. Вентиляція електродвигуна здійснюється під натиском повітря, яке створюється обертовим ротором і вентиляторами. Холодне повітря надходить у машину знизу з фундаментної ями через нижню хрестовину і зверху через вікна у верхній хрестовині. Тепле повітря відводиться через отвори в корпусі статора.

Асинхронні електродвигуни основного виконання мають різні модифікації, зокрема: з підвищеним пусковим моментом; з підвищеними енергетичними показниками для насосних агрегатів з цілодобовою роботою, при якій особливе значення має підвищення ККД; з фазним ротором, що полегшує умови пуску і т. п.

Вітчизняною промисловістю також випускаються багатошвидкісні асинхронні електродвигуни, що дозволяють зміною частоти обертання регулювати подачу і напір насоса, покращуючи тим самим техніко-економічні показники насосної станції в цілому. Так, наприклад, двошвидкісні електродвигуни серії ДВДА мають інтервал значень потужності від 500/315 до 1600/1000 кВт. Ці електродвигуни переводяться з однієї частоти обертання на іншу відключенням однієї обмотки статора з подальшим включенням іншої.

1.3. Особливості конструкції двигуна, що проектується

					ПД № 204100000003 ПЗ	АРК..
Зм.	АРК..	№ док.зм.	Підпис	Дата		

Проектований електродвигун повинен задовольняти наступним умовам експлуатації: висота над рівнем моря не більша 1000 м; температура довкілля від -40°C до $+40^{\circ}\text{C}$. Можливі виконання за способом монтажу IM1001, IM4001, IM9701, IM4011.

Двигун повинен мати повітряне охолодження корпусу, що обдувається, і внутрішню аксіальну замкнуту систему циркуляції повітря, здійснювану внутрішнім відцентровим вентилятором.

Двигуни розраховані для роботи в режимі S1 (допускається робота електродвигунів в режимах S2, S3, S4, S6) від мережі трифазного змінного струму частотою 50 і 60 герц, напругою 380 і 660 В. по ДСТУ 183-74.

Міра захисту двигуна від довкілля IP44, міра захисту зовнішнього вентилятора IP20. Ізоляція обмотки статора для забезпечення підвищеної надійності має бути не нижча класу F і H (тепловий індекс 155°C і 180°C) по ДСТУ 8865-85 і ПІВРЕ.

Для забезпечення теплового захисту обмоток статора та підвищення надійності двигуна необхідно передбачити датчик-реле контролю температури нагріву обмоток.

Конструктивними рішеннями, загальними для усіх висот осі обертання АД зі ступенем захисту IP44 (ДСТ 17494-72) і способом охолодження ICA0141 (ДСТ 20459-75) двигуна серії АІР, є станина з подовжніми радіальними ребрами і зовнішнім реверсивним відцентровим вентилятором, встановленим на валу та захищеним кожухом.

Конструкція активних частин. Осердя статора та ротора зібрані зі штампованих листів електротехнічної сталі товщиною 0,5 мм. Для осердь АД з висотами осі обертання 50-132 мм застосовується сталь марки 2013 (ДСТ 21427.2-83), для АД з висотами осі обертання 160-250 мм – сталь марки 2212 (ДСТ 21427.2-83), для АД з висотами осі обертання 280...355 мм – сталь марки 1312 (ДСТ 21427.3-83). Осердя статорів АД скріплюють зварюванням або сталевими скобами. Сердечники статорів АД з висотами осі обертання 250-

												АФК..
Зм.	АФК..	№ об'єкту	Підпис	Дата								
ПД ПЗ 201100000000 ПЗ												

355 мм збираються безпосередньо в станині, обпресовуються і закріплюються кільцевими шпонками.

Обмотки АД з висотами осі обертання 50-132 мм та 160-355 мм мають ізоляцію класу F нагрівостійкості. Двигуни з висотами осі обертання 50-160 мм, за винятком двохполюсних з висотою осі обертання 160 мм, мають одношарові всипні статорні обмотки. Двигуни з висотами осі обертання 160-250 мм і двохполюсні з висотою осі обертання 160 мм мають одно-двошарові або двошарові всипні обмотки. У АД з висотами осі обертання 280-355 мм застосовують обмотки з розділених котушок, намотаних прямокутним проводом. Виключенням є 10-полюсні АД з висотою осі обертання 280- 355 мм і 12-полюсні АД з висотою осі обертання 315-355 мм, що мають всипні двошарові обмотки. Обмотки короткозамкнених роторів виконують литими з алюмінію або його сплавів.

					п.д. ПЗ 2011.0000.0000 ПЗ	АРК..
Зм.	АРК..	№ докцим.	Підпис	Дата		

2. ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ НА РОЗРОБКУ ДВИГУНА

2.1. Найменування дослідно-конструкторської роботи (ДКР)

Електродвигун асинхронний трифазний потужністю 1 кВт для приводу відцентрового насосу з покращеними експлуатаційними показниками.

2.2. Мета виконання ДКР і призначення виробу

Мета роботи – створення електродвигуна з поліпшеними техніко – економічними параметрами.

Застосування електродвигуна приводить до зменшення ваги приводу, зменшує металоємність і трудомісткість при виготовленні.

2.3. Технічні вимоги

2.3.1. Вимоги по призначенню.

2.3.1.1. Режим роботи тривалий за ДСТУ 2582-81.

2.3.1.2. Основні номінальні параметри двигуна.

2.3.1.1.1. Потужність на валові - $P_{2H} = 1$ кВт.

2.3.1.1.2. Частота мережі - $f_H = 50$ Гц.

2.3.1.1.3. Напруга фазна - $U_H = 380$ В.

2.3.1.1.4. Синхронна частота обертання $n_1 = 1500$ об/хв.

2.3.1.1.5. Коефіцієнт корисної дії в номінальному режимі - $\eta_H = 0,72$.

2.3.1.1.6. Коефіцієнт потужності - $\cos \varphi_H = 0,809$.

2.3.1.1.7. Кратність пускового струму - $k_{nI} = \frac{I_{1n}}{I_H} = 3,59$.

2.3.1.1.8. Кратність пускового моменту - $k_{nm} = \frac{M_{\text{эн}}}{M_{\text{эн}}} = 1,94$.

2.3.1.1.9. Кратність максимального моменту - $k_m = \frac{M_{2\text{max}}}{M_i} = 2,15$.

2.3.1.1.10. Граничні відхилення від номінальних значень параметрів за ДСТ 183-74.

					ПД 201.000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Технічні вимоги по 2.3.1.1.5, 2.3.1.1.6, 2.3.1.1.7, 2.3.1.1.8, 2.3.1.1.9 можуть уточнюватися за результатами іспитів дослідних зразків. Кратність моментів установлюється за результатами іспитів дослідних зразків і вноситься в технічні вимоги (ТВ).

2.3.3.2. Номінальні значення кліматичних факторів - за ДСТ 15543-70. Верхнє значення температури +40 °С .

2.3.3.3. Навколишнє середовище невибухонебезпечне.

2.3.3.4. Ступінь захисту двигуна IP44 за ДСТ 14254-80.

2.3.3.5. Спосіб охолодження двигуна IC0141.

2.3.4. Конструктивні вимоги.

2.3.4.1. Конструктивне виконання IM2001.

2.3.4.2. Двигун повинний виготовлятися з ізоляцією не нижче класу F за ДСТ 8865-70.

2.3.4.3. Опір ізоляції обмотки статора щодо корпусу і між пазами повинне бути:

а) при нормальних кліматичних умовах у практично холодному стані двигуна - не менш 40 Мом.;

б) у нагрітому стані – не менш 2,5 Мом.;

в) після іспиту на вологостійкість - не менш 1 мом.

2.3.4.4. Перевищення температури обмотки статора обмірюване методом опору, повинне бути не більш 115^oС .

					ПД 201.000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ РОЗРАХУНОК

Вихідні дані. Потужність на валу $P_{2H} = 1$ кВт. Напруга номінальна фазна $U_H =$ **Ошибка! Источник ссылки не найден.** В. Частота живильної мережі $f =$ **Ошибка! Источник ссылки не найден.** Гц. Синхронна частота обертання $n_c = 1500$ об/хв. Ізоляція класу нагрівостійкості F.

3.1. Вибір головних розмірів.

3.1.1. Число пар полюсів

$p = 60f/n_1 = 60 \cdot$ **Ошибка! Источник ссылки не найден.** / **Ошибка! Источник ссылки не найден.** = 2.

3.1.2. Висота осі обертання (попередньо) по рис. 8-17,а [21]

$$h_{np} = 78 \text{ мм.}$$

З табл. 8-6 [21] приймаємо

$$h = 80 \text{ мм;}$$

зовнішній діаметр сердечника статора (див. табл. 8.6) [21]

$$D_a = 0,139 \text{ м.}$$

По [21] табл. 8-7 вибираємо значення k_D : при $2p=2$ $k_D = 0,52 \dots 0,6$; при $2p=4$ $k_D = 0,62 \dots 0,68$; при $2p=6$ $k_D = 0,7 \dots 0,72$; при $2p=8$ $k_D = 0,72 \dots 0,75$; при $2p=10 \dots 12$ $k_D = 0,75 \dots 0,77$, у проекті $2p=4$, тому вибираємо коефіцієнт

$$k_D = 0,68 \text{ .}$$

3.1.3. Внутрішній діаметр статора

$$D = k_D D_a = 0,68 \cdot 0,139 = 0,0945 \text{ м.}$$

3.1.4. Полюсний розподіл

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} = 3,14 \cdot 0,0945 / 4 = 0,074 \text{ м.}$$

3.1.5. Розрахункова потужність по (8.4) [21]:

по рис. 8.20 вибираємо коефіцієнт

					ПД 201.000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$k_E = 0,96 \quad ;$$

по рис. 8.21,а вибираємо коефіцієнт корисної дії двигуна

$$\eta = 0,75 \quad ;$$

і коефіцієнт потужності

$$\cos\varphi = 0,80 \quad ;$$

$$P' = \frac{k_E}{\eta \cos\varphi} = 1 \cdot 10^3 \cdot 0,96 / (0,72 \cdot 0,809) = 1,60 \cdot 10^3 \text{ Вт.}$$

3.1.6. Електромагнітні навантаження (попередньо) по рис. 8.22 [21]:
лінійне токове навантаження

$$A = 22500 \text{ А/м.}$$

магнітна індукція в повітряному зазорі

$$B_\delta = 0,82 \text{ Тл.}$$

3.1.7. Обмотувальний коефіцієнт обмотки (попередньо) k_{ob1} , якщо $2p=4$
(для 1-шарових обмоток $k_{ob1} = 0,95 \dots 0,96$; для 2-шарових і 1-2-шарових при
 $2p=2$ $k_{ob1} = 0,90 \dots 0,91$ і при $2p>2$ $k_{ob1} = 0,91 \dots 0,92$)

$$k_{ob1} = 0,95$$

3.1.8. Розрахункова довжина повітряного зазору по (8.6) [21]

$$l_\delta = \frac{P'}{k_B D^2 \Omega k_{ob1} A B_\delta} = \{ \Omega = 2\pi n_{1/60} = 2 \cdot 3,14 \cdot \text{Ошибка! Источник ссылки не}$$

$$\text{найден./60} = 157 \text{ рад/с} \} =$$

$$= 1,60 \cdot 10^3 / (1,11 \cdot 0,0945^2 \cdot 157 \cdot 0,95 \cdot 22500 \cdot 0,82) = 0,059 \text{ м.}$$

Приймаємо

$$l_\delta = 0,059 \text{ м.}$$

Відношення

$$\lambda = \frac{l_\delta}{\tau} = 0,059 / 0,074 = 0,80$$

знаходиться в припустимих межах (див. рис. 8.25 [21])

									Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

3.2. Визначення числа пазів, витків і перерізу проводу обмотки статора.

3.2.1. Граничні значення зубцових розподілів статора t_1 по рис. 8.26 [21], якщо полюсний розподіл $\tau=0,074$ м; $h=80$ мм:

$$t_{z1 \min} = 6 \text{ мм},$$

$$t_{z1 \max} = 9 \text{ мм}.$$

3.2.2. Число пазів статора по 8.16 [21]

$$Z_{1 \max} = \pi D / t_{z1 \min} = 3,14 \cdot 0,0945 / 6 \cdot 10^{-3} = 49;$$

$$Z_{1 \min} = \pi D / t_{z1 \max} = 3,14 \cdot 0,0945 / 9 \cdot 10^{-3} = 33.$$

Приймаємо

$$Z_1 = 36 ,$$

тоді число пазів статора на полюс і фазу

$$q = \frac{Z_1}{2pm} = 36 / (2 \cdot 2 \cdot 3) = 3.$$

Обмотка одношарова приведена в додатку А.

3.2.3. Зубцовий розподіл статора (остаточно)

$$t_1 = \frac{\pi D}{2pmq} = 3,14 \cdot 0,0945 / (2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 3) = 0,0082 \text{ м}.$$

3.2.4. Число ефективних провідників у пазу (попередньо) за умови, що число паралельних гілок обмотки статора $a=1$ по (8.17) [21]

Струм обмотки статора номінальний по 8.18 [21]

$$I_{1H} = \frac{P_{2H}}{mU_{1H}\eta\cos\varphi} = 1 \cdot 10^3 / 3 \cdot 380 \cdot 0,72 \cdot 0,809 = 1,56 \text{ А},$$

$$u'_n = \frac{\pi D A}{I_{1H} Z_1} = 3,14 \cdot 0,0945 \cdot 22500 / (1,56 \cdot 36) = 127.$$

3.2.5. Приймаємо число паралельних гілок

					ПД 201.000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$a = 1 \quad ,$$

тоді по (8.19) [21]

$$u_n = au'_n = 1 \cdot 127 = 127.$$

Приймаємо

$$u_n = 130 \quad ,$$

3.2.6. Визначаємо остаточно.

3.2.6.1. Обмотка одношарова з м'яких секцій. Число витків у котушці

$$w_k = \frac{u_n}{1} = 130/1 = 130.$$

3.2.6.2. Для одношарової обмотки укорочення кроку обмотки

$$\beta_1 = \frac{y_1}{\tau} = 1.$$

3.2.6.3. Число витків фази обмотки статора по (8.20) [21]

$$w_1 = \frac{u_n z_1}{2am} = 130 \cdot 36 / (2 \cdot 1 \cdot 3) = 780 \text{ витка (ів).}$$

3.2.6.4. Лінійне токове навантаження статора по (8.21) [21]

$$A = \frac{2I_{1H} w_1 m}{\pi D} = 2 \cdot 1,56 \cdot 780 \cdot 3 / (3,14 \cdot 0,0945) = 23027 \text{ А/м.}$$

3.2.6.5. Коефіцієнт розподілу для першої гармоніки електрорушійної сили (ЕРС) для трифазних машин ($m=3$) і $q=3$ по табл.3.16

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

3.2.6.7. Обмоточний коефіцієнт для одношарової обмотки

$$k_{o\sigma 1} = k_{p1} = 0,96.$$

3.2.6.8. Магнітний потік у повітряному зазорі по (8.22) [21]

$$\Phi = \frac{k_E U_{1H}}{4k_B w_1 k_{o\sigma 1} f_1} = 0,96 \cdot \text{Ошибка! Источник ссылки не}$$

найден. / (4 \cdot 1,11 \cdot 780 \cdot 0,95 \cdot Ошибка! Источник ссылки не найден.) = 0,002218

Вб.

3.2.6.9. Магнітна індукція в повітряному зазорі по (8.23) [21]

									Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

ПД 201.000.000 ПЗ

$$B_{\delta} = \frac{p\Phi}{Dl_{\delta}} = 2 \cdot 0,002218 / (0,0945 \cdot 0,059) = 0,796 \text{ Тл.}$$

3.2.7. Щільність струму в обмотці статора (попередньо) по (8.25) [21]:
по рис. 8.27,б [21] визначаємо (якщо $D_a=0,139 \text{ м}$)

$$AJ_1 = 150 \times 10^9 \text{ А}^2/\text{м}^3.$$

Потім щільність струму

$$J_1 = \frac{(AJ_1)}{A} = 150 \cdot 10^9 / 23027 = 6514092 \text{ А}/\text{м}^2.$$

3.2.8. Переріз ефективного провідника (попередньо) по (8.24) [21]

$$q_{\text{эф}} = \frac{I_{1н}}{n_{\text{эл}} J_1} = 1,56 / (1 \cdot 6514092) = 0,2241 \cdot 10^{-6} (\text{м}^2) = 0,2241 \text{ мм}^2.$$

3.2.9. Приймаємо число елементарних провідників в ефективному провіднику

$$n_{\text{эл}} = 1,$$

тоді переріз елементарного провідника

$$q_{\text{эл}} = \frac{q_{\text{эф}}}{n_{\text{эл}}} = 0,2241 / 1 = 0,2241 \text{ мм}^2.$$

3.2.10. Вибираємо обмотувальний провід ПЭТВ по табл. ПЗ.1 [21]:

$$q_{\text{эл}} = 0,1963 \text{ мм}^2.$$

Діаметр голого проводу

$$d_{\text{г}} = d_{\text{эл}} = 0,5 \text{ мм.}$$

Діаметр ізолюваного проводу

$$d_{\text{из}} = 0,545 \text{ мм.}$$

Переріз ефективного провідника остаточно

$$q_{\text{эф}} = n_{\text{эл}} q_{\text{эл}} = 1 \cdot 0,1963 = 0,1963 \text{ мм}^2;$$

3.2.9. Щільність струму в обмотці статора (остаточно) по (8.27) [21]

$$J_1 = \frac{I_{1н}}{a q_{\text{эл}} n_{\text{эл}}} = 1,56 / (1 \cdot 0,1963 \cdot 1) = 7,44 \text{ А}/\text{мм}^2.$$

									Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ПД 201.000.000 ПЗ				

3.3. Розрахунок розмірів зубцової зони статора

3.3.1. Застосовуємо електротехнічну сталь 2013. У більшості сучасних двигунів виконують трапецеїдальні пази (рис.3.1, 3.2) Паз статора трапецеїдальний приймаємо по рис. 8.29, а [21] зі співвідношенням розмірів, що забезпечують паралельність бічних граней зубців (див. рис 3.1).

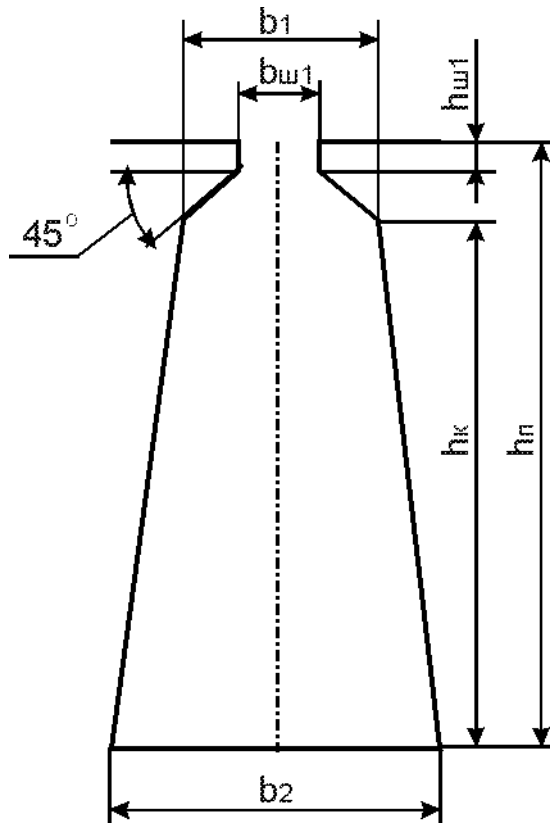


Рис.3.1. Паз статора

					ПД 201.000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

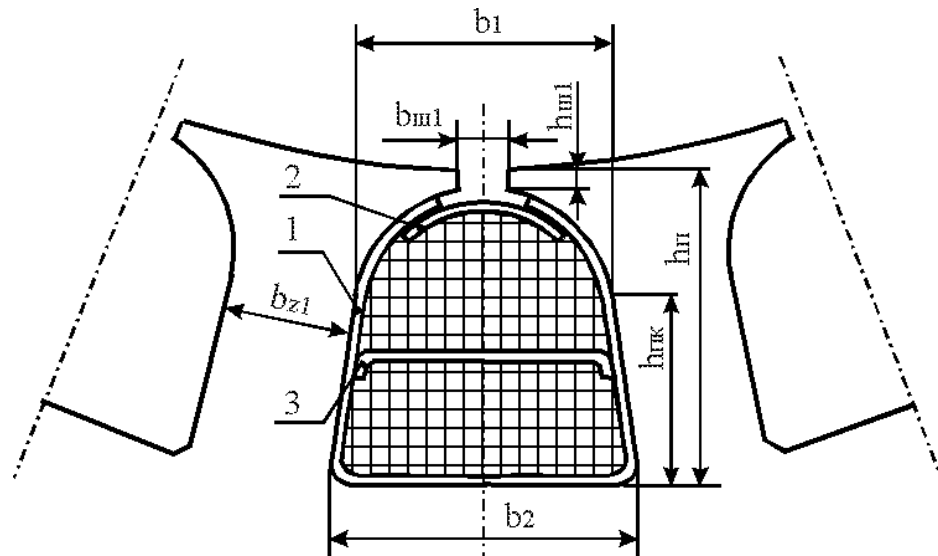


Рис.3.2. Паз статора

3.3.2. Приймаємо попередньо по табл. 8.10 [21]:

індукція в зубцях статора

$$B_{z1} = 2,1 \text{ Тл,}$$

індукція в ярмі статора

$$B_a = 1,75 \text{ Тл.}$$

3.3.3. Коефіцієнт заповнення пакета статора сталлю по табл.8.11 [21] для оксидованої сталі марки 2013.

$$k_c = 0,97 \text{ .}$$

Ширина зубця статора по (8.37) [21]

$$b_{z1} = \frac{B_{\delta} t_1 l_{\delta}}{B_{z1} l_{cm1} k_c} = 0,796 \cdot 0,0082 \cdot 0,059 / (2,1 \cdot 0,059 \cdot 0,97) = 0,00320 \text{ м} = 3,2 \text{ мм.}$$

Довжина пакета статора l_{cm1} дорівнює розрахунковій довжині повітряного зазору l_{δ} .

3.3.4. Висота ярма статора по (8.28) [21]

$$h_a = \frac{\Phi}{2 B_a l_{cm1} k_c} = 0,002218 / (2 \cdot 1,75 \cdot 0,059 \cdot 0,97) = 0,01107 \text{ м} = 11,07 \text{ мм.}$$

										Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

3.3.5. Розміри паза в штампі приймаємо:

$$b_{uu1} = 0,003 \text{ м,}$$

Ширину шліца в двигунах із $h \leq 132$ мм приймають $h_{uu} = 0,5$ мм, у двигунах із $h \geq 160$ мм збільшують до $h_{uu} = 1$ мм, для $h = 80$ мм

$$h_{uu1} = 0,0005 \text{ м.}$$

по (8.38) [21] висота паза

$$h_n = 0,5(D_a - D) - h_a = 0,5 \cdot (0,139 - 0,0945) - 0,01107 = 0,01118 \text{ м} = 11,18 \text{ мм.}$$

3.3.6. Виходячи з умови паралельності граней зубців, знаходимо:

$$b_1 = \frac{\pi(D + 2h_{uu1}) - Z_1 b_{z1}}{Z_1 - \pi} = \frac{3,14(0,0945 + 2 \cdot 0,0005) - 36 \cdot 0,00320}{36 - 3,14} = 0,00562 \text{ м} = 5,62 \text{ мм;}$$

$$b_2 = \frac{\pi(D + 2h_n)}{Z_1} - b_{z1} = 3,14 \cdot (0,0945 + 2 \cdot 0,01118) / 36 - 0,00320 = 0,00699 \text{ м} = 6,99 \text{ мм;}$$

по (8.42)- (8-45) [1

$$h_{нк} = h_n - \frac{b_1 + h_{uu1}}{2} = 0,01118 - (0,00562 + 0,0005) / 2 = 0,00812 \text{ м} = 8,12 \text{ мм.}$$

3.3.7. Розміри паза у світлі по (8.42) [21] з урахуванням припусків на зборку згідно табл. 8.12. [21]:

по ширині паза

$$\Delta b_n = 0,1 \text{ мм,}$$

по висоті паза

$$\Delta h_n = 0,1 \text{ мм.}$$

$$b'_1 = b_1 - \Delta b_n = 0,00562 - 0,1 \cdot 10^{-3} = 0,00552 \text{ м} = 5,52 \text{ мм;}$$

$$b'_2 = b_2 - \Delta b_n = 0,00699 - 0,1 \cdot 10^{-3} = 0,00689 \text{ м} = 6,89 \text{ мм;}$$

$$h'_{нк} = h_{нк} - \Delta h_n = 0,00812 - 0,1 \cdot 10^{-3} = 0,00802 \text{ м} = 8,02 \text{ мм.}$$

									Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ПД 201.000.000 ПЗ				

3.3.9. Площа поперечного переріза паза, у якому розміщується обмотка, корпусна ізоляція і прокладки

$$S_n = \frac{\pi b'^2}{8} + \frac{(b'_1 + b'_2)h'_{нк}}{2} = 3,14 \cdot 0,00552^2 / 8 + (0,00552 + 0,00689) \cdot (0,00802) / 2 =$$

$$= 0,0000617 \text{ м}^2 = 61,7 \text{ мм}^2.$$

3.3.8. Пазова ізоляція приведена в табл.3.1.

Таблиця 3.1

Ізоляція класу F обмотки статора

Позиція по рис. 3.2, найменування ізоляції	Марка матеріалу	Товщина матеріалу, мм	Число шарів	Однобічна товщина ізоляції
1, корпусна ізоляція, $b_{уз}$	Имидофлекс	0,2	1	0,2
2, пазова кришка, $b_{нк}$	Имидофлекс	0,3	1	0,3
3, прокладка, $b_{пр}$	Відсутня якщо обмотка одношарова	0	0	0

3.3.10. Площа, поперечного переріза корпусної ізоляції в пазу

$$S_{уз} = b_{уз} (2h'_{нк} + 0,5\pi b'_1 + b'_2) = 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot$$

$$3 \cdot (2 \cdot 0,00802 + 0,5 \cdot 3,14 \cdot 0,00552 + 0,00689) = 0,0000064 \text{ м}^2 = 6,4 \text{ мм}^2,$$

де $b_{уз}$ - однобічна товщина ізоляції в пазу по табл. 3.1 [21] і табл.3.1.

3.3.11. Площа, займана прокладками в пазу згідно рис.3.2. (поз. 2 і поз. 3) і табл. 3.1

$$S_{пр} = b'_1 \cdot b_{нк} + \frac{b'_1 + b'_2}{2} \cdot b_{пр} = 0,00552 \cdot 0,3 \cdot 10^{-3} + (0,00552 + 0,00689) / 2 \cdot$$

$$0,3 \cdot 10^{-3} = 0,0000017 \text{ м}^2 = 1,7 \text{ мм}^2.$$

3.3.12. Площа поперечного переріза паза для розміщення провідників

									Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

ПД 201.000.000 ПЗ

по (8.48) [21]

$$S'_n = S_n - S_{uz} - S_{np} =$$

$$= 0,0000617 - 0,0000064 - 0,0000017 = 0,0000536 \text{ м}^2 = 53,6 \text{ мм}^2.$$

3.3.13. Коефіцієнт заповнення паза (контроль правильності розміщення обмотки в пазах)

$$k_3 = \frac{d^2_{uzun}}{S'_n} = (0,54510^{-3})^2 \cdot 130 / 0,0000536 = 0,72,$$

що задовольняє вимозі технологічності виготовлення обмотки, що повинна бути знаходитися в межах $k_3 = 0,69 \dots 0,71$ для двополюсних машин ($2p = 2$) і $k_3 = 0,72 \dots 0,74$ для двигунів з $2p \geq 4$.

3.4. Розрахунок ротора.

3.4.1. Повітряний зазор (по мал. 8.31 [21]) для зовнішнього діаметра статора $D_a = 0,139$ м

$$\delta = 0,3 \text{ мм.}$$

3.4.2. Число пазів ротора (по табл. 8.16 [21]), якщо число пазів статора дорівнює $Z_1 = 36$

$$Z_2 = 44 \text{ .}$$

3.4.3. Зовнішній діаметр ротора

$$D_2 = D - 2\delta = 0,0945 - 2 \cdot 0,3 \cdot 10^{-3} = 0,0939 \text{ м.}$$

3.4.4. Довжина магнітопровода $l_2 = l_1 = l_\delta = 0,059$ м.

3.4.5. Зубцове розподіл ротора

$$t_2 = \pi D_2 / Z_2 = 3,14 \cdot 0,0939 / 44 = 0,0067 \text{ м} = 6,7 \text{ мм.}$$

3.4.6. Внутрішній діаметр ротора дорівнює діаметрові вала, тому що сердечник ротора безпосередньо насаджується на вал, (8.102) [21].

К оєфіцієнт k_B визначимо по табл. 8.17 [21]

$$k_B = 0,23 \text{ м.}$$

$$D_J = k_B \cdot D_a = 0,23 \cdot 0,139 = 0,032 \text{ м.}$$

Приймаємо

									Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

ПД 201.000.000 ПЗ

$$D_j = 0,032 \text{ м.}$$

3.4.7. Струм у стрижні ротора .

3.4.7.1. Коефіцієнт, що враховує вплив струму намагнічування на відношення I_1/I_2 ,

$$k_i = 0,2 + 0,8 \cos \varphi = 0,2 + 0,8 \cdot 0,809 = 0,840.$$

3.4.7.2. Коефіцієнт приведення струмів

$$v_i = \frac{2m_1 w_1 k_{об1}}{Z_2 k_{ск}} = 2 \cdot 3 \cdot 780 \cdot 0,95 / 44 = 101,05.$$

3.4.7.3. Струм у стрижні ротора по (8.57) [21]

$$I_2 = k_i v_i I_{1H} = 0,840 \cdot 101,05 \cdot 1,56 = 123,9 \text{ А.}$$

3.4.7. Припустима щільність струму в стрижнях ротора в трифазних закритих двигунах, що обдуваються, при заливанні алюмінієвим сплавом складає $J_2 = 2,5-3 \text{ А/мм}^2$, а при захищеному виконанні на 10-15% вище; у мідних стрижнях $J_2 = 4-8 \text{ А/мм}^2$. Більші значення відповідають машинам меншої потужності. Приймаємо для алюмінієвої обмотки

$$J_2 = 2,5 \text{ А/мм}^2.$$

Площа поперечного переріза стрижня по (8.68) [21]

$$q_c = \frac{I_2}{J_2} = 123,9 / 2,5 \cdot 10^6 = 49,6 \text{ мм}^2$$

					ПД 201.000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

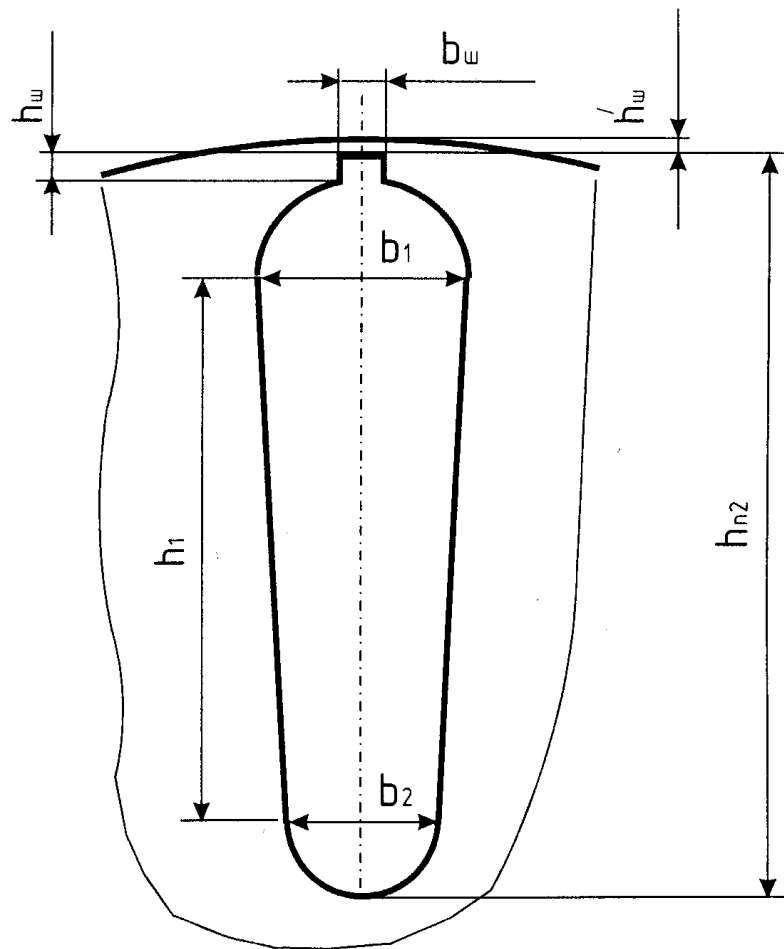


Рис. 3.3. Паз ротора

3.4.8. Паз ротора - по рис. 8.40,б. У двигунах з висотою осі обертання $h < 160$ мм пази мають вузький проріз з наступними розмірами: $b_{w2} = 1,0$ мм і $h_{w2} = 0,5$ мм при висоті осі обертання $h < 100$ мм; $b_{w2} = 1,5$ мм і $h_{w2} = 0,75$ мм при висоті осі обертання $h = 112 \dots 132$ мм; у двигунах з $h = 160 \dots 200$ мм виконують трапецеидальні закриті пази (рис. 3.3.) з розмірами шліца $b_{w2} = 1,5$ мм і $h_{w2} = 0,7$ мм. Висота перемички ннад пазом у двигунах з $2p \geq 4$ виконується рівної $h'_{w2} = 0,3$ мм, у двухполюсной машині $h'_{w2} = 1,0 \dots 1,5$ мм.

Приймаємо для $h = 80$ мм (див. рис. 3.3):

$$b_{w2} = 1,0 \text{ мм.}$$

Висоту шліца приймаємо

$$h_{w2} = 0,5 \text{ мм.}$$

					ПД 201.000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висота містка для $h = 80$ мм

$$h'_{ш2} = 0,3 \text{ мм.}$$

Приймаємо індукцію в зубцях ротора по табл. 8.10 [21]

$$B_{z2} = 1,7 \text{ Тл,}$$

Припустима ширина зубця по (8.75) [21]

$$b_{z2\text{доп}} = B_{\delta} t_{2l\delta} / (B_{z2} l_{\text{ст}2} k_c) = 0,796 \cdot 0,0067 \cdot 0,059 / (1,72 \cdot 0,059 \cdot 0,97) = 0,0032 \text{ м} = 3,2 \text{ мм.}$$

Розміри паза

$$b_1 = (\pi (D_2 - 2h_{ш2} - 2h'_{ш2}) - Z_2 b_{z2}) / (\pi + Z_2) = \\ = (3,14 \cdot (0,0939 - 2 \cdot 0,0005 - 2 \cdot 0,0003) - 44 \cdot 0,0032) / (3,14 + 44) = 0,0032 \text{ м} = \\ = 3,2 \text{ мм;}$$

по (8.77) [21]

$$b_2 = \sqrt{\frac{b_1^2 \left(\frac{Z_2}{\pi} + \frac{\pi}{2} \right) - 4q_c}{\frac{Z_2}{\pi} - \frac{\pi}{2}}} = \left((0,0032^2 \cdot (44/3,14 + 3,14/2) - \right. \\ \left. - 4 \cdot 0,00002979 \cdot 10^{-6}) / (44/3,14 - 3,14/2) \right)^{1/2} = 0,0018 \text{ м} = 1,8 \text{ мм;}$$

по (8.78) [21]

$$h_1 = (b_1 - b_2) Z_2 / 2\pi = (0,0032 - 0,0018) \cdot 44 / (2 \cdot 3,14) = 0,0098 \text{ м} = 9,8 \text{ мм.}$$

Приймаємо: $b_1 = 3,2$ мм; $b_2 = 1,8$ мм; $h_1 = 9,8$ мм.

Повна висота паза

$$h_{п2} = h'_{ш} + h_{ш} + b_{1/2} + h_1 + b_{2/2} = 0,0003 + 0,0005 + 0,0032/2 + 0,0098 + 0,0018/2 = \\ 0,0131 \text{ м} = 13,1 \text{ мм.}$$

Переріз стрижня по (8.79) [21]

$$q_c = \pi(b_1^2 + b_2^2) / 8 + h_1(b_1 + b_2) / 2 = \\ = 3,14 \cdot (0,0032^2 + 0,0018^2) / 8 + 0,0098 \cdot (0,0032 + 0,0018) / 2 = 0,00002979 \text{ м}^2 = \\ = 29,79 \text{ мм}^2.$$

3.4.9. Щільність струму в стрижні

$$J_2 = I_2 / q_c = 123,9 / 0,00002979 = 4,16 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2.$$

3.4.9. Короткозамикаючі кільця (див. рис. 8.37 [21]).

									Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

ПД 201.000.000 ПЗ

3.4.10.1. Коефіцієнт співвідношення струму в стрижні і струму в кільці

$$\Delta = 2\sin(\alpha_z/2) = 2\sin(p\pi/Z_2) = 2\sin(2 \cdot 3,14/1844) = 0,28.$$

4..2. Струм в замикаючих кільцях

$$I_{\text{кл}} = I_2 / \Delta = 123,9 / 0,28 = 443 \text{ А.}$$

3.4.10.3. Щільність струму в замикаючих кільцях

$$J_{\text{кл}} = 0,85 J_2 = 0,85 \cdot 4159113,80 = 3,54 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2.$$

3.4.10.4. Площа поперечного переріза кільця по (8.72) [21]

$$q_{\text{кл}} = I_{\text{кл}} / J_{\text{кл}} = 443 / 3535246,73 = 125 \cdot 10^{-6} \text{ (м}^2\text{)} = 125 \text{ мм}^2.$$

3.4.10.5. Розміри замикаючих кілець:

висота кільця

$$h_{\text{кл}} = 1,25 h_{\text{п2}} = 1,25 \cdot 0,0131 = 0,0164 \text{ м} = 16,4 \text{ мм};$$

ширина кільця

$$b_{\text{кл}} = q_{\text{кл}} / h_{\text{кл}} = 125 \cdot 10^{-6} / 0,0164 = 0,0076 \text{ м} = 7,6 \text{ мм.}$$

3.4.10.6. Площа поперечного переріза замикаючих кілець

$$q_{\text{кл}} = h_{\text{кл}} b_{\text{кл}} = 0,0164 \cdot 0,0076 = 0,000125 \text{ м}^2 = 125,00 \text{ мм}^2.$$

3.4.10.7. Середній діаметр замикаючих кілець

$$D_{\text{к.ср}} = D_2 - h_{\text{кл}} = 0,0939 - 0,0164 = 0,0775 \text{ м} = 77,5 \text{ мм.}$$

3.5. Розрахунок струму, що намагнічує.

Магнітопровод зі сталі 2013; товщина 0,5 мм.

3.5.1. Магнітна напруга повітряного зазору.

3.5.1.1. Коефіцієнти визначаються:

для статора

$$\gamma_1 = \frac{\left(\frac{b_{\text{ш1}}}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_{\text{ш1}}}{\delta}} = (3/0,3)^2 / (5 + 3/0,3) = 6,67;$$

для ротора з зубчатою поверхнею

					ПД 201.000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\gamma_2 = \frac{\left(\frac{b_{w2}}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_{w2}}{\delta}} = (1/0,3)^2 / (5 + 1/0,3) = 1,33,$$

для гладкої поверхні ротора приймаємо $\gamma_2 = 0$.

Приймаємо

$$\gamma_2 = 0.$$

3.5.1.2. Коефіцієнт повітряного зазору (коефіцієнт Картера) по (4.15)

$$k_{\delta 1} = \frac{t_1}{t_1 - \gamma_1 \delta} = 8,2 / (8,2 - 6,67 \cdot 0,3) = 1,32.$$

$$k_{\delta 2} = \frac{t_2}{t_2 - \gamma_2 \delta} = 6,7 / (6,7 - 0 \cdot 0,3) = 1,00.$$

$$k_{\delta} = k_{\delta 1} \cdot k_{\delta 2} = 1,32 \cdot 1,00 = 1,32$$

3.5.1.3. Магнітна напруга повітряного зазору по (8.103)

$$F_{\delta} = 1,59 \cdot 10^6 B_{\delta} k_{\delta} \delta F_{\delta} = 1,59 \cdot 10^6 \cdot 0,796 \cdot 1,32 \cdot 0,00030 = 501,19 \text{ А.}$$

3.5.2. Магнітна індукція в зубці статора з грушоподібними або трапецеїдальними пазами по (8.105) [21]

$$B_{z1} = \frac{B_{\delta} t_1 l_{\delta}}{b_{z1} l_{cm1} k_c} = 0,796 \cdot 0,0082 \cdot 0,059 / (0,00320 \cdot 0,059 \cdot 0,97) = 2,10 \text{ Тл.}$$

3.5.3. Магнітна індукція в зубці ротора з паралельними гранями по (8.109) [21]

$$B_{z2} = \frac{B_{\delta} t_2 l_{\delta}}{b_{z2} l_{cm2} k_c} = 0,796 \cdot 0,0067 \cdot 0,059 / (0,0032 \cdot 0,059 \cdot 0,97) = 1,72 \text{ Тл.}$$

3.5.4. Магнітна індукція в ярмі статора по (8.117) [21]

$$B_a = \frac{\Phi}{2h_a l_{cm1} k_c} = 0,002218 / (2 \cdot 0,01107 \cdot 0,059 \cdot 0,97) = 1,75 \text{ Тл.}$$

3.5.5. Магнітна індукція в ярмі ротора

3.5.5.1. Висота ярма ротора:

а) дійсна висота ярма ротора по (8.126)

									Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ПД 201.000.000 ПЗ				

$$h_j = \frac{D_2 - D_1}{2} - h_{n2} = (0,0939 - 0,032)/2 - 0,0131 = 0,0179 \text{ м} = 17,9 \text{ мм};$$

б) приймаємо діаметр вентиляційних каналів

$$d_k = 0 \text{ м},$$

кількість рядів

$$m_k = 0.$$

Розрахункова висота ярма ротора по (8.124) для чотирьохполюсних машин при $0,75(0,5D_2 - h_{n2}) = 0,75 \cdot (0,5 \cdot 0,0939 - 0,0131) = 0,0254 < 0,032$, а також для двополюсних машин,

$$h'_j = \frac{2+p}{3,2p} \left(\frac{D_2}{2} - h_{n2} \right) = (2+2)/(3,2 \cdot 2) \cdot (0,0939/2 - 0,0131) = 0,0212 \text{ м};$$

у протилежному випадку,

$$h'_j = \frac{D_2 - D_j}{2} - h_{n2} - \frac{2}{3} d_k m_k = (0,0939 - 0,032)/2 - 0,0131 - 2 \cdot 0 \cdot 0/3 = 0,0179 \text{ м}.$$

а також для шестипольсних машин, $h'_j = h_j$; отже, приймаємо

$$h'_j = 0,0212 \text{ м}.$$

3.5.5.2. Індукція в ярмі ротора по (8.122) [21]

$$B_a = \frac{\Phi}{2h_j l_{\omega} 2k_{\bar{n}}} = 0,002218 / (2 \cdot 0,0212 \cdot 0,059 \cdot 0,97) = 0,91 \text{ Тл}.$$

3.5.6. Напруженість магнітного поля в зубці статора для сталі 2013 по табл. П1.7 [22] для $B_{z1} = 2,10 \text{ Тл}$

$$H_{z1} = 5140 \text{ А/м}.$$

3.5.7. Напруженість магнітного поля в зубці ротора для сталі 2013 по табл. П1.7 [22] $H_{z2} = 1220 \text{ А/м}$ для $B_{z2} = 1,72 \text{ Тл}$

$$H_{z2} = 1220 \text{ А/м}.$$

3.5.8. Висота зубця статора

$$h_{z1} = h_{n1} = 0,00812 \text{ м}.$$

3.5.9. Висота зубця ротора

									Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

$$h_{z2} = h_{n2} - 0,1b_2 = 0,0131 - 0,1 \cdot 0,0018 = 0,0129 \text{ м.}$$

3.5.10. Магнітна напруга зубцової зони статора

$$F_{z1} = 2h_{z1}H_{z1} = 2 \cdot 0,00812 \cdot 5140 = 83,5 \text{ А.}$$

3.5.11. Магнітна напруга зубцової зони ротора

$$F_{z2} = 2h_{z2}H_{z2} = 2 \cdot 0,0129 \cdot 1220 = 31,5 \text{ А.}$$

3.5.12. Коефіцієнт насичення зубцової зони

$$k_z = 1 + \frac{F_{z1} + F_{z2}}{F_\delta} = 1 + (83,5 + 31,5) / 501,19 = 1,23.$$

3.5.13. Напруженість магнітного поля в ярмі статора для сталі 2013 по табл. П1.6 [22] для $B_a = 1,75$

$$H_a = 1500 \text{ А/м.}$$

3.5.14. Напруженість магнітного поля в ярмі ротора для сталі 2013 по табл. П1.6 [22] для $B_j = 0,91 \text{ Тл}$

$$H_j = 155 \text{ А/м.}$$

3.5.15. Довжина середньої магнітної силової лінії в ярмі статора по (8.119)

$$L_a = \frac{\pi(D - h_a)}{2p} = 3,14 \cdot (0,139 - 0,01107) / (2 \cdot 2) = 0,10043 \text{ м.}$$

3.5.16. Довжина середньої магнітної силової лінії в ярмі ротора по (8.127)

$$L_j = \frac{\pi(D_j + h_j)}{2p} = 3,14 \cdot (0,032 + 0,0179) / (2 \cdot 2) = 0,0392 \text{ м.}$$

3.5.17. Магнітна напруга ярма статора по (8.116)

$$F_a = L_a H_a = 0,10043 \cdot 1500 = 150,6 \text{ А.}$$

3.5.18. Магнітна напруга ярма ротора по (8.121)

$$F_j = L_j H_j = 0,0392 \cdot 155 = 6,1 \text{ А.}$$

3.5.19. Магнітна напруга на парі полюсів по (8.128)

$$F = F_\delta + F_{z1} + F_{z2} + F_a + F_j = 501,19 + 83,5 + 31,5 + 150,6 + 6,1 = 772,9 \text{ А.}$$

										Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

3.5.20. Коефіцієнт насичення магнітного ланцюга по (8.129)

$$k_{\mu} = \frac{F_u}{F_{\delta}} = 772,9/501,19 = 1,54.$$

3.5.21. Струм, що намагнічує, по (8.130)

$$I_{\mu} = \frac{pF_u}{0,9w_1mk_{об1}} = 2 \cdot 772,9 / (0,9 \cdot 780 \cdot 3 \cdot 0,95) = 0,77 \text{ А.}$$

3.5.22. Відносне значення струму, що намагнічує, по (8.130)

$$I_{\mu}^* = \frac{I_{\mu}}{I_{1H}} = 0,77/1,56 = 0,53.$$

3.6. Параметри робочого режиму

3.6.1. Активний опір фази обмотки статора

3.6.1.1. Довжина пазової частини котушки дорівнює конструктивній довжині сердечника статора:

$$l_{п1} = l_1 = 0,059 \text{ м.}$$

3.6.1.2. Середня ширина котушки, обумовлена по дузі окружності, що проходить по серединах висоти пазів,

$$b_{кт} = \pi (D + h_{п1}) \beta_{1/2} / p = 3,14 \cdot (0,0945 + 0,01118) \cdot 1 / (2 \cdot 2) = 0,08296 \text{ м,}$$

де β_1 - укорочення кроку обмотки.

3.6.1.3. Довжина вильоту прямолінійної частини котушки з паза від торця сердечника до початку відгину лобової частини, згідно стор. 334 [21]

$$B = 0,01 \text{ м.}$$

3.6.1.4. Вибираємо по табл. 8.21 [21] коефіцієнт для $2p = 2$ $K_L = 1,2$, для $2p = 4$ $K_L = 1,3$, отже,

$$K_n = 1,3 \text{ .}$$

3.6.1.5. Довжина лобової частини для котушки всипної обмотки по (8.136)

$$l_{л1} = K_L b_{кт} + 2B = 1,3 \cdot 0,08296 + 2 \cdot 0,01 = 0,128 \text{ м.}$$

									Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

3.6.1.6. Вибираємо по табл. 8.21 [21] коефіцієнт $K_{вил}$ для $2p = 2$

$K_{вил} = 0,26$, для $2p = 4$ $K_{вил} = 0,4$, отже,

$$K_{вил} = 0,4$$

3.6.1.7. Довжина вильоту лобової частини котушки по (8.137)

$$l_{вил} = K_{вил} b_{кт} + B = 0,4 \cdot 0,08296 + 0,01 = 0,04318 \text{ м} = 43,18 \text{ мм.}$$

3.6.1.8. Середня довжина витка обмотки по (8.135) [21]

$$l_{ср1} = 2(l_{п1} + l_{л1}) = 2 \cdot (0,059 + 0,128) = 0,374 \text{ м.}$$

3.6.1.9. Довжина провідників фази обмотки

$$L_1 = l_{ср} w_1 = 0,374 \cdot 780 = 291,7 \text{ м.}$$

3.6.1.10. Для класу нагrevостойкости ізоляції F розрахункова температура $\vartheta_{розр} = 115^\circ\text{C}$. Для міді питомий опір при розрахунковій температурі

$$\rho_{115} = 10^{-6}/41 \text{ Ом}\cdot\text{м.}$$

3.6.1.11. Активний опір фази обмотки статора

$$r_1 = \rho_{115} L_1 / (q_{\text{эф}} a) = 10^{-6} \cdot 291,7 / (0,1963 \cdot 10^{-6} \cdot 1,41) = 36,2 \text{ Ом,}$$

де a - число паралельних гілок фази обмотки статора.

3.6.1.12. Відносне значення опору фази обмотки статора

$$r_1^* = r_1 \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 36,2 \cdot 1,56 / \text{Ошибка!} \quad \text{Источник} \quad \text{ссылки} \quad \text{не}$$

найден. = 0,139 Ом.

3.6.1.13. Маса трехфазной обмотки статора

$$m_{м1} = 8900 \cdot 3 L_1 q_{\text{эф}} = 8900 \cdot 3 \cdot 291,7 \cdot 0,1963 \cdot 10^{-6} = 1,529 \text{ кг.}$$

3.6.2. Активний опір фази обмотки ротора.

За фазу обмотки ротора, виконаної у виді білячої клітки, приймають один стрижень і дві ділянки короткозамикаючих кілець.

3.6.2.1. Для литої алюмінієвої обмотки ротора питомий опір при розрахунковій температурі $\vartheta_{розр} = 115^\circ\text{C}$

$$\rho_{115} = \frac{10^{-6}}{20,5} \text{ Ом}\cdot\text{м.}$$

									Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

3.6.2.2. Активний опір стрижня по (8.169)

$$r_c = \rho_{115} \frac{l_2}{q_c} k_r = \frac{10^{-6}}{20,5} \cdot 0,059 / 0,00002979 = 96,61 \cdot 10^{-6} \text{ Ом},$$

де k_r - коефіцієнт збільшення активного опору стрижня від дії ефекту витиснення струму; при розрахунку робочих режимів у межах зміни ковзання від холостого ходу до номінального приймають $k_r=1$.

3.6.2.2. Активний опір ділянки замикаючого кільця, укладеного між двома сусідніми стрижнями, по (8.170)

$$r_{\text{кЛ}} = \rho_{115} \frac{\pi D_{\text{кЛ.ср}}}{Z_2 q_{\text{кЛ}}} = \frac{10^{-6}}{20,5} \cdot 3,14 \cdot 0,0775 / (44 \cdot 0,000125) = 2,158 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}.$$

3.6.2.3. Активний опір фази обмотки ротора по (8.168)

$$r_2 = \left(r_c + \frac{2r_{\text{кЛ}}}{\Delta^2} \right) = 96,61 \cdot 10^{-6} + 2 \cdot 2,158 \cdot 10^{-6} / 0,28^2 = 151,66 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}.$$

3.6.2.4. Приводимо r_2 до числа витків обмотки статора згідно (8.173)

$$r_2' = r_2 \frac{4m(\omega k_{об1})^2}{Z_2} = 151,66 \cdot 10^{-6} \cdot 4 \cdot 3 \cdot (780 \cdot 0,95)^2 / 44 = 22,71 \text{ Ом}.$$

3.6.2.5. Відносне значення

$$r_2'^* = r_2' \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 22,71 \cdot 1,56 / \text{Ошибка! Источник ссылки не найден.} = 0,08725$$

Ом.

3.6.3. Індуктивний опір фази обмотки статора

3.6.3.1. Коефіцієнт магнітної провідності пазового розсіювання по табл. 8.24, [21] рис. 8.50,е [21] (див. рис.3.4) визначається:

$h_1=0$ (провідники закріплені пазовою кришкою);

$$h_2 = h_{\text{нк}} - 2b_{\text{уз}} = 0,00812 - 2 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3} = 7,72 \text{ мм};$$

$$b_1 = 5,62 \text{ мм};$$

$$h_{\text{к}} = 0,5(b_1 - b_{\text{ул}} \cdot 10^3) = 0,5 \cdot (5,62 - 0,003 \cdot 10^3) = 1,31 \text{ мм};$$

										Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ПД 201.000.000 ПЗ					

$$k'_\beta = 0,25(1 + 3\beta_1) = 0,25(1 + 3 \cdot 1) = 1$$

$$k_\beta = 0,25(1 + 3 \cdot k'_\beta) = 0,25(1 + 3 \cdot 1) = 1;$$

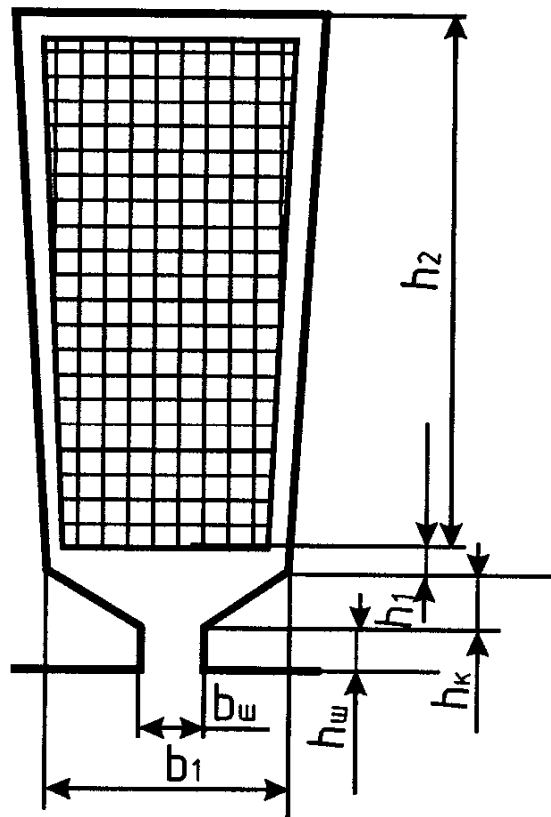
$$l'_\delta = l_\delta = 0,059 \text{ м};$$

$$\lambda_n = \frac{h_2}{3b_1} k_\beta + \left(\frac{h_1}{b_1} + \frac{3h_k}{b_1 + 2b_w} + \frac{h_w}{b_w} \right) k'_\beta = 0,00772 \cdot 1 / (3 \cdot 0,00562) + (0 / 0,00562 + 3 \cdot 0,00131 / (0,00562 + 2 \cdot 0,003) + 0,0005 / 0,003) \cdot 1 = 0,963.$$

3.6.3.2. Коефіцієнт магнітної провідності лобового розсіювання $\lambda_{л1}$ визначається по (8.159):

число пазів на полюс і фазу $q=3$, відношення укорочення кроку $\beta=1$;

$$\lambda_{л1} = 0,34 \frac{q}{l'_\delta} (l_\delta - 0,64\beta\tau) = 0,34 \cdot 3 \cdot (0,128 - 0,64 \cdot 1 \cdot 0,074) / 0,059 = 1,394.$$



									Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ПД 201.000.000 ПЗ				

Рис. 3.4. До розрахунку коефіцієнта магнітної провідності пазового розсіювання обмотки статора

3.6.3.3. Коефіцієнт магнітної провідності диференціального розсіювання $\lambda_{\partial 1}$ визначається по (8.160).

Оскільки скіс пазів відсутній, $\beta_{ск1}=0$, по кривих рис.8.51, д [21] в залежності від $t_2/t_1=0,0067/0,0082=0,82$ і $\beta_{ск}=0$ визначаємо значення

$$k'_{ск} = 0,5$$

коефіцієнт по (8.176)

$$\xi = 2k'_{ск} k_{\beta} - k_{об1}^2 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 (1 + \beta_{ск}) = 2 \cdot 1,00 \cdot 1 - 0,95^2 \cdot (0,0067 / 0,0082)^2 \cdot (1+0) = 0,393;$$

$$\lambda_{\partial 1} = \frac{t_1}{12\delta k_{\delta}} \xi = 0,0082 \cdot 0,393 / (12 \cdot 0,0003 \cdot 1,32) = 0,678.$$

3.6.3.4. Індуктивний опір фази обмотки статора по (8.152)

$$x_1 = 15,8 \frac{f_1}{100} \left(\frac{w_1}{100} \right)^2 \frac{l'_{\delta}}{pq} (\lambda_n + \lambda_l + \lambda_{\partial}) = 15,8 \cdot (\text{Ошибка! Источник ссылки не найден.} / 100) \cdot (780/100)^2 \cdot (0,059 / (2 \cdot 3)) \cdot (0,963 + 1,394 + 0,678) = 14,34 \text{ Ом.}$$

3.6.4. Відносне значення

$$x_1^* = x_1 \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 14,34 \cdot 1,56 / \text{Ошибка! Источник ссылки не найден.} = 0,055$$

3.6.4. Індуктивний опір фази обмотки ротора

3.6.4.1. Коефіцієнт магнітної провідності пазового розсіювання по табл. 8.25 [21] ,. рис. 8.52,а,ж [21] (див. рис.3.5) визначається:

									ПД 201.000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

$h_1 = 0,0098$ м; $b_1 = 0,0032$ м; $b_{uu} = 1 \cdot 10^{-3}$ м, $h_{ш} = 0,5 \cdot 10^{-3}$ мм, $h'_{ш} = 0,0003$ м, $q_c = 0,00002979$ м², $k_d = 1$ (для робочого режиму),

$$\lambda_{n2} = \left[\frac{h_1 + 0,4b_2}{3b_1} \left(1 - \frac{\pi b_1^2}{8q_c} \right) + 0,66 - \frac{b_{uu}}{2b} \right] k_d + \frac{h_{ш}}{b_{uu}} + 1,12 \frac{h'_{ш} \cdot 10^6}{I_2} = [(($$

$0,0098 + 0,4 \cdot 0,0018) / (3 \cdot 0,0032) \cdot (1 - 3,14 \cdot 0,0032^2 / (8 \cdot 0,00002979))^2 + 0,66 -$
 $1 \cdot 0,001 / (2 \cdot 0,0032)] \cdot 1 + 0,51 \cdot 10^{-3} / 110^{-3} + 1,12 \cdot 0,0003 \cdot 10^6 / 123,9 = 4,536.$

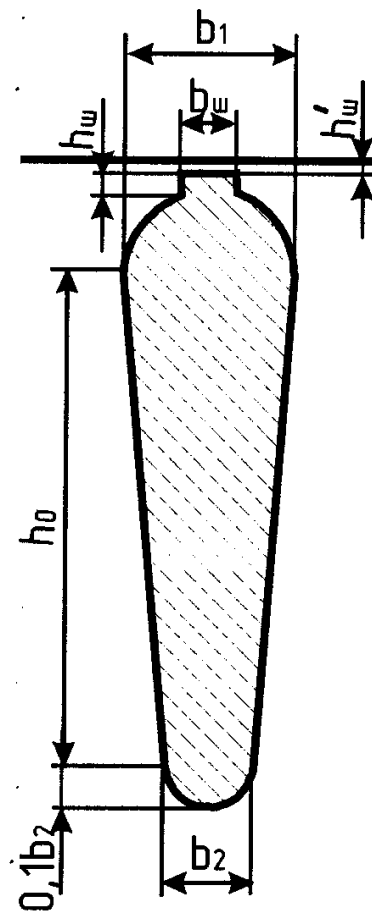


Рис.3.5. До розрахунку коефіцієнта магнітної провідності пазового розсіювання обмотки статора

3.6.4.2. Коефіцієнт магнітної провідності лобового розсіювання $\lambda_{л2}$ визначається по (8.178). Попередньо обчислимо

										Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

$$x = \frac{4,7D_{клсп}}{2b_{кл} + h_{кл}} = 4,7 \cdot 0,0775 / (2 \cdot 0,0076 + 0,0164) = 11,53,$$

обчислимо логаріфм

$$\lg x = \lg(11,53) = 1,062 \quad ,$$

потім

$$\lambda_{л2} = \frac{2,3D_{клсп}}{Z_2 l'_\delta \Delta^2} \lg \frac{4,7D_{клсп}}{2b_{кл} + h_{кл}} = 2,3 \cdot 0,0775 / (44 \cdot 0,059 \cdot 0,28^2) \cdot \lg(1,062) = 0,930.$$

3.6.4.3. Коефіцієнт магнітної провідності диференціального розсіювання $\lambda_{\partial 2}$ визначається по (8.181):

$$\xi = 1 + \frac{1}{5} \left(\frac{\pi p}{Z_2} \right)^2 - \frac{\Delta Z}{1 - \left(\frac{p}{Z_2} \right)^2} \approx 1,$$

тому що при великому числі пазів ротора, що приходяться на пари полюсів

$$\left(\frac{Z_2}{p} \geq 10 \right), \frac{1}{5} \left(\frac{\pi p}{Z_2} \right)^2 \approx 0 \text{ і } \Delta Z \approx 0 ;$$

$$\lambda_{\partial 2} = \frac{t_2}{12\delta k_\delta} \xi = 0,0067 \cdot 1 / (12 \cdot 0,0003 \cdot 1,32) = 1,410.$$

3.6.4.4. Для зменшення шуму і паразитних моментів у двигунів з короткозамкненим ротором застосовується скіс пазів на роторі, рівний одному зубцовому розподілові статора

$$b_{ск2} = t_1 = 0,0082 \text{ м,}$$

$b_{ск2}$ - скіс пазів, відлічений по дузі окружності ротора, м.

Скіс пазів у частках зубцового розподілу ротора

$$\beta_{ск} = \frac{t_1}{t_2} = 0,0082 / 0,0067 = 1,224.$$

тоді центральний кут скосу пазів ротора

										Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

$$\alpha_{ск} = \frac{2pb_{ск2}}{(D-2\delta)} = 2 \cdot 2 \cdot 0,0082 / (0,0945 - 2 \cdot 0,3 \cdot 10^{-3}) = 0,3493 \text{ рад.}$$

Коефіцієнт скосу паза враховує зменшення е.р.с., наведеної в одній з обмоток головним потоком іншої обмотки, тому він визначається аналогічно обмотувальному коефіцієнту розподілу обмотки ротора

$$k_{ор} = k_{ск}.$$

Коефіцієнт скосу розраховується

$$k_{ск} = \frac{2 \sin \frac{\alpha_{ск}}{2}}{\alpha_{ск}} = 2 \cdot \sin(0,3493/2) / 0,3493 = 1,00,$$

тому що синус малого аргументу (у радіанах) дорівнює малому аргументові.

Обмотувальний коефіцієнт обмотки ротора $k_{р2} = k_{ск} = 1,00$. При скошених пазах трохи зростає диференціальне розсіювання, тому що вищі гармоніки поля в цьому випадку менше заглушаються.

Коефіцієнт магнітної провідності скосу, що враховує вплив на ЕРС обмотки ротора скосу пазів

$$\lambda_{ск} = \frac{t_2}{12\delta k_{\delta} k_{\mu}} \beta_{ск}^2 = 0,0067 \cdot 1,224^2 / (12 \cdot 0,0003 \cdot 1,32 \cdot 1,54^2) = 0.$$

Якщо скіс пазів, відсутній $\lambda_{ск} = 0$. Приймаємо

$$\lambda_{ск} = 0.$$

3.6.4.5. Індуктивний опір фази обмотки ротора x_2 по (8.177)

$$\sum \lambda_2 = \lambda_{n2} + \lambda_{л2} + \lambda_{\delta 2} + \lambda_{ск} = 4,536 + 0,930 + 1,410 + 0 = 6,876,$$

тоді індуктивний опір фази обмотки ротора

$$x_2 = 7,9 f_1 l'_{\delta} (\lambda_{n2} + \lambda_{л2} + \lambda_{\delta 2} + \lambda_{ск}) \cdot 10^{-6} = 7,9 \cdot \text{Ошибка! Источник ссылки не найден.} \cdot 0,059 \cdot 6,876 \cdot 10^{-6} = 0,00016025 \text{ Ом.}$$

3.6.5. Приводимо x_2 до числа витків статора по (8.172) і (8.183)

										Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

$$x'_2 = x_2 \frac{4m(\omega_1 k_{об1})^2}{Z_2} = 0,00016025 \cdot 4 \cdot 3 \cdot (780 \cdot 0,95)^2 / 44 = 23,997 \text{ Ом.}$$

Відносне значення

$$x'_2^* = x'_2 \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 23,997 \cdot 1,56 / \text{Ошибка! Источник ссылки не найден.} = 0,092$$

3.7. Втрати в сталі

3.7.1. Втрати в сталі основні

3.7.1.1. Для сталі 2103 питомі втрати (табл.8.26) при індукції 1 Тл і частоті перемагнічування 50 Гц $p_{1,0/5,0} = 2,5 \text{ Вт/кг.}$

3.7.1.2. Коефіцієнт β – показник ступеня, що враховує залежність втрат у сталі від частоти перемагнічування; для більшості сталей $\beta = 1,3 \dots 1,5$, приймаємо $\beta = 1,5$ (стор. 348) [21].

3.7.1.3. Коефіцієнти $k_{да}$ і $k_{дз}$ враховують вплив на втрати в сталі нерівномірності розподілу магнітного потоку по перетинах ділянок магнітопровода і технологічних факторів, для машин потужністю менш 250 кВт $k_{да} = 1,6$, $k_{дз} = 1,8$ (стор. 348) [21].

3.7.1.4. Питома маса сталі $\gamma_c = 7800 \text{ кг/м}^3$.

3.7.1.5. Висота ярма статора по (8.177)

$$h_a = 0,5(D_a - D) - h_{n1} = 0,5 \cdot (0,139 - 0,0945) - 0,00812 = 0,01413 \text{ м.}$$

3.7.1.6. Маса сталі ярма статора по (8.188)

$$m_a = \pi(D_a - h_a)h_a l_{cm} k_c \gamma_c = \\ = 3,14 \cdot (0,139 - 0,01413) \cdot 0,01413 \cdot 0,059 \cdot 0,97 \cdot 7800 = 2,473 \text{ кг;}$$

3.7.1.7. Маса сталі зубців статора по (8.189)

$$m_{z1} = h_{z1} b_{z1cp} Z_1 l_{cm1} k_c \gamma_c = 0,00812 \cdot 0,00320 \cdot 36 \cdot 0,059 \cdot 0,97 \cdot 7800 = 0,418 \text{ кг.}$$

3.7.1.7. Втрати в сталі основні по (8.187)

$$P_{ст.осн} = p_{1,0/5,0} \left(\frac{f_1}{50}\right)^\beta \left(k_{да} B_a^2 m_a + k_{дз} B_{zcc}^2 m_{z1}\right) =$$

										Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

$$=2,5 \cdot (\text{Ошибка! Источник ссылки не найден./50})1,5 \cdot (1,6 \cdot 1,75^2 \cdot 2,473 + 1,8 \cdot 2,10^2 \cdot 0,418) = 38,59 \text{ Вт.}$$

3.7.2. Поверхневі втрати в сталі ротора від зубців статора (втрати в поверхневому шарі ротора від пульсацій магнітної індукції в повітряному зазорі)

3.7.2.1. Визначимо по рис. 8.53 [21] для

$$\frac{b_{ш}}{\delta} = 0,003 / 0,0003 = 10,00$$

$$\beta_{02} = 0,4 \quad ,$$

3.7.2.2. Амплітуда пульсації індукції в повітряному зазорі над коронками зубців ротора по (8.190)

$$B_{02} = \beta_{02} k_{\delta} B_{\delta} = 0,4 \cdot 1,32 \cdot 0,796 = 0,420 \text{ Тл.}$$

3.7.2.3. Коефіцієнт k_{02} , що враховує вплив обробки поверхні голівок зубців статора на питомі втрати в роторі; якщо поверхня не обробляється (двигуни потужністю до 160 кВт) $k_{02} = 1,4 - 1,8$, приймаємо $k_{02} = 1,5$.

3.7.2.4. Питомі поверхневі втрати в сталі ротора, що приходять на 1 м^2 поверхні голівок зубців ротора, по (8.192)

$$p_{пов2} = 0,5 k_{02} \left(\frac{Z_1 n_1}{10000} \right)^{1,5} \left(B_{02} t_1 \cdot 10^3 \right)^2 = 0,5 \cdot 1,5 \cdot (36 \cdot \text{Ошибка! Источник ссылки не найден./10000})^{1,5} \cdot$$

$$\bullet (0,420 \cdot 0,0082 \cdot 1000)^2 = 111,629 \text{ Вт/м}^2.$$

3.7.2.5. Повні поверхневі втрати в сталі ротора по (8.194)

$$P_{пов2} = p_{пов2} (t_2 - b_{ш2}) Z_2 l_{cm2} = 111,629 \cdot (0,0067 - 1 \cdot 10^{-3}) \cdot 44 \cdot 0,059 = 1,652 \text{ Вт.}$$

3.7.3. Пульсаційні втрати в зубцях ротора (втрати від пульсацій індукції в зубцях)

3.7.3.1. Амплітуда пульсацій індукції в середньому перерізі зубців $B_{нул2}$: $\gamma_1 = 6,67$ по п. 3.5.1.1 розрахунку;

									Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ПД 201.000.000 ПЗ				

$$B_{нул2} = \frac{\gamma_1 \delta}{2t_2} B_{z2cp} = 6,67 \cdot 0,000 \cdot 1,72 / (2 \cdot 0,0067) = 0,257 \text{ Тл,}$$

де B_{z2cp} - по п. 3.5.3 розрахунки.

3.7.3.2. Маса стали зубців ротора по (8.201)

$$m_{z2} = Z_2 h_{z2} b_{z2cp} l_{ст2} k_c \gamma_c = 44 \cdot 0,0129 \cdot 0,0032 \cdot 0,059 \cdot 0,97 \cdot 7800 = 0,811 \text{ кг.}$$

3.7.3.3. Пульсационные втрати в зубцах ротора по (8.200)

$$P_{нул2} = 0,11 \left(\frac{Z_1 n}{1000} B_{нул2} \right)^2 m_{z2} = 0,11 \cdot (36 \cdot \text{Ошибка! Источник ссылки не найден.} \cdot 0,257 / 1000)^2 \cdot 0,811 = 17,182 \text{ Вт.}$$

3.7.4. Сума додаткових втрат у сталі

$$P_{ст.доб} = P_{нов2} + P_{нул2} = 1,652 + 17,182 = 18,834 \text{ Вт.}$$

3.7.5. Повні втрати в сталі

$$P_{ст} = P_{ст.осн} + P_{ст.доб} = 38,59 + 18,834 = 57,4 \text{ Вт.}$$

3.7.6. Механічні втрати по (8.200):

для двигунів $2p=4$ коефіцієнт $K_T = 1$,

отже,

$$P_{мех} = K_T \left(\frac{n}{10} \right)^2 D_a^4 = 1 \cdot (\text{Ошибка! Источник ссылки не найден.} / 10)^2 \cdot 0,139^4 = 8,399 \text{ Вт.}$$

3.7.7. Холостий хід двигуна

3.7.7.1. Електричні втрати в статорі при холостому ході по (8.219)

$$P_{элхх} = m I_{\mu}^2 r_1 = 3 \cdot 0,77^2 \cdot 36,2 = 64,39 \text{ Вт.}$$

										Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

3.7.7.2. Активна складового струму холостого ходу по (8.218)

$$I_{xxa} = \frac{P_{ст} + P_{мех} + P_{\epsilon 1xx}}{m \cdot U_{1н}} = (57,4 + 8,399 + 64,39) / (3 \cdot \text{Ошибка! Источник ссылки не найден.}) = 0,114 \text{ А.}$$

3.7.7.3. Струм холостого ходу по (8.217)

$$I_{xx} = \sqrt{I_{xxa}^2 + I_{\mu}^2} = (0,114^2 + 0,77^2)^{1/2} = 0,78 \text{ А.}$$

3.8. Розрахунок робочих характеристик

3.8.1. Методи розрахунку характеристик базуються на системі рівнянь струмів і напруг асинхронної машини, якої відповідає Г-образна схема заміщення (рис. 3.6). Активні й індуктивні опори схеми заміщення є параметрами машини.

3.8.1.1. Активний опір взаємної індукції обмоток статора і ротора по (8.184)

$$r_{12} \approx \frac{P_{ст.осн}}{m I_{\mu}^2} = 38,59 / (3 \cdot 0,77^2) = 21,7 \text{ Ом.}$$

3.8.1.2. Індуктивний опір взаємної індукції обмоток статора і ротора по (8.185)

					ПД 201.000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$x_{12} \cong \frac{U_{1H}}{I_{\mu}} - x_1 = (0,77) - 14,34 = 479,2$$

Ом;

3.8.1.3. Коефіцієнт c_1 по (8.223)

$$c_1 = 1 + \frac{x_1}{x_{12}} = 1 + 14,34/479,2 = 1,030.$$

3.8.1.4. Активна складового струму синхронного холостого ходу

$$I_{0a} = \frac{P_{ст.осн} + 3I_{\mu}^2 r_1}{3U_{1H}} = (38,59 + 3 \cdot 0,77^2 \cdot 36,2) / (3 \cdot 0,77) = 0,090 \text{ А.}$$

3.8.1.5. Коефіцієнти:

$$a' = c_1^2 = 1,030^2 = 1,061;$$

$$b = 0;$$

$$a = c_1 r_1 = 1,030 \cdot 36,2 = 37,286;$$

$$b = c_1 (x_1 + c_1 x_2) = 1,030 \cdot (14,34 + 1,030 \cdot 23,997) = 40,229.$$

3.8.1.6. Утрати, що не міняються при зміні ковзання,

$$P_{ст} + P_{мех} = 57,4 + 8,399 = 65,799 \text{ Вт} = 0,066 \text{ кВт.}$$

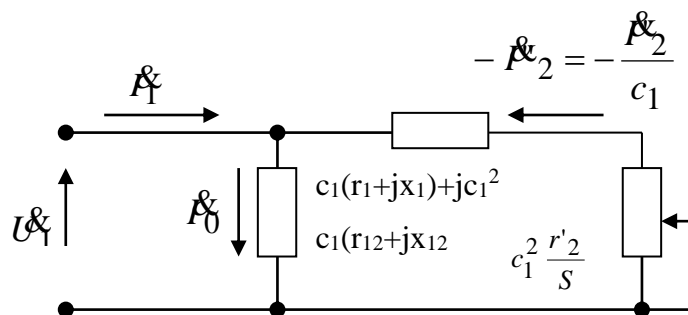


Рис. 3.6. Г-образна схема заміщення приведеної асинхронної машини

					ПД 201.000.000 ПЗ		Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

3.8.2. Застосовуємо аналітичний метод розрахунку робочих характеристик (формули для розрахунку приведені в табл. 3.2). Розрахунок характеристик проводимо, задаючи значеннями ковзань $S=(0,2\div 1,5)S_n$. Номінальне ковзання попереднє приймаємо $S_n \approx \tau_2^* = 0,08725$. Для побудови характеристик досить розрахувати значення необхідних величин для п'яти-шести різних ковзань, обраних у зазначеному діапазоні приблизно через рівні інтервали. Результати розрахунку приведені в табл. 3.2. Робочі характеристики побудовані на кресленні.

					ПД 201.000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.2.

Робочі характеристики асинхронного двигуна

№ п/п	Розрахункова Формула	Ед.	Ковзання ротора					
			0,01	0,02	0,04	0,05	0,0855	0,075
1	$a'r_2' / s$	Ом	2409,531 0	1204,76 55	602,382 8	481,9062	281,8165	321,270 8
2	$b'r_2' / s$	Ом	0,000000	0,00000 0	0,00000 0	0,000000	0,000000	0,00000 0
3	$R = a + a'r_2' / s$	Ом	2446,817	1242,05 2	639,67	519,19	319,103	358,557
4	$X = b + b'r_2' / s$	Ом	40,23	40,23	40,23	40,23	40,23	40,23
5	$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	Ом	2447,15	1242,70	640,93	520,75	321,63	360,81
6	$I''_2 = U_1' / Z$	А	0,155	0,306	0,593	0,730	1,181	1,053
7	$\cos \varphi'_2 = R / Z$	—	1,000	0,999	0,998	0,997	0,992	0,994
8	$\sin \varphi'_2 = X / Z$	—	0,016	0,032	0,063	0,077	0,125	0,111
9	$I_{1a} = I_{0a} + I''_2 \cos \varphi'_2$	А	0,245	0,396	0,682	0,818	1,262	1,137
10	$I_{1p} = I_{0p} + I''_2 \sin \varphi'_2$	А	0,7725	0,7798	0,8074	0,8262	0,9176	0,8869
11	$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}$	А	0,8104	0,8746	1,0569	1,1626	1,560	1,4420
12	$I'_2 = c_1 I''_2$	А	0,1597	0,3152	0,6108	0,7519	1,2164	1,0846
13	$P_1 = 3U_1' I_{1a} \cdot 10^{-3}$	кВт	0,2793	0,4514	0,7775	0,9325	1,4387	1,2962
14	$P_{\varepsilon 1} = 3I_1^2 r_1 \cdot 10^{-3}$	кВт	0,0713	0,0831	0,1213	0,1468	0,2643	0,2258
15	$P_{\varepsilon 2} = 3I_2'^2 r_2' \cdot 10^{-3}$	кВт	0,002	0,0068	0,0254	0,0385	0,1008	0,0801
16	$P_{\text{дооб}} = 0,005 \cdot P_1$	кВт	0,0014	0,0023	0,0039	0,0047	0,0072	0,0065
17	$\sum P = P_{\text{см}} + P_{\text{мех}} + P_{\varepsilon 1} + P_{\varepsilon 2} + P_{\text{дооб}}$	кВт	0,1407	0,1582	0,2166	0,2560	0,4383	0,3784
18	$P_2 = P_1 - \sum P$	кВт	0,139	0,293	0,561	0,677	1,000	0,918
19	$P_2 / P_{2н}$	О.е.	0,139	0,293	0,561	0,677	1,000	0,918
20	$I_1 / I_{1н}$		0,519	0,561	0,678	0,745	1,000	0,924
21	$\eta = 1 - \sum P / P_1$	—	0,496	0,650	0,721	0,725	0,72	0,708
22	$\cos \varphi = I_{1a} / I_1$	—	0,302	0,453	0,645	0,704	0,809	0,788
23	$10s$		0,1	0,2	0,4	0,5	0,855	0,75

ПД 201.000.000 ПЗ

Арк.

Зм. Арк. № докум. Підпис Дата

Номинальні дані спроектованого двигуна визначаються по побудованим робочим характеристикам:

$P_{2H}=1\text{кВт}$; $U_{1нф}=\text{Ошибка! Источник ссылки не найден.У}$; $I_{1H}=1,56\text{А}$; $\cos\varphi = 0,809$; $\eta = 0,72$; $s_H = 0,0855$.

Номинальна частота обертання вала

$$n_H = n_1 \cdot (1 - S_H) = \text{Ошибка! Источник ссылки не найден.} \cdot (1 - 0,0855) = 1372 \text{ об/хв;}$$

Номинальний момент на валу двигуна

$$M_H = 9575 \frac{P_{2H}}{n_H} = 9575 \cdot 1 / 1372 = 6,979 \text{ Нм.}$$

3.9. Розрахунок пускових характеристик

Розрахунок пускових характеристик здійснений з урахуванням зміни параметрів, викликаних ефектом витиснення струму і насиченням від полів розсіювання, тому що при великих ковзаннях ротора струми в обмотках статора і ротора можуть перевищувати своє номінальне значення в 7-7,5 рази. Докладний розрахунок приведений для ковзання ротора $s=1$. Розрахунок пускових характеристик з урахуванням впливу ефекту витиснення струму приведений у табл.3.3. Розрахунок пускових характеристик АМВ з урахуванням впливу витиснення струму в роторі і насичення від полів розсіювання приведений у табл.3.4.

Пускові характеристики спроектованого двигуна з урахуванням впливу витиснення струму в роторі і насичення від полів розсіювання представлені на рис. 3.4.

Розрахунок пускових характеристик з урахуванням зміни параметрів, викликаних ефектом витиснення струму (без урахування впливу насичення від полів розсіювання).

3.9.1. Активний опір обмотки ротора з урахуванням впливу ефекту витиснення струму ($b_c/b_n=1$, $\vartheta_{розр}=115^\circ\text{C}$).

3.9.1.1. Висота стрижня в пазу згідно рис. 3.3

					ПД 201.000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$h_c = h_n - (h_{ш} + h'_{ш}) = 0,0131 - (0,5 + 0,3) \cdot 10^{-3} = 0,0123 \text{ м.}$$

3.9.1.2. «Приведена висота» стрижня (8.241) [21]

$$\xi = 2\pi h_c \sqrt{\frac{b_c}{b_n} \frac{f_2}{\rho_v}} \cdot 10^{-7} = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,0123 \cdot (\text{Ошибка! Источник ссылки не найден} \cdot 10^{-7} / 0,00000004878)^{0,5} = 0,78,$$

де b_c і b_n - ширина стрижня і ширина паза, м; у роторах з литий обмоткою $b_c = b_n$;

f_2 - частота струму в розрахунковому режимі , Гц;

ρ_v -питомий опір матеріалу стрижня при розрахунковій температурі

$$t_{розр} = 115^\circ\text{C};$$

для литої алюмінієвої обмотки маємо

$$\xi = 63,6 h_c \sqrt{s} = 63,6 \cdot 0,0123 \cdot \sqrt{1} = 0,78$$

отже, $\xi = 0,78 \sqrt{s}$; для $s = 1$ $\xi = 0,78$.

3.9.1.3. По рис. 8.57 [1] для $\xi = 0,78$

$$\varphi = 0,03 ,$$

3.9.1.4. Глибина проникнення струму по (8.246)

$$h_r = \frac{h_c}{1 + \varphi} = 0,0123 / (1 + 0,03) = 0,0119 \text{ м.}$$

3.9.1.5. При $\frac{b_1}{2} \leq h_r \leq h_1 + \frac{b_1}{2}$ $0,0032/2 \leq 0,0119 \leq 0,0098 + 0,0032/2$

$$0,0016 \leq 0,0119 \leq 0,0065$$

(см. мал. 3.3) визначаємо по (8.253)

$$b_r = b_1 - \frac{b_1 - b_2}{h_1} \left(h_r - \frac{b_1}{2} \right) = 0,0032 - (0,0032 - 0,00562) \cdot (0,0119 - 0,0032/2) /$$

$$0,0098 = 0,00173 \text{ м.}$$

3.9.1.6. Площа перерізу, обмеженого висотою h_r ,

									Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ПД 201.000.000 ПЗ				

$$q_r = \frac{\pi b_1^2}{8} + \frac{b_1 + b_r}{2} \left(h_r - \frac{b_1}{2} \right) = 3,14 \cdot 0,0032^2/8 + (0,0032 + 0,00173) \cdot (0,0119 - 0,0032/2)/2 = 0,0000294 \text{ м}^2.$$

3.9.1.7. При $h_r > h_1 + \frac{b_1}{2}$ приймають $q_r = q_s$.

по (8.247) коефіцієнт

$$k_r = q_c/q_r = 0,00002979/0,0000294 = 1,01,$$

де q_c по п.4.8 розрахунку.

3.9.1.8. Коефіцієнт загального збільшення активного опору фази обмотки ротора під впливом ефекту витиснення струму

$$K_R = 1 + (r'_c/r_2)(k_r - 1) = 1 + (0,00009661/0,00015166) \cdot (1,01 - 1) = 1,01,$$

де $r'_c = r_c = 0,00009661 \text{ Ом}$.

3.9.1.8. Приведений активний опір ротора з урахуванням впливу ефекту витиснення струму

$$r'_{2\xi} = K_R r'_2 = 1,01 \cdot 22,71 = 22,937 \text{ Ом}.$$

3.9.2. Індуктивний опір обмотки ротора з урахуванням впливу ефекту витиснення струму для $s = 1$.

3.9.2.1. По рис. 8.58 [21] для $\xi = 0,78$ знаходимо

$$\varphi' = k_\partial = 0,98,$$

3.9.2.2. Коефіцієнти

$$\lambda'_{n2} = \frac{h_1 + 0,4b_2}{3b_1} \left(1 - \frac{\pi b_1^2}{8q_c} \right) + 0,66 - \frac{b_{ш}}{2b} = ((0,0098 + 0,40,0018)/(3 \cdot 0,0032) \cdot (1 -$$

$$- 3,14 \cdot 0,0032^2/(8 \cdot 0,00002979))^2 + 0,66 - 1 \cdot 0,001/(2 \cdot 0,0032) = 1,324$$

$$\Delta \lambda_{n2\xi} = \lambda'_{n2} (1 - k_\partial) = 1,324(1 - 0,98) = 0,026.$$

3.9.2.3. Коефіцієнт магнітної провідності пазового розсіювання з обліком ефекту витиснення струму

$$\lambda_{n2\xi} = \lambda_{n2} - \Delta \lambda_{n2\xi} = 4,536 - 0,026 = 4,51.$$

3.9.2.4. Коефіцієнт зменшення індуктивного опору фази обмотки ротора від дії ефекту витиснення струму

									Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

$$K_x = \frac{\lambda_{П2\xi} + \lambda_{Л2} + \lambda_{Д2}}{\lambda_{П2} + \lambda_{Л2} + \lambda_{Д2}} = (4,51+0,930+1,410)/(4,536+0,930+1,410) = 0,996.$$

3.9.2.5. Приведений індуктивний опір фази обмотки ротора з урахуванням ефекту витиснення струму

$$x'_{2\xi} = K_x x'_2 = 0,996 \cdot 23,997 = 23,901 \text{ Ом.}$$

3.9.3. Пускові параметри по (8.277) і (8.278)

$$x_{12n} = k_\mu x_{12} = 1,54 \cdot 479,2 = 738,0 \text{ Ом;}$$

$$c_{1n} = 1 + x_1/x_{12n} = 1 + 14,34/738,0 = 1,019.$$

3.9.4. Розрахунок струмів з урахуванням ефекту витиснення струму.

3.9.4.1. Активний і індуктивний опори по (8.280) для $s = 1$:

$$R_n = r_1 + c_{1n} \frac{r'_{2\xi}}{s} = 36,2 + 1,019 \cdot 22,937 = 59,573 \text{ Ом.}$$

$$X_n = x_1 + c_{1n} x'_{2\xi} = 14,34 + 1,019 \cdot 23,901 = 38,695 \text{ Ом.}$$

3.9.4.2. Приведений струм ротора по (8.281)

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{R_n^2 + X_n^2}} = \text{Ошибка! Источник ссылки не$$

$$\text{найден.} / (59,573^2 + 38,695^2)^{1/2} = 5,35 \text{ А}$$

3.9.4.3. Струм статора по (8.283)

$$I_{1n} = I'_2 \frac{\sqrt{R_n^2 + (X_n + x_{12n})^2}}{c_{1n} x_{12n}} =$$

$$5,35 (59,573^2 + (38,695 + 738,0)^2)^{1/2} / (1,019 \cdot 738,0) = 5,542 \text{ А.}$$

3.9.4.4. Кратність пускового струму

$$I_{1n}^* = \frac{I_{1n}}{I_{1H}} = 5,542 / 1,56 = 3,55.$$

3.9.4.5. Кратність пускового моменту

$$M^* = \left(\frac{I'_2}{I'_2'} \right)^2 K_R \frac{s_H}{s} = (5,35 / 1,2164)^2 \cdot 1,01 \cdot 0,0855 / 1 = 1,67.$$

									Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

Розрахунок пускових характеристик з урахуванням впливу витиснення струмові і насичення від полів розсіювання.

Оскільки $I_{1паза} = I_{1max} \cdot u_{п} / a = 5,4 \cdot 130 / 1 = 702,00 > 400 \text{ А}$, необхідно врахувати вплив насичення від полів розсіювання на пускові характеристики.

Розрахунок проведено для точок характеристик, що відповідають $s=1; 0,8; 0,5; 0,2; 0,1$, при цьому використовуємо значення струмів і опорів для тих же ковзань з урахуванням впливу струму (див. табл. 3.3).

Дані розрахунку приведені в табл.3.4. Докладний розрахунок приведено для $s=1$.

3.9.5. Індуктивні опори обмоток.

Приймаємо

$$k_{нас} = 1,5 \quad .$$

3.9.5.1. Середня магніторушійна сила (МРС) обмотки, віднесена до одного паза обмотки статора по (8.263)

$$F_{n.cр} = 0,7 \frac{I_{1n} k_{нас} u_{n1}}{a} (k'_{\beta} + k_{y1} k_{об1} \frac{Z_1}{Z_2}) = 0,7 \cdot 5,542 \cdot 1,5 \cdot 127 / 1 \cdot$$

$$(1 + 1 \cdot 0,95 \cdot 36 / 44) = 1313 \text{ А.}$$

3.9.5.2. По (8.265) визначаємо коефіцієнт

$$C_N = 0,64 + 2,5 \sqrt{\frac{\delta}{t_{Z_1} + t_{Z_2}}} = 0,64 + 2,5 \cdot (0,3 / (8,2 + 6,7))^{0,5} = 0,995.$$

Фіктивна індукція потокові розсіювання в повітряному зазорі по (8.264)

$$B_{\phi\delta} = \frac{F_{ncр} \cdot 10^{-6}}{1,6 \cdot \delta \cdot C_N} = 1313 \cdot 10^{-6} / (1,6 \cdot 0,3 \cdot 10^{-3} \cdot 0,995) = 2,75 \text{ Тл.}$$

3.9.5.3. За значенням $B_{\phi\delta}$ по рис. 8.61 для $B_{\phi\delta} = 2,75 \text{ Тл}$ знаходимо відношення потокові розсіювання при насиченні до потокові розсіювання ненасиченої маши

										Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ПД 201.000.000 ПЗ					

$$\chi_{\delta} = 0,7$$

3.9.5.4. Значення додаткового еквівалентного розкриття пазів статора, магнітні напруги яких еквівалентні МРС насичених вусиків зубців по (8.266)

$$c_{e1} = (t_1 - b_{u1})(1 - \chi_{\delta}) = (0,0082 - 0,003)(1 - 0,7) = 0,0016 \text{ м.}$$

3.9.5.5. Зменшення коефіцієнта магнітної провідності розсіювання напівзакритого паза, викликане насиченням від полів розсіювання по (8.269)

$$\Delta\lambda_{n1нас} = \frac{h_{u1} + 0,58(b_1 - b_{u1})/2}{b_{u1}} \frac{c_{e1}}{c_{e1} + 1,5b_{u1}} = (0,0005 + 0,58 \cdot (0,00562 - 0,003)/2) \cdot 0,0016 / (0,003 \cdot (0,0016 + 1,5 \cdot 0,003)) = 0,11.$$

3.9.5.6. Коефіцієнт магнітної провідності пазового розсіювання обмотки статора з урахуванням впливу насичення по (8.272)

$$\lambda_{n1нас} = \lambda_{n1} - \Delta\lambda_{n1нас} = 0,963 - 0,11 = 0,853.$$

3.9.5.7. Коефіцієнт магнітної провідності диференціального розсіювання обмотки статора з урахуванням впливу насичення по (8.274)

$$\lambda_{\delta 1нас} = \chi_{\delta} \lambda_{\delta 1} = 0,7 \cdot 0,678 = 0,475.$$

3.9.5.8. Індуктивний опір фази обмотки статора з урахуванням впливу насичення по (8.275)

$$X_{1нас} = x_1 \frac{\sum \lambda_{1нас}}{\sum \lambda_1} =$$

$$= 14,34 \cdot (0,853 + 1,394 + 0,475) / (0,963 + 1,394 + 0,678) = 12,861 \text{ Ом.}$$

3.9.5.9. Значення додаткового еквівалентного розкриття пазів ротора, магнітні напруги яких еквівалентні МРС насичених вусиків зубців по (8.270)

$$c_{e2} = (t_2 - b_{u2})(1 - \chi_{\delta}) = (0,0067 - 1 \cdot 10^{-3})(1 - 0,7) = 0,0017 \text{ м.}$$

3.9.5.10. Зменшення коефіцієнта магнітної провідності розсіювання закритого паза ротора, викликане насиченням від полів розсіювання по (8.271)

										Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

$$\Delta\lambda_{n2нас} = \frac{(h'_{u1} + h_{u1}) \cdot c_{\Sigma 2}}{b_{u2}(c_{e2} + b_{u2})} = (0,3+0,5) \cdot 0,0017 \cdot 1000 / (1 \cdot (0,0017 \cdot 1000 + 1)) = 0,5049.$$

3.9.5.11. Коефіцієнт магнітної провідності диференціального розсіювання обмотки ротора з урахуванням впливу насичення по (8.273)

$$\lambda_{n2нас} = \lambda_{n2} - \Delta\lambda_{n2нас} = 4,51 - 0,504 = 4,006.$$

3.9.5.12. Коефіцієнт магнітної провідності диференціального розсіювання обмотки статора з урахуванням впливу насичення по (8.274)

$$\lambda_{d2нас} = \chi_{\delta} \lambda_{d2} = 0,7 \cdot 1,410 = 0,987.$$

3.9.5.13. Індуктивний опір фази обмотки ротора з урахуванням впливу насичення по (8.276)

$$X_{2\zetaнас} = x_2 \frac{\sum \lambda_{2\zetaнас}}{\sum \lambda_2} = 23,997 \cdot (4,006 + 0,987 + 0,930) / (4,536 + 1,410 + 0,930) =$$

20,671 Ом.

3.9.5.14. Коефіцієнт по (8.278)

$$c_{1nнас} = 1 + \frac{x_{1нас}}{x_{12n}} = 1 + 12,861 / 738,0 = 1,017$$

3.9.6. Розрахунок струмів і моментів.

3.9.6.1. Активна й індуктивна складові комплексного опору правої галузі схеми заміщення (див. рис. 3.6) по (8.280) для $s = 1$:

$$R_n = r_1 + c_{1n} \frac{r'_{2\xi}}{S} = 36,2 + 1,017 \cdot 22,937 = 59,527 \text{ Ом,}$$

$$X_n = x_1 + c_{1n} x'_{2\xi} = 12,861 + 1,017 \cdot 20,671 = 33,883 \text{ Ом.}$$

3.9.6.2. Приведень струм в обмотці ротора по (8.281)

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{R_n^2 + X_n^2}} = \text{Ошибка! Источник ссылки не най-}$$

$$\text{ден.} / (59,527^2 + 33,883^2)^{1/2} = 5,5 \text{ А.}$$

									Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

3.9.6.3. Струм обмотки статора по (8.283)

$$I_{1n} = I'_2 \frac{\sqrt{R_n^2 + (X_n + x_{12n})^2}}{c_{1n} x_{12n}} = 5,5 \cdot (59,527^2 + (33,883 + 738,0)^2)^{1/2} /$$

/(1,017 • 738,0) = 5,7 А.

3.9.6.4. Кратність пускового струмові

$$I_{1n}^* = \frac{I_{1n}}{I_{1H}} = 5,7 / 1,56 = 3,65.$$

3.9.6.5. Кратність пускового моменту

$$M^* = \left(\frac{I'_2}{I'_2'} \right)^2 K_R \frac{s_H}{s} = (5,5 / 1,2164)^2 \cdot 1,01 \cdot 0,0855 / 1 = 1,77.$$

3.9.6.6. Отриманий у розрахунку коефіцієнт насичення

$$k'_{нас} = \frac{I_{1нас}}{I_{1n}} = 5,7 / 5,542 = 1,0285,$$

відрізняється від прийнятого менш чим на 3%.

3.9.7. З порівняння (9.4.4), (9.6.4) та (9.4.5), (9.6.5) впливає висновок, що вплив насичення від полів розсіювання на параметри ротора збільшує пусковий струм для $s = 1$ в $3,65 / 3,55 = 1,03$ рази,

пусковий момент у $1,77 / 1,67 = 1,06$ рази

3.9.8. Для розрахунку інших точок характеристики задаємося $k_{нас}$, зменшеним у залежності від струмові I_1 (див. табл. 3.4).

Дані розрахунку зведені в табл. 3.4, а пускові характеристики представлені на кресленні.

										Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ПД 201.000.000 ПЗ					

Таблиця 3.3.

Розрахунок пускових характеристик з урахуванням впливу ефекту витиснення струму

№ п/п	Розрахункова формула	Од.	Ковзання, s						
			1	0,8	0,5	0,2	0,1	0,05	0,66
1	$\xi=0,78\sqrt{s}$		0,78	0,70	0,55	0,35	0,25	0,17	0,63
2	$\varphi(\xi)$		0,33	0,2	0,1	0,05	0,04	0,03	0,048
3	$h_r = \frac{h_c}{1 + \varphi}$	ММ	9,2	10,3	11,2	11,7	11,8	11,9	11,7
4	$b_r = b_1 - \frac{b_1 - b_2}{h_1} \left(h_r - \frac{b_1}{2} \right)$	ММ	2,11	1,96	1,83	1,76	1,74	1,73	1,76
5	$q_r = \frac{\pi b_1^2}{8} + \frac{b_1 + b_r}{2} \left(h_r - \frac{b_1}{2} \right)$	мм ²	24,20	26,47	28,16	29,07	29,21	29,41	29,07
6	$k_r = q_c / q_r$		1,23	1,13	1,06	1,02	1,02	1,01	1,02
7	$K_R = 1 + \frac{r_c}{r_2} (k_r - 1)$		1,15	1,08	1,04	1,01	1,01	1,01	1,01
8	$r'_2 \xi = K_R r'_2$		26,11 7	24,52 7	23,61 8	22,937	22,937	22,937	22,937
9	$k_\partial = \varphi'(\xi)$		0,9	0,92	0,96	0,97	0,98	0,99	0,975
10	$\Delta \lambda_{n2\xi} = \lambda'_{n2} (1 - k_\partial)$		0,13	0,11	0,05	0,04	0,03	0,01	0,03
11	$\lambda_{n2\xi} = \lambda_{n2} - \Delta \lambda_{n2\xi}$		4,41	4,43	4,49	4,50	4,51	4,53	4,51
12	$K_x = \frac{\sum \lambda_{2\xi}}{\sum \lambda_2}$		0,98	0,98	0,99	0,99	1,00	1,00	1,00
13	$x'_{2\xi} = K_x x'_2$		23,51 7	23,51 7	23,75 7	23,757	23,997	23,997	23,997
14	$R_n = r_1 + c_{1n} \frac{r'_2 \xi}{S}$		62,81 3	67,44 1	84,33 3	153,064	269,92 8	503,65 6	71,613
15	$X_n = x_1 + c_{1n} x'_{2\xi}$		38,30 4	38,30 4	38,54 8	38,548	38,793	38,793	38,793
16	$I'_2 = \frac{U_{1НОМ}}{\sqrt{R_n^2 + X_n^2}}$		5,2	4,9	4,1	2,4	1,4	0,8	4,7
17	$I_1 = I'_2 \frac{\sqrt{R_n^2 + (X_n + x_{12n})^2}}{c_{1n} x_{12n}}$		5,4	5,1	4,3	2,5	1,5	1,0	4,9
18	$I_{1*} = \frac{I_1}{I_\Gamma}$		3,46	3,27	2,76	1,60	0,96	0,64	3,14
17	$M_* = \left(\frac{I'_2}{I'_2} \right)^2 K_R \frac{s_{НОМ}}{s}$		1,80	1,87	2,02	1,68	1,14	0,75	1,95

Арк.

ПД 201.000.000 ПЗ

Зм. Арк. № докум. Підпис Дата

Таблиця 3.4.

Розрахунок пускових характеристик з урахуванням впливу витиснення струмові в роторі і насичення від полів розсіювання

№ п/п	Розрахункова формула	Од.	Ковзання						
			1	0,8	0,54	0,2	0,1	0,05	0,66
1	$k_{нас}$		1,04	1,02	1,01	1,01	1,01	1,00	1,01
2	$F_{п.ср} = 0,7 \frac{I_{1наза} k_{нас} u_n}{a} \times (k'_{\beta} + k_{y1} k_{об1} \frac{Z_1}{Z_2})$		908	841	702	408	245	162	800
3	$B_{\phi\delta} = F_{п.ср} \cdot 10^{-6} / (1,6\delta C_N)$		1,901	1,761	1,470	0,854	0,513	0,339	1,675
4	$\chi_{\delta} = f(B_{\phi\delta})$		0,5	0,53	0,58	0,72	0,86	0,97	0,75
5	$c_{\epsilon 1} = (t_{z1} - b_{ш1})(1 - \chi_{\delta})$		2,60	2,44	2,18	1,46	0,73	0,16	1,30
6	$\Delta\lambda_{п1нас} = \frac{h_{ш1} + 0,58(b_1 - b_{ш1})/2}{b_{ш1}} \times \frac{c_{\epsilon 1}}{c_{\epsilon 1} + 1,5b_{ш1}}$		0,154	0,148	0,137	0,103	0,059	0,014	0,094
7	$\lambda_{п1нас} = \lambda_{п1} - \Delta\lambda_{п1.нас}$		0,809	0,815	0,826	0,860	0,904	0,949	0,869
8	$\lambda_{д1нас} = \chi_{\delta} \lambda_{д1}$		0,339	0,359	0,393	0,488	0,583	0,658	0,509
9	$X_{1нас} = x_1 \frac{\sum \lambda_{1нас}}{\sum \lambda_1}$		12,011	12,133	12,346	12,956	13,612	14,179	13,097
10	$\lambda_{п2\xi} = \lambda_{п2\xi} - \Delta\lambda_{п2нас}$		3,82	3,85	3,93	4,01	4,15	4,41	4,04
11	$\lambda_{\delta 2нас} = \chi_{\delta} \lambda_{\delta 2}$		0,71	0,75	0,82	1,02	1,21	1,37	1,06
12	$X'_{2\xi нас} = x'_{2} \frac{\sum \lambda_{2\xi нас}}{\sum \lambda_2}$		19,055	19,300	19,823	20,800	21,952	23,418	21,044
13	$c_{1пнас} = 1 + x_{1нас} / x_{12п}$		1,016	1,016	1,017	1,018	1,018	1,019	1,018
14	$R_{п.нас} = r_1 + c_{1п.нас} \frac{r'_{2\xi}}{S}$		62,735	67,349	80,681	152,949	269,699	503,656	71,579
15	$X_{п.нас} = x_1 + c_{1п.нас} X'_{2\xi.нас}$		31,371	31,742	32,506	34,130	35,959	38,042	34,520
16	$I'_{2.нас} = \frac{U_{ном}}{\sqrt{R_{п.нас}^2 + X_{п.нас}^2}}$		5,4	5,1	4,4	2,4	1,4	0,8	4,8
17	$I_{1нас} = I'_{2.нас} \frac{\sqrt{R_{п.нас}^2 + (X_{п.нас} + x_{12п})^2}}{c_{1п.нас} x_{12п}}$		5,6	5,3	4,5	2,5	1,5	1,0	5,0
18	$k'_{нас} = I_{1нас} / I_{пуск}$		1,04	1,04	1,05	1,00	1,00	1,00	1,02
19	$I_1^* = I_{1нас} / I_1'$		3,59	3,40	2,88	1,60	0,96	0,64	3,21

20	$M^* = \left(\frac{I'_{2нас}}{I'_{2н}} \right)^2 K_R \frac{s_H}{s}$		1,94	2,03	2,15	1,68	1,14	0,75	2,04
Пускові характеристики для програми „Excel”									
1	Ковзання, s	в.о.	1	0,8	0,54	0,2	0,1	0,05	0
2	Струм двигуна, I_1^*	в.о.	3,59	3,40	2,88	1,60	0,96	0,64	0,53
3	Момент, M^*	в.о.	1,94	2,03	2,15	1,68	1,14	0,75	0

Кратність максимального моменту

$$k_m = \frac{M_{2\max}}{M_H} = 2,15 ,$$

при критичному ковзанні

$$s_m = 0,54 .$$

3.9.9. Критичне ковзання визначасмо після розрахунку всіх точок пускових характеристик (табл.9.2) за середнім значенням опорів $X_{1нас}$ і

$X'_{2нас}$, що відповідають ковзанням $s=0,5$ і $s=0,8$:

$$x_{1KP} = \frac{x_{1нас}(s=0,1) + x_{1нас}(s=0,2)}{2} = (12,956 + 13,612) / 2 = 13,284;$$

$$x_{2KP} = \frac{x_{2нас}(s=0,1) + x_{2нас}(s=0,2)}{2} = (20,8 + 21,952) / 2 = 21,376;$$

$$s_{кр} = \frac{r'_2}{\frac{x_{1кр}}{c_{1n}} + x_{2кр}} = 22,71 / (13,284 / 1,019 + 21,376) = 0,66.$$

					ПД 201.000.000 ПЗ				Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

Висновки по розділу 3

В результаті електромагнітного розрахунку двигуна за допомогою оптимізації магнітного ланцюга та форми пазів ротора отримані наступні покращені експлуатаційні показники:

Потужність, кВт	1
Напруга фазна, В	380
Споживаний струм, А	1,56
ККД	0,72
Частота обертання, об/хв	1372
Ковзання ротора, в.о.	0,0855
Момент на валу, Нм	6,979
Коефіцієнт потужності	0,809
Кратність пускового струму, в.о.	3,59
Кратність пускового моменту, в.о.	1,94

					ПД 201.000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4. ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК ДВИГУНА

4.1. Перевищення температури внутрішньої поверхні сердечника статора над температурою повітря усередині двигуна $\Delta v_{нов1}$

4.1.1. Електричні втрати потужності в пазовій частині обмотки статора визначаються при припустимій температурі 140°C для ізоляції класу F:

а) коефіцієнт збільшення втрат при збільшенні температури обмотки до гранично припустимої (140°C для ізоляції класу F) щодо розрахункової (115°C для ізоляції класу F) $k_{\rho} = 1,07$;

б) по (8.328)

$$P'_{эн1} = k_{\rho} P_{эл} \frac{2l_1}{l_{сп1}} = 1,07 \cdot 0,2643 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 0,059 / 0,374 = 89,23 \text{ Вт};$$

4.1.2. Приймаємо по табл. 8.33 [21] і табл.4.1 значення коефіцієнта

$$K = 0,20 ,$$

який враховує, що частина втрат потужності в сердечнику статора й у пазовій частині обмотки передається безпосередньо в навколишнє середовище.

Таблиця 4.1.

Середні значення коефіцієнта K

Виконання двигуна по способу захисту	Число полюсів двигуна $2p$	
	2	4
IP44	0,22	0,2
IP23	0,84	0,80

4.1.3. Приймаємо по рис. 8.70,б для $D_a=0,139\text{м}$ і $2p=2 \bullet 2=4$

$$\alpha_1 = 90 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}),$$

коефіцієнт тепловіддачі з поверхні.

4.1.4. По (8.330)

$$\Delta v_{нов1} = K \frac{P'_{эн1} + P_{сттос}}{\pi D l_1 \alpha_1} =$$

									Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

$$=0,2 \cdot (89,23+38,59)/(3,14 \cdot 0,0945 \cdot 0,059 \cdot 90)=16,2 \text{ } ^\circ\text{C} .$$

4.2. Перепад температури в ізоляції пазової частини обмотки статора

4.2.1. Розрахунковий периметр поперечного переріза паза статора, для напівзакритих трапецеидальних пазів по (8.332)

$$\Pi_{п1}=2h_{п1}+b_1+b_2=2 \cdot 0,01118+ 0,00562+ 0,00699=0,035\text{м};$$

4.2.2. Середня еквівалентна теплопровідність пазової ізоляції для ізоляції класу нагревостойкості F $\lambda_{екв}=0,16 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ (стор. 402);

4.2.3. Середнє значення коефіцієнта теплопровідності внутрішньої ізоляції котушки всипної обмотки по рис. 8.72 [21] для $d/d_{из3}=0,5/0,545=0,92$

$$\lambda'_{екв} = 0,95 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C}).$$

4.2.4. Однобічна товщина ізоляції в пазу для всипної обмотки по табл.3.1 $b_{из3}=0,2\text{мм}$.

4.2.5. По (8.331)

$$\Delta v_{изн1} = \frac{P'_{эн1}}{Z_1 \Pi_{п1} l_1} \left(\frac{b_{изн1}}{\lambda_{экр}} + \frac{b_1 + b_2}{16 \lambda'_{экр}} \right) =$$

$$=89,23 \cdot (0,2/0,16+(5,62+6,99)/(16 \cdot 0,95)) \cdot 10^{-3}/(36 \cdot 0,035 \cdot 0,059)=2,50 \text{ } ^\circ\text{C} .$$

4.3. Перепад температури по товщині ізоляції лобових частин

4.3.1. Периметр умовної поверхні охолодження лобової частини однієї котушки

$$\Pi_{л1}=\Pi_{п1}=0,035\text{м}.$$

4.3.2. Електричні втрати потужності в лобових частинах обмотки статора визначаються для гранично припустимої температури:

$$P'_{эл1} = k_{\rho} P_{эл} \frac{2l_{л1}}{l_{сп1}} = 1,15 \cdot 0,2643 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 0,128/0,374=208 \text{ Вт};$$

										Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ПД 201.000.000 ПЗ					

4.3.3. Однобічна товщина ізоляції в лобових частинах для всьпної обмотки по табл. глави 3.1 [21] $b_{узл1}=0$.

4.3.4. По (8.335)

$$\Delta v_{узл1} = \frac{P'_{эл1}}{z_1 \Pi_{л1} l_{л1}} \left(\frac{b_{узл1}}{\lambda_{эКВ}} + \frac{h_{н1}}{12 \lambda'_{эКВ}} \right) =$$

$$= 208 \cdot (0/0,16 + 11,18/(12 \cdot 1,1)) \cdot 10^{-3} / (36 \cdot 0,035 \cdot 0,059) = 2,37 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

4.3.5. Перевищення температури зовнішньої поверхні лобових частин над температурою повітря усередині машини:

$$\Delta v_{нов.л1} = \frac{K P'_{эл1}}{2 \pi D l_{выл} \alpha_1} = 0,2 \cdot 208 / (3,14 \cdot 0,0945 \cdot 0,04318 \cdot 90) = 36,1 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

4.4. Середнє перевищення температури обмотки статора над температурою повітря усередині машини

$$\Delta v'_1 = \frac{(\Delta v_{нов1} + \Delta v_{уз.н1}) 2l_1 + (\Delta v_{уз.л1} + \Delta v_{нов.л1}) 2l_{л1}}{l_{сп1}} =$$

$$= ((16,2 + 2,50) \cdot 2 \cdot 0,059 + (2,37 + 36,1) \cdot 2 \cdot 0,128) / 0,374 = 32,23 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

4.5. Перевищення температури повітря усередині машини над температурою навколишнього середовища

4.5.1. Коэффициент підігріву повітря, що враховує тепловіддаючу здатність поверхні корпусу й інтенсивність перемішування повітря усередині двигуна, визначається по рис. 8.70 [21] для $D=0,0945$ м

$$\alpha_в = 34 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}),$$

4.5.2. Еквівалентна поверхня охолодження корпусу по (8.343) [1]

Умовний периметр поперечного переріза ребер корпусу двигуна Π_p визначається по рис. 8.73 [21] у залежності від висоти осі обертання h , що визначається згідно табл. 8.6 [21] або табл. 4.2

для $D_a=0,139$ м.

										Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

Таблиця 4.2.

$D_a, \text{ м}$	0,08-0,096	0,1-0,108	0,116-0,122
$h, \text{ м}$	0,056	0,063	0,071

$$\Pi_p = 0,19 \text{ м}^2,$$

$$S_{кор} = (\pi D_a + 8 \Pi_p)(l_1 + 2l_{обл1}) = (3,14 \cdot 0,139 + 8 \cdot 0,19) \cdot (0,059 + 2 \cdot 0,04318) = 0,2844 \text{ м}^2.$$

4.5.3. Сума втрат, що виділяється в повітря усередині двигуна $\sum P'_e$ по (8.340)

$$\sum P' = \sum P + (K_p - 1)(P_{e1} + P_{e2}) = 0,4383 \cdot 10^3 + (1,45 - 1)(0,2643 + 0,1008) \cdot 10^3 = 602,60 \text{ Вт};$$

по (8.339)

$$\sum P'_e = \sum P' - (1 - K)(P'_{en1} + P_{c1} + P_{c2}) = 602,60 - (1 - 0,2) \cdot (89,23 + 57,4) = 485,3 \text{ Вт}.$$

4.5.4. По (8.338)

$$\Delta v_e = \frac{\sum P'_e}{S_{кор} \lambda_e} = 485,3 / (0,2844 \cdot 34) = 50 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

4.6. Середнє перевищення температури обмотки статора над температурою навколишнього середовища

$$\Delta v_1 = \Delta v'_1 + \Delta v_e = 32,23 + 50 = 82 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

4.7. Середня температура нагрівання обмотки статора

$$\Theta_1 = \Delta v_1 + t_{окр} = 82 + 40 = 122 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Через наближений характер розрахунку Θ_1 повинне бути, принаймні, на 20% менше, ніж температура, що допускається, для прийнятого класу ізоляції F ($155 \text{ } ^\circ\text{C}$ Θ_1) $= 0,8 \cdot 155$ ($\Theta_1 = 124 \text{ } ^\circ\text{C}$).

					ПД 201.000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.8. Перевірка умов охолодження двигуна

4.8.1. Необхідна кількість охолодного повітря:

4.8.1.1. Коефіцієнт, що враховує зміна умов охолодження по довжині поверхні корпусу, що обдувається зовнішнім вентилятором

$$k_m = m' \sqrt{\frac{n_H}{100} D_a} = 2,6 \cdot (1372 \cdot 0,139 / 100)^{1/2} = 3,59.$$

Коефіцієнт $m' = 2,6$ для двигунів з $2p = 2$, і $m' = 1,8$ для двигунів з $2p = 4$.

4.8.1.2. Необхідний для охолодження витрата повітря по (8-356) [21] для двигунів зі ступенем захисту IP44

$$Q_g = \frac{k_m \sum P'_g}{1100 \Delta v_g} = 3,59 \cdot 485,3 / (1100 \cdot 50) = 0,03168 \text{ м}^3/\text{с}$$

де $\sum P'_g$ - сума втрат, що відводяться повітрям, що охолоджує внутрішній обсяг машини, визначена в п. 4.6.3.

4.8.1.3. Коефіцієнт K_L враховує зміну площі виходу вентилятора шляхом зміни ширини лопаток в діапазоні $0,8 \leq K_L \leq 1,5$.

$$K_L = 1,48$$

4.8.1.4. Витрати повітря, що забезпечуються зовнішнім вентилятором

по (8.358) [1]. $Q'_g = 0,6 \cdot K_L \frac{n}{100} D_a^3 = 0,6 \cdot 1,48 \cdot 1372 \cdot 0,139^3 / 100 = 0,033 \text{ м}^3/\text{с}$.

Витрата повітря Q'_g повинна бути більше необхідного для охолодження машини Q_g . Система охолодження двигуна забезпечує необхідну витрату повітря.

									Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

Висновки по розділу 4

1. Середнє перевищення температури обмотки статора над температурою навколишнього середовища складає 82°C .

2. Система охолодження двигуна забезпечує витрати повітря $0,033\text{ м}^3/\text{з}$ (необхідні витрати повітря $0,03168\text{ м}^3/\text{с}$).

Таким чином, система охолодження та вентиляції забезпечує потрібний режим для надійної роботи двигуна.

					ПД 201.000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5. РОЗРАХУНОК ВАЛА ДВИГУНА

5.1. Вихідні дані для розрахунку вала.

5.1.1. Розрахувати вал асинхронного двигуна, що має наступні дані:
 $M_H = 6,979$ Нм, $n_H = 1372$ об/хв, зовнішній діаметр магнітопровода ротора $D = 0,0945$ м, довжина магнітопровода якоря без радіальних каналів $l_1 = 0,059$ м, повітряний зазор $\delta = 0,3 \cdot 10^{-3}$ м.

Для розрахунку вала потрібно використовувати діаметр ділильного кола шестерні:

$d_m =$	0,055	м.
---------	-------	----

Розміри вала згідно рис 5.1: $D_0 = 0,032$ м, $d_3 = D_0 = 0,032$ м,

a_B	0,075	м,
d_{e0}	0,032	м,
d_{II}	0,03	м,
d_2	0,032	м,
l_{B0}	0,053	м,
b_B	0,075	м,
x_{B2}	0,009	м,
y_{B1}	0,009	м,
y_{B2}	0,009	м,
z_{B1}	0,081	м,
z_{B2}	0,086	м,

$x_{B1} = y_{B1} = 0,009$ м, $y_{B3} = b_B = 0,075$ м, $l_B = a_B + b_B = 0,075 + 0,075 = 0,15$ м, ,
 $x_{B3} = a_B = 0,075$ м, $c_B = z_{B2} = 0,086$ м.

					ПД 201.000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5.2. Розрахунок вала на твердість.

5.2.1. Маса ротора з обмоткою і валом (стор. 232) [22]

$$m_p = 6500 \cdot D^2 \cdot l_1 = 6500 \cdot 0,0945^2 \cdot 0,059 = 3,42 \text{ кг.}$$

Сила ваги ротора

$$G_p = 9,81 \cdot m_p = 9,81 \cdot 3,42 = 33,55 \text{ Н.}$$

5.2.2. Момент інерції ротора

$$J_p = \frac{\pi \cdot m_p D^2}{32} = 3,14 \cdot 3,42 \cdot 0,0945^2 / 32 = 0,002997 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

5.2.3. Двигун зчленується з виконавчим механізмом. При такому зчленуванні коефіцієнт k_{II} буде:

$$k_{II} = 3$$

5.2.4. Поперечна сила, прикладена до виступаючого кінця вала по (11.17) [22]

$$F_{II} = \frac{k_{II} \cdot M_H}{\frac{d_m}{2}} = 3 \cdot 6,979 / 0,055 / 2 = 761,35 \text{ Н.}$$

5.2.5. Прогин вала посередині магнітопровода під тиском сили ваги ротора по (11.15) [22]

5.2.5.1. Екваторіальні моменти інерції вала:

$$J_{B1} = \frac{\pi \cdot d_{II}^4}{64} = 3,14 \cdot 0,03^4 / 64 = 0,00000003974 \text{ м}^4;$$

$$J_{B2} = \frac{\pi \cdot D_2^4}{64} = 3,14 \cdot 0,032^4 / 64 = 0,00000005145 \text{ м}^4.$$

$$J_{B3} = \frac{\pi \cdot D_0^4}{64} = 3,14 \cdot 0,032^4 / 64 = 0,00000005145 \text{ м}^4.$$

									Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

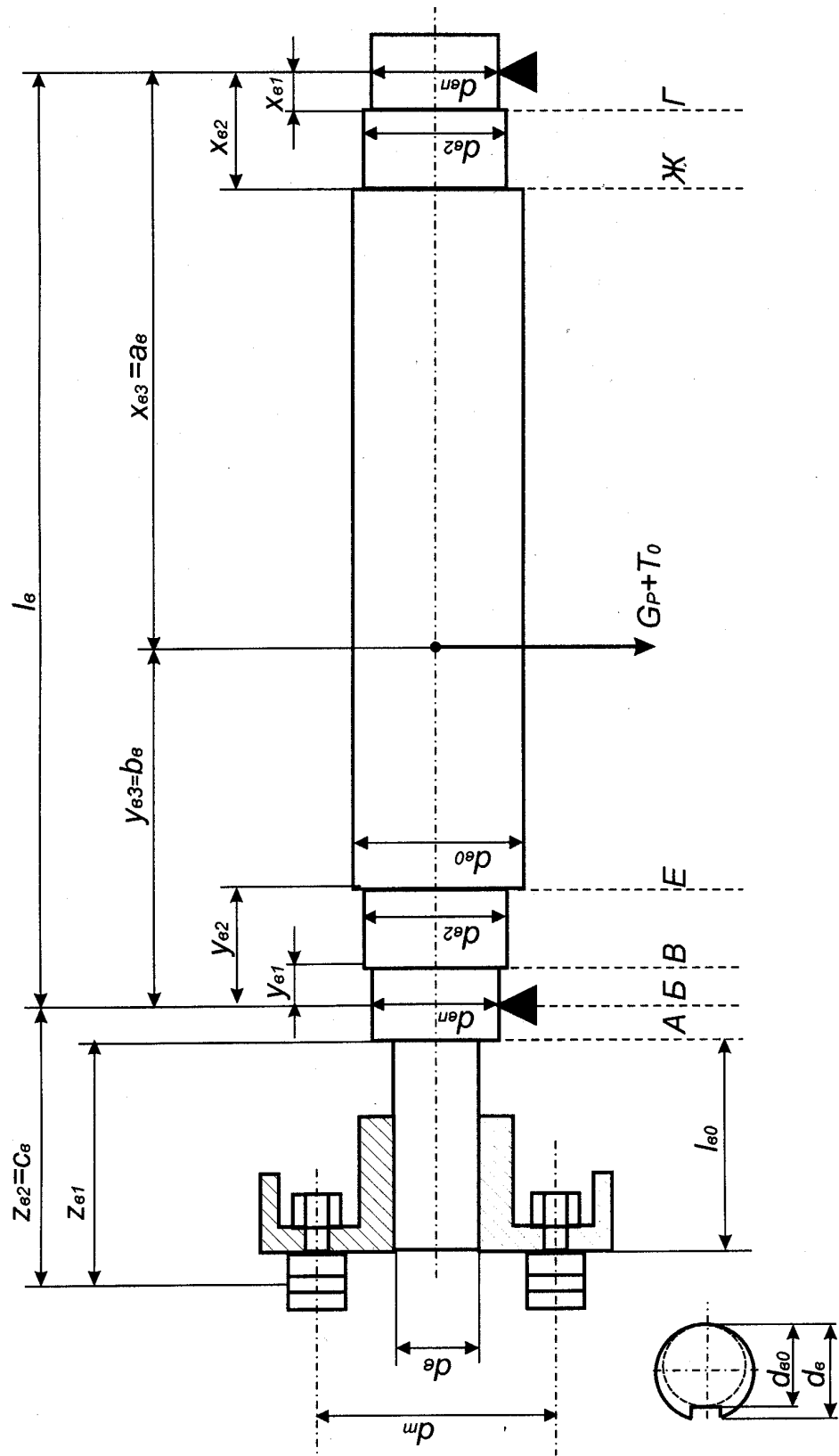


Рис. 5.1. Розрахункова схема вала

					ПД 201.000.000 ПЗ		Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

5.2.5.2. Значення величин

$$S_b = \frac{y_{B1}^3}{J_{B1}} + \frac{y_{B2}^3 - y_{B1}^3}{J_{B2}} + \frac{y_{B3}^3 - y_{B2}^3}{J_{B3}} = 0,009^3 / 0,00000003974 + (0,009^3 - 0,009^3) / 0,00000005145 + (0,075^3 - 0,009^3) / 0,00000005145 = 8204 \text{ м}^{-1};$$

$$S_a = \frac{x_{B1}^3}{J_{B1}} + \frac{x_{B2}^3 - x_{B1}^3}{J_{B2}} + \frac{x_{B3}^3 - x_{B2}^3}{J_{B3}} = 0,009^3 / 0,00000003974 + (0,009^3 - 0,009^3) / 0,00000005145 + (0,075^3 - 0,009^3) / 0,00000005145 = 8204 \text{ м}^{-1};$$

5.2.5.3. Прогин вала

$$f_G = \frac{G_p}{3 \cdot E \cdot l_e^2} \cdot (S_b \cdot a_B^2 + S_a \cdot b_B^2) = 33,55 / (3 \cdot 2,06 \cdot 10^{11} \cdot 0,15^2) \cdot (8204 \cdot 0,075^2 + 8204 \cdot 0,075^2) = 0,000000223 \text{ м.}$$

5.2.6. Прогин вала посередині магнітопровода ротора від поперечної сили муфти по (11.19) [22]

5.2.6.1. Значення величини

$$S_0 = \frac{y_{B1}^2}{J_{B1}} + \frac{y_{B2}^2 - y_{B1}^2}{J_{B2}} + \frac{y_{B3}^2 - y_{B2}^2}{J_{B3}} = 0,009^2 / 0,00000003974 + (0,009^2 - 0,009^2) / 0,00000005145 + (0,075^2 - 0,009^2) / 0,00000005145 = 109793 \text{ м}^{-1}$$

Прогин вала

$$f_{II} = \frac{F_{II} \cdot c_B}{3 \cdot E \cdot l_B} \cdot \left(\left(\frac{3}{2} \cdot l_B \cdot S_0 - S_b \right) \cdot a_B + S_a \cdot b_B \right) = 761,35 \cdot 0,086 / (3 \cdot 2,06 \cdot 10^{11} \cdot 0,15^2) \cdot ((3/2 \cdot 0,15 \cdot 109793 - 8204) \cdot 0,075 + 8204 \cdot 0,075) = 0,00000872 \text{ м.}$$

5.2.7. Первісний зсув ротора по (11.20) [2]

$$e_0 = 0,1 \cdot \delta + f_G + f_{II} = 0,1 \cdot 0,3 \cdot 10^{-3} + 0,000000223 + 0,00000872 = 0,000038943 \text{ м.}$$

5.2.8. Початкова сила однобічного магнітного притяжіння (11.21) [22]

$$T_0 = 2,94 \cdot D_2 \cdot l_2 \cdot \frac{e_0}{\delta} \cdot 10^5 = 2,94 \cdot 0,0939 \cdot 0,059 \cdot 0,000038943 / (0,3 \cdot 10^{-3}) \cdot 10^5 = 211,43 \text{ Н}$$

										Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

ПД 201.000.000 ПЗ

5.2.9. Прогин від сили однобічного магнітного притягіння (11.22) [22]

$$f_T = \frac{f_G \cdot T_0}{G_P} = 0,000000223 \cdot 211,43 / 33,55 = 0,00000141 \text{ м.}$$

5.2.10. Сталий прогин вала від однобічного магнітного притягання по (11.23) [22]

$$f_M = \frac{f_T}{1 - \frac{f_T}{e_0}} = 0,00000141 / (1 - 0,00000141 / 0,000038943) = 0,00000146 \text{ м.}$$

5.2.11. Сумарний прогин вала посередині магнітопровода ротора (11.24) [22]

$$f = f_M + f_G + f_H = 0,00000146 + 0,000000223 + 0,00000872 = 0,000010403 \text{ м;}$$

$$\text{т.е. складає } \frac{f}{\delta} \cdot 100\% = 0,000010403 / 0,3 \cdot 10^{-3} \cdot 100\% = 3,5\% < 10\%, \text{ що припустимо}$$

для асинхронних двигунів (стор. 238 [21]).

5.2.12. Критична частота обертання по (11.25) [22]

$$n_K = 30 \sqrt{\frac{(1 - \frac{f_T}{e_0})}{f_G}} = 30 \cdot ((1 - 0,00000141 / 0,000038943) / 0,000000223)^{1/2} = 62368 > 1,3 n_H.$$

5.3. Розрахунок вала на міцність.

5.3.1. У розрахунку на міцність приймаємо коефіцієнт перевантаження $k=2$.

5.3.2. Напряга на вільному кінці вала в перерізі А (рис 5.1):

по (11.31) [22]

$$M_{IA} = k \cdot F_n \cdot z_{e1} = 2 \cdot 761,35 \cdot 0,081 = 123,339 \text{ Нм;}$$

по (11.30) [22]

$$W_A = 0,1 \cdot d_{e0}^3 = 0,1 \cdot 0,032^3 = 0,00000328 \text{ м}^3;$$

по (11.29) [22]

									Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

$$\sigma_{IIA} = \frac{1}{W_A} \cdot \sqrt{M_{IIA}^2 + (k \cdot \alpha \cdot M_{HOM})^2} = 1/0,00000328 \cdot (123,339^2 + (2 \cdot 0,8 \cdot 6,979)^2)^{1/2} =$$

$$= 37757146 \text{ Па.}$$

5.3.3. Напряга в перерізі В:

з (11.32) і (11.34) [2]

$$M_{IB} = k \cdot F_{II} \cdot c_B \left(1 - \frac{y_{B1}}{l_B}\right) + \left(G_{II} + \frac{T_0}{1 - \frac{f_T}{e_0}}\right) \cdot \frac{\alpha \cdot y_{B1}}{l_B} = 2 \cdot 761,35 \cdot 0,086 \left(1 - \frac{0,009}{0,15}\right) +$$

$$+ (33,55 + 211,43 / (1 - 0,00000141 / 0,000038943)) \cdot 0,8 \cdot 0,009 / 0,15 = 135,2 \text{ Нм;}$$

по (11.30) [22]

$$W_B = 0,1 \cdot d_{II}^3 = 0,1 \cdot 0,03^3 = 0,00000270 \text{ м}^3;$$

по (11.29) [22]

$$\sigma_{IIIB} = \frac{1}{W_B} \cdot \sqrt{M_{IB}^2 + (k \cdot \alpha \cdot M_{HOM})^2} = 1/0,00000270 \cdot ($$

$$135,2^2 + (2 \cdot 0,8 \cdot 6,979)^2)^{1/2} = 50244571 \text{ Па.}$$

5.3.4. Напряга в перерізі Е:

з (11.32) і (11.34) [22]

$$M_{IE} = k \cdot F_{II} \cdot c_B \left(1 - \frac{y_{B2}}{l_B}\right) + \left(G_{II} + \frac{T_0}{1 - \frac{f_T}{e_0}}\right) \cdot \frac{\alpha \cdot y_{B2}}{l_B} = 2 \cdot 761,35 \cdot 0,086 \left(1 - \frac{0,009}{0,15}\right) +$$

$$+ (33,55 + 211,43 / (1 - 0,00000141 / 0,000038943)) \cdot 0,8 \cdot 0,009 / 0,15 = 135,2 \text{ Нм;}$$

по (11.30) [22]

$$W_E = 0,1 \cdot d_{II}^3 = 0,1 \cdot 0,03^3 = 0,00000270 \text{ м}^3;$$

по (11.29) [22]

$$\sigma_{IIIE} = \frac{1}{W_E} \cdot \sqrt{M_{IE}^2 + (k \cdot \alpha \cdot M_{HOM})^2} = 1/0,00000270 \cdot ($$

$$135,2^2 + (2 \cdot 0,8 \cdot 6,979)^2)^{1/2} =$$

$$= 50244571 \text{ Па.}$$

									Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

ПД 201.000.000 ПЗ

5.3.5. Напряга в перерізі Г:

з (11.33) і (11.34) [22]

$$M_{ИГ} = (k \cdot F_{II} \cdot c_B + (G_{II} + \frac{T_0}{1 - \frac{f_T}{e_0}}) b_B) \cdot \frac{x_{B1}}{l_B} = (2 \cdot 761,35 \cdot 0,086 + (33,55 + 211,43 /$$

$$/ (1 - 0,00000141 / 0,000038943) \cdot 0,075) \cdot 0,009 / 0,15 = 9,0 \text{ Нм};$$

по (11.30) [22]

$$W_{Г} = 0,1 \cdot d_{II}^3 = 0,1 \cdot 0,03^3 = 0,00000270 \text{ м}^3;$$

по (11.29) [22]

$$\sigma_{ПРГ} = \frac{1}{W_{Г}} \cdot \sqrt{M_{ИГ}^2 + (k \cdot \alpha \cdot M_{НОМ})^2} = 1 / 0,00000270 \cdot (9,0^2 + (2 \cdot 0,8)^2)^{1/2} =$$

$$= 5311794 \text{ Па.}$$

5.3.6. Напряга в перерізі Ж:

з (11.33) і (11.34) [22]

$$M_{ИЖ} = (k \cdot F_{II} \cdot c_B + (G_{II} + \frac{T_0}{1 - \frac{f_T}{e_0}}) b_B) \cdot \frac{x_{B2}}{l_B} = (2 /$$

$$/ (1 - 0,00000141 / 0,000038943) \cdot 0,075) \cdot 0,009 / 0,15 = 9,0 \text{ Нм};$$

по (11.30) [22]

$$W_{Ж} = 0,1 \cdot d_{II}^3 = 0,1 \cdot 0,03^3 = 0,00000270 \text{ м}^3;$$

по (11.29) [22]

$$\sigma_{ПРГ} = \frac{1}{W_{Ж}} \cdot \sqrt{M_{ИГ}^2 + (k \cdot \alpha \cdot M_{НОМ})^2} = 1 / 0,00000270 \cdot$$

$$\cdot (9,0^2 + (2 \cdot 0,8)^2)^{1/2} = 5311794 \text{ Па.}$$

5.3.7. З зіставлення отриманих даних випливає, що найбільш навантаженим є перетин А, для якого

$$\sigma_{ПР} = 37757146 \text{ Па} < 0,7 \cdot 3600 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

									Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ПД 201.000.000 ПЗ				

Висновки до розділу 5

1. Сумарний прогин вала посередині магнітопровода ротора складає 3,5 % від величини повітряного зазору (припустиме значення 10 %).
2. Критична частота обертання вала $62368 \text{ об/хв} > 1,3 n_H$
3. Найбільш навантаженим є перетин вала А (див. рис.5.1), для якого напру-га прогину $\sigma_{пр} = 37757146 \text{ Па}$ (припустиме значення 252000000 Па).

Отримані показники свідчать про правильну та надійну механічну кон-струкцію вала.

					ПД 201.000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6.СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТОПРИВОДОМ НАСОСУ

При експлуатації відцентрового насосу звичайного призначення немає необхідності в реверсі або регулюванні частоти обертання, тому доцільно використовувати прямий пуск та забезпечити захист електродвигуна надійним і економічним способом

Пуск асинхронного двигуна з короткозамкненою обмоткою ротора.

У більшості випадків застосовується прямий пуск двигунів з короткозамкненою обмоткою ротора. Він здійснюється за допомогою електричних апаратів керування, таких як рубильник, магнітний пускач, контактор або масляний вимикач (для двигуна високої напруги).

Пусковий струм при типовому значенні кратності 5,5-7 безпечний для двигуна, але може викликати зменшення напруги в мережі й несприятливо відбитися на роботі інших споживачів. Тому в мережах малої потужності допускається прямий пуск двигунів потужністю до 100 кВт. Варто також мати на увазі, що в асинхронних двигунах з короткозамкненою обмоткою ротора при великому пусковому струмі кратність пускового моменту невелика: 1-2.

Для зменшення пускового струму можна на час пуску двигуна понизити напругу між виводами обмоток фаз статора, включивши послідовно з ними трифазну котушку індуктивності або перемкнувши їх включення зі схеми трикутник на схему зірка. Однак при цьому одночасно зменшується значення початкового пускового моменту, пропорційного квадрату напруги.

Тому такий пуск застосовується тільки для асинхронних двигунів з короткозамкненою обмоткою ротора невеликої потужності (до 20 кВт).

Схема управління нереверсивним короткозамкненим асинхронним двигуном.

Пуск двигунів малої і середньої потужності зазвичай здійснюється прямим підключенням обмоток статора до мережі без обмеження струмів. Для цієї мети використовуються магнітні пускачі, які складають основу схеми управління.

									Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

Нереверсивний магнітний пускач (рис. 6.1.) включає електромагнітний контактор КМ з двома вбудованими в нього тепловими реле захисту КК, кнопки управління SB1 (Пуск) і SB2 (остановити-стоп АД).

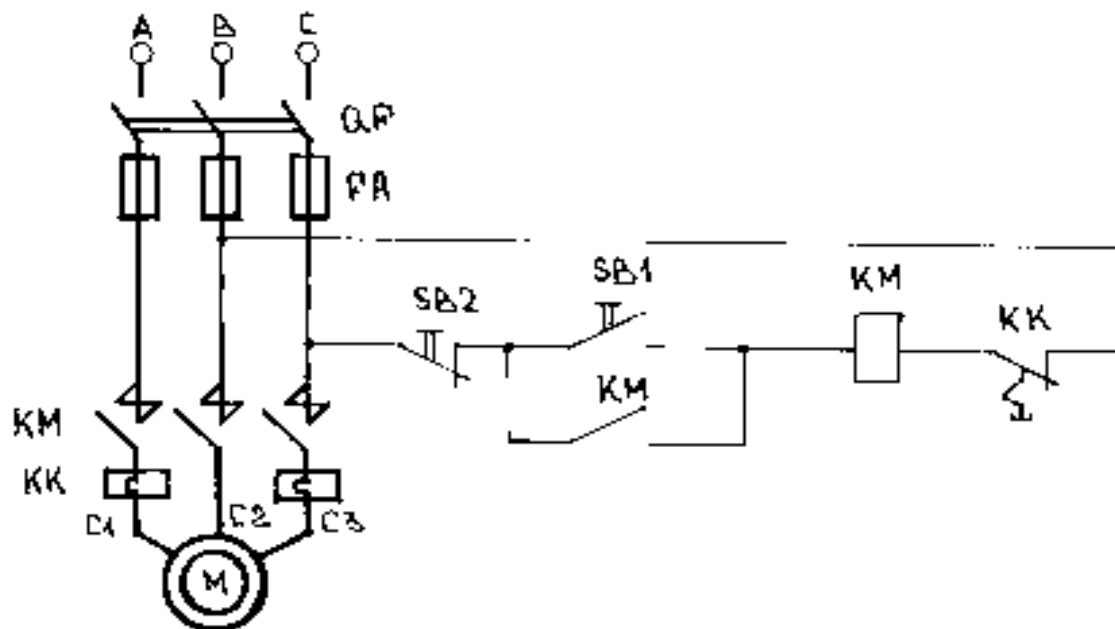


Рис. 6.1. Схема управління нереверсивним асинхронним двигуном з короткозамкнутим ротором.

Схема забезпечує прямий (без обмеження струму і моменту) пуск АД, відключення його від мережі, а також захист від коротких замикань (запобіжники FA).

Для пуску АД замикають вимикач QF і натискають кнопку пуску SB1.

Електричний струм потече від фази З через нормально замкнуту кнопку останову SB2, кнопку SB1, котушку контактора КМ, нормально замкнуті контактори теплових реле КК до фази В.

Котушка контактора КМ, отримавши живлення, притягне якір магнітної системи і замкне головні контакти в силовому ланцюзі обмоток статора і допоміжний контакт, який зашунтує кнопку пуску SB1 і її не треба тримати у включеному положенні. Станеться розгін АД за його природною механічною характеристикою.

									Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

Для відключення АД натискається кнопка зупинки SB2, вона розриває ланцюг живлення котушки контактора КМ. Під дією пружини якір контактора відпадає і розриває усі замкнуті до цього контакти. Двигун втрачає живлення мережі і починається процес гальмування АД вибіганням під дією статичного моменту опору на валу.

Також станеться зупинка двигуна у разі спрацьовування одного з теплових реле. В цьому випадку розірветься ланцюг живлення котушки контактора КМ контактами теплових реле КК.

Теплове реле, встановлене тільки в одну фазу, може не здійснити своїх захисних функцій. Наприклад, якщо під час роботи АД знеструмиться обмотка статора саме цієї фази, то двигун працюватиме з перевантаженням обмоток двох інших фаз, в яких не передбачена установка теплових реле. Тому теплові реле необхідно встановлювати мінімум в двох фазах. Таким чином буде забезпечуватись надійна експлуатація, економічний пуск та захист двигуна насосу.

					ПД 201.000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

7. РОЗРАХУНОК ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СПРОЕКТОВАНОГО ПРОСТРОЮ

7.1. Вибір бази порівняння

Базою порівняння при проектуванні асинхронного електродвигуна для роботи із відцентровим насосом потужністю 1,0 кВт обираємо двигун серії АІР потужністю 1,1 кВт. Проектований і базовий двигуни перебувають в однакових експлуатаційних умовах, виконують ті самі завдання.

7.2. Аналіз техніко-економічного рівня базової та проектової конструкцій.

7.2. 1. Аналіз впливу конструктивних особливостей проектного устаткування на показники його технічного рівня.

Застосування двигуна проектової конструкції дозволить спростити конструкцію деталей і вузлів, збільшити коефіцієнт використання матеріалів, знизити витрата електротехнічної сталі, поліпшити охолодження ротора й двигуна в цілому.

Аналіз технічного рівня проектного двигуна наведений у табл. 7.1

7.2. 2. Розрахунок й аналіз показника технологічності.

Вихідна інформація наведена в табл.7.2.

Коефіцієнт наступності:

$$K_{npi} = \frac{N_{zi}}{N_{обци}}$$

Коефіцієнт стандартизації:

$$K_{cti} = \frac{N_{ctm}}{N_{обци}}$$

					ПД 201.000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 7.1

Карта аналізу технічного рівня проектного та базового двигунів

№ п.п	Показник	Од. вим.	Базовий варіант	Проектний варіант
1	Потужність номінальна	кВт	1,1	1,0
2	Напруга живлення фазна	В	380	380
3	Частота обертання	об/хв	1375	1372
4	ККД	у.о.	0,71	0,72
5	Коефіцієнт потужності,	у.о.	0,76	0,81
6	Кратність пускового моменту,	у.о.	2,2	1,94
7	Кратність пускового струму	у.о.	5,8	3,59
8	Маса двигуна	кг	14,5	12,8
9	Трудомісткість виготовлення $T_{обц}$	н/год	12	8,21
10	Термін експлуатації	років	20	22

Таблиця 7.2.

Початкові дані до розрахунку показників технологічності

Найменування деталей або вузлів	Ед. ізм.	Базова модель	Проектована модель	Джерело
Стандартні $N_{ст}$	шт.	10	11	Складальні креслення, специфікації
Запозичені $N_з$	шт.	4	3	
Покупні $N_{пок}$	шт.	4	2	
Оригінальні $N_{ор}$	шт.	4	4	
Загальна кількість $N_{обц}$	шт.	22	20	

Розрахунок коефіцієнтів для базового та проектного електродвигунів приводиться нижче.

Коефіцієнт застосовності вживаності покупних деталей:

$$K_{покі} = \frac{N_{покі}}{N_{обці}}$$

									Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ПД 201.000.000 ПЗ				

де $N_{нокі}$ - кількість покупних деталей у конструкції електродвигуна,
 $N_{обци}$ - загальна кількість деталей у конструкції електродвигуна.

Базовий двигун: $K_{нок} = N_3 / N_{обци} = 4 / 22 = 0,18$.

Проектований двигун: $K_{нок} = 2 / 20 = 0,1$.

Коефіцієнт наступності:

Базовий двигун: $K_{пр} = N_3 / N_{обци} = 4 / 22 = 0,18$.

Проектований двигун: $K_{пр} = 3 / 20 = 0,15$,

де N_3 и $N_{обци}$ - відповідно кількість запозичених деталей і загальна їхня кількість у конструкції електродвигуна.

Коефіцієнт стандартизації електродвигуна:

Базовий двигун: $K_{см} = N_{см} / N_{обци} = 10 / 22 = 0,45$.

Проектований двигун: $K_{см} = 11 / 20 = 0,55$.

де $N_{см}$ - кількість стандартних деталей у конструкції електродвигуна.

Питома матеріалоемність електродвигуна:

Базовий двигун: $q_m = Q_{изд} / P = 14,5 / 1,1 = 13,18$ кг/кВт.

Проектований двигун: $q_m = 12,8 / 1 = 12,8$ кг/кВт,

де $Q_{изд}$ - маса електродвигуна, кг.

P - потужність електродвигуна, кВт.

Питома трудомісткість виготовлення електродвигуна:

$$t_{уд} = T_{обци} / P,$$

де $T_{обци}$ - загальна трудомісткість виготовлення електродвигуна, норм/г.

(по техпаспорті) .

Питома трудомісткість виготовлення базового двигуна : .

$$t_{уд} = 12 / 1,1 = 10,91 \text{ норм.г/кВт.}$$

Питома трудомісткість виготовлення проектового двигуна : .

$$t_{уд} = 8,21 / 1 = 8,21 \text{ норм.г/кВт.}$$

Розраховані показники зведені в табл. 7.3

					ПД 201.000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 7.3.

Показники технологічності конструкції базового і проектного електродвигунів

№ п.п.	Показник	Од. вим.	Базова модель	Проектна модель
1	Коефіцієнт наступності, K_{np}	у.о.	0,18	0,15
2	Коефіцієнт стандартизації, $K_{ст}$	у.о.	0,45	0,55
3	Коефіцієнт вживаності, $K_{нок}$	у.о.	0,18	0,1
4	Питома матеріаломісткість, q_m	кг/кВт	13,18	12,8
5	Питома трудомісткість, $t_{уд}$	норм.г/кВт	10,91	8,21

7.3. Визначення витрат на матеріали.

Розрахунок витрат на матеріали наведений у табл. 7.4. за даними цін по Україні, які встановлені за допомогою мережі інтернет.

7.4. Визначення витрат на оплату праці та відрахувань на соціальне страхування.

Початкова інформація представлена в таблиці 7.5.

7.4.1. Трудомісткість проектного машини визначаємо по трудомісткості базової машини з урахуванням роходжень та відмінностей:

$$T_n = \frac{T_b K_m K_{сл} K_{нов}}{K_{ун}} = 12 \cdot 0,92 \cdot 0,91 \cdot 1,00 / 1,22 = 8,21 \text{ норм.год.},$$

де

коефіцієнт обліку розходжень у масі:

$$K_m = \sqrt[3]{\left(\frac{M_n}{M_b}\right)^2} = (12,8/14,5)^{2/3} = 0,92,$$

де M_n , M_b - відповідно маса проектного й маса базової машини;

коефіцієнт обліку відмінностей в складності:

										Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ПД 201.000.000 ПЗ					

$$K_{сл} = \frac{N_n}{N_б} = 20/22 = 0,91,$$

де N_n , $N_б$ - відповідно загальна кількість деталей у проєктованій і базовій машині;

коефіцієнт обліку відмінностей в новизні:

$$K_{нов} = \frac{N_{он}}{N_{об}} = 4/4 = 1,00,$$

де $N_{он}$, $N_{об}$ - відповідно кількість оригінальних деталей у проєктованій і базовій машині;

коефіцієнт обліку відмінностей в рівні уніфікації:

$$K_{ун} = \frac{K_{стн}}{K_{стб}} = 0,55/0,45 = 1,22.$$

7.4.2. Розмір основної заробітної плати по базовому варіанту:

$$З_{об} = L_д T_б = 13,1 \cdot 12 = 157,2 \text{ грн.}$$

де $L_д$ - діюча на підприємстві середня тарифна ставка на момент складання базової калькуляції, грн.

7.4.3. Розмір додаткової заробітної плати по базовому варіанту:

$$З_{донб} = З_{об} K_{дон} = 157,2 \cdot 0,15 = 23,58 \text{ грн.}$$

7.4.4. Розмір основної заробітної плати по проєктованому варіанту:

$$З_{он} = L_д T_n = 13,1 \cdot 8,21 = 107,55 \text{ грн.}$$

					ПД 201.000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 7.4.

Розрахунок витрат на матеріали

Найменування матеріалу по ДСТ	Витрата базової моделі	Витрата проектової моделі	Ціна за 1 кг, грн.	Вартість матеріалу базової моделі	Вартість матеріалу проектової моделі
Основні матеріали					
Сталь листова електро-технічна 2013	2,95	2,5	34,5	101,8	86,3
Алюміній ливарний	0,95	0,8	24,8	23,6	19,8
Сталь сортова вуглецева Ст 45	1,1	0,85	23,9	26,3	20,3
Сталь прокат	1,25	1,1	32,2	40,3	35,4
Лиття сталеве	0,15	0,1	31,2	4,7	3,1
Ізоляційні матеріали	1,2	1,1	8,3	10,0	9,1
Обмотувальний дріт	3,20	2,9	36,6	117,1	106,1
Покупні вироби і напівфабрикати					
Підшипники	0,45	0,4	42	18,9	16,8
Метизи	0,35	0,3	3,8	1,3	1,1
Резино-технічні вироби	0,15	0,1	19,5	2,9	2,0
Електроди	2,15	2,1	4,1	8,8	8,6
Масило	0,25	0,25	19	4,8	4,8
Лакофарбні матеріали	0,35	0,3	12,2	4,3	3,7
Поворотні відходи (віднімаються)					
5% від вартості матеріалів (чорні метали)				9,8	8,2
Транспортно-заготівельні витрати					
4% від вартості матеріалів, напівфабрикатів і комплектуючих виробів				14,6	12,7
Разом	14,5	12,8		340,4	296,2

7.4.5. Розмір додаткової заробітної плати по проектуваному варіанту:

$$Z_{донн} = Z_{он} K_{дон} = 107,55 \cdot 0,15 = 16,13 \text{ грн.}$$

					ПД 201.000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

7.4.6. Відрахування на соціальне страхування для базової моделі:

$$Z_{соцб} = \frac{(Z_{об} + Z_{доб})K_{соц}}{100} = (157,2 + 23,58) \cdot 37,5 / 100 = 67,4 \text{ грн.}$$

7.4.7. Відрахування на соціальне страхування для проектової моделі:

$$Z_{соцп} = \frac{(Z_{оп} + Z_{доп})K_{соц}}{100} = (107,55 + 16,13) \cdot 37,5 / 100 = 46,1 \text{ грн.}$$

Дані до розрахунку витрат на оплату праці приведені в табл.7.5.

Таблиця 7.5.

Вихідні дані до розрахунку витрат на оплату праці

Показники	Од. вим.	Базова модель	Проектна модель	Джерело
Діюча на підприємстві середня тарифна ставка	грн./г	13,1	13,10	Планово-економічний відділ
Витрати на основну заробітну плату в калькуляції базового варіанту, $Z_о$	грн.	157,2	107,55	Базова калькуляція собівартості
Відсоток додаткової заробітної плати	%	17	17	Структура собівартості бази практики

7.5. Калькуляція собівартості проектового двигуна і нижньої межі ціни.

Для розрахунку собівартості двигунів та їх ціни потрібно використати дані калькуляції підприємства, які приведені в табл.7.6.

					ПД 201.000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 7.6.

Вихідні дані для складання калькуляції

Показники	Од. вим.	Базова модель	Проектована модель	Джерело
Відсоток витрат на зміст та експлуатацію устаткування, ($p_{сэ}$)	%	15	15	Собівартість або структура собівартості бази практики
Відсоток адміністративних витрат, ($p_{адм}$)	%	10	10	
Відсоток витрат на реалізацію продукції, ($p_{реал}$)	%	20	20	

7.5.1. Витрата на зміст і експлуатацію устаткування для базової моделі:

$$P_{сэоб} = \frac{З_{об} \cdot p_{сэ}}{100} = 157,2 \cdot 0,15 = 23,58 \text{ грн.}$$

7.5.2. Витрати на зміст і експлуатацію устаткування для проектоvanій моделі:

$$P_{сэоп} = \frac{З_{оп} \cdot p_{сэ}}{100} = 107,55 \cdot 0,15 = 16,13 \text{ грн.}$$

7.5.3. Адміністративні витрати для базової та проектоvanій моделі:

$$P_{адмі} = \frac{З_{oi} \cdot p_{адм}}{100} .$$

7.5.4. Витрати на реалізацію продукції для базової та проектоvanій моделі:

$$P_{реалі} = \frac{P_{адмі} \cdot P_{реал}}{100}$$

7.5.5. Необхідний рівень прибутковості виробництва

$$r = \frac{(K_{\sigma} + R)}{100} = (30+10)/100 = 0,4(40\%).$$

Результати розрахунків приведені в табл. 7.7.

					ПД 201.000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 7.7.

Калькуляція собівартості електродвигуна в порівнянному виді

№ п.п	Найменування статей	Витрати на базову модель, грн.	Витрати на проектovanу модель, грн.
1	Витрати на матеріали, P_{mat}	340,4	296,2
2	Основна заробітна плата, Z_o	157,2	107,55
3	Додаткова заробітна плата, $Z_{дон}$	23,58	16,13
4	Відрахування на соціальне страхування, $Z_{соц}$	67,4	46,1
5	Витрати на зміст і експлуатацію устаткування, $P_{сэо}$	23,58	16,13
6	Адміністративні витрати, $P_{адм}$	15,72	10,76
8	Виробнича собівартість ($Cб_{прі} = P_{mat} + Z_o + Z_{дон} + Z_{соц} + P_{сэо} + P_{адм}$)	627,88	492,87
9	Витрати на реалізацію продукції, $P_{реал}$	3,14	2,15
10	Повна собівартість ($Cб_{полні} = Cб_{прі} + P_{реал}$)	631,0	495,0
11	Прибуток, ($Pr_i = 0,4 \cdot Cб_{полні}$)	252,4	198,0
12	Ціна оптова, ($Ц_{оптi} = Cб_{полні} + Pr_i$)	883,4	693,0
13	ПДВ, ($H_{дсi} = 0,2 \cdot Ц_{оптi}$)	176,7	138,6
14	Нижня межа ціни, ($Ц_i = Ц_{оптi} + H_{дсi}$)	1 060,1	831,6

Таблиця 7.8.

Розрахунок експлуатаційних витрат у споживача

Показники	Од. вим.	Базова модель	Проектова модель	Джерело
Річний фонд часу роботи двигуна	г.	1600	1600	Дані підприємства
Вартість електроенергії	грн.	1,23	1,23	Вартість згідно тарифу України
Витрати по експлуатації двигуна (I_i)	грн.	39360	43296	Розрахунок

Ціна пропозиції з урахуванням того, що споживач не несе жодних додаткових капітальних вкладень (приймаємо коефіцієнт участі на рівні $K_{ук}=0,25$)

						ПД 201.000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

та коефіцієнт ринковою кон'юктури $K_{pk} = 0,5$, оскільки попит на продукцію електротехнічної промисловості на сьогоднішній день низький і неплатоспроможний, завантаження підприємств складає в середньому 50%.

$$C_{np} = C_n + \mathcal{E} \cdot K_{ук} \cdot K_{pk} = 1\,060,1 + 4270,51 \cdot 0,25 \cdot 0,5 = 1593,91 \text{ грн.}$$

Економічний ефект у виробника

$$\mathcal{E}_{np} = \mathcal{E} \cdot K_{ук} \cdot K_{pk} = 4270,51 \cdot 0,25 \cdot 0,5 = 533,81 \text{ грн.}$$

Економічний ефект у споживача

$$\mathcal{E}_{нотр} = \mathcal{E} - \mathcal{E}_{np} = 4270,51 - 533,81 = 3736,70 \text{ грн.}$$

7.9. Розробка порівняльної таблиці показників базового і проектного двигунів.

Порівняльні техніко-економічні характеристики базового і проектного варіантів приведені в звідній таблиці 7.9.

Таблиця 7.9.

Техніко-економічні показники базового і проектного двигуна

№ п.п	Показник	Од. вим.	Базовий варіант	Проектований Варіант
1	Потужність двигуна, (P_{δ}, P_n)	кВт	1,1	1,0
2	Напруга фазна, $(U_{ф\delta}, U_{фn})$	В	380	380
3	Частота обертання, $(n_{н\delta}, n_{нn})$	об/хв.	1375	1372
4	ККД, (η_{δ}, η_n)	у.о.	0,71	0,72
5	Коефіцієнт потужності, $(\cos \varphi_{\delta}, \cos \varphi_n)$	у.о.	0,76	0,81
6	Кратність пускового моменту, $(k_{м\delta}, k_{mn})$	у.о.	2,2	1,94
7	Кратність пускового струму, $(k_{т\delta}, k_{tn})$	у.о.	5,8	3,59
8	Маса двигуна, $(Q_{из\delta\delta}, Q_{из\delta n})$	Кг	14,5	12,8
9	Трудомісткість виготовлення двигуна, $(T_{обц\delta\delta}, T_{обц\delta n})$	н.год	12	8,22
10	Термін експлуатації, $(T_{ек\delta}, T_{екn})$	Років	20	22
11	Коефіцієнт наступності, $(K_{np\delta}, K_{npn})$	о.е.	0,18	0,15
12	Коефіцієнт стандартизації, $(K_{ст\delta}, K_{стn})$	о.е.	0,45	0,55

					ПД 201.000.000 ПЗ			Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				

13	Коефіцієнт застосовності, $(K_{нокб}, K_{нокн})$	о.е.	0,18	0,1
14	Питома матеріалоемність, $(q_{мб}, q_{мп})$	кг/кВт	13,18	12,8
15	Питома трудомісткість, $(t_{удб}, t_{удн})$	норм.ч/ /кВт	10,91	8
16	Повна собівартість $(C_{нб}, C_{нн})$	грн.	631	495
17	Нижня границя ціни, $(Ц_{б}, Ц_{н})$	грн.	1 060,1	831,6
18	Економічний ефект на одиницю за термін експлуатації, (\mathcal{E})	грн.	-	4270,51
19	Відпускна ціна, $(Ц_{пр})$	грн.	-	1593,91
20	Економічний ефект у виробника, $(\mathcal{E}_{пр})$	грн.	-	533,81
21	Економічний ефект у споживача, $(\mathcal{E}_{потр})$	грн.	-	3736,70

Висновки до розділу 7

В результаті техніко-економічного аналізу отримані техніко-економічні параметри проєктованого виробу, які приведені в табл. 7.9, з якої виходить, що нова модель має переваги в порівнянні з базовою як по технічним, так і по економічним параметрам. Знижуються експлуатаційні витрати у споживача. економічний ефект на одиницю виробу за термін експлуатації 22 років складе 3736,70грн.

					ПД 201.000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Отримано наступні номінальні характеристики двигуна відцентрового насоса :

Потужність, кВт	1
Напруга фазна, В	380
Споживаний струм, А	1,56
ККД	0,72
Частота обертання, об/хв.	1372
Ковзання ротора, в.о.	0,0855
Момент на валу, Нм	6,979
Коефіцієнт потужності	0,809
Кратність пускового струму, в.о.	3,59
Кратність пускового моменту, в.о.	1,94

2. Середнє перевищення температури обмотки статора над температурою навколишнього середовища складає 82°C , середня температура обмотки статора $\Theta_1 = \Theta_{oc} + \Delta v_1 = 40 + 82 = 122^{\circ}\text{C}$, що задовольняє ізоляції класу F (155°C).

3. Система охолодження двигуна забезпечує витрату $0,033 \text{ м}^3/\text{с}$ (необхідна витрата повітря $0,03168 \text{ м}^3/\text{с}$).

4. Сумарний прогин вала посередині магнітопровода ротора складає $3,5 \%$ від величини повітряного зазору (припустиме значення 10%).

5. Критична частота обертання вала $62368 \text{ об/хв} > 1,3n_n$.

6. Найбільш навантаженим є 104-ереріз вала А (див. рис.3.8), для якого напру-га прогину $\sigma_{\text{ДР}} = 37757146 \text{ Па}$ (припустиме значення $252\,000\,000 \text{ Па}$).

7. Приведено схему управління електроприводом компресора для надійної експлуатації та захисту електродвигуна.

8. Зроблен економічний розрахунок та получен економічний ефект на одини-цю виробу за термін експлуатації, який складе $3736,70 \text{ грн}$.

					ПД 201.000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розрахований в цьому дипломному проекті асинхронний трифазний електродвигун потужністю 1,0 кВт для приводу відцентрового насосу повністю відповідає поставленному завданню та існуючим технічним нормам і вимогам.

					ПД 201.000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Проектирование электрических машин: Учебное пособие для вузов. - В 2-х кн.: кн. 1 /И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин и др; Под ред. И.П. Копылова. – М.: Энергоатомиздат, 1993. -464 с.
2. Проектирование электрических машин: Учебное пособие для вузов. - В 2-х кн.: кн.2 /И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин и др; Под ред. И.П. Копылова. – М.: Энергоатомиздат, 1993. - 384 с.
3. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник/ А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин и др.-М.: Энергоатомиздат,1982.-504 с.
4. Антонов М. В., Герасимова Л. С. Технология производства электрических машин: Учеб. пособ. для вузов. — М.: Энергоиздат, 1982.— 512 с, ил.
5. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник/ А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин и др.-М.: Энергоатомиздат,1982.-504 с.
6. Шерстюк А. Н. Насосы, вентиляторы и компрессоры: Учебное пособие для вузов. - М: «Высшая школа», 1992. - 344 с., с ил.
7. Рахмилевич З. З. «Насосы в химической промышленности. Справочное издание для рабочих» -М.: Химия, 1990 год 240 стр.
8. Поршневые компрессоры / Б. С. Фотин, И. Б. Пирумов, И. К. Прилуцкий, П. И. Пластинин; Под общ. ред. Б. С. Фотина — Ленинград: Машиностроение. Ленинградское отд-ние, Учебное пособие. Для студентов вузов.1987. — 872 с., ил.
9. Шлипченко З.С. Насосы, компрессоры и вентиляторы. Киев, "Техника", 1976, 368 с.
10. Ключев В.И. Теория электропривода: Учебник для вузов. –М.: Энергоатомиздат, 1985. –560 с., ил.
11. Чиликин М.Г., Ключев В.И., Сандлер А.С. Теория автоматизированного электропривода: Учеб. Пособие для вузов. – М.: Энергия, 1979. – 616с., ил.

					ПД 201.000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

12. Економіка підприємства: Підручник / за заг. ред. С.Ф. Покропивного.
рид. 2-ге, перероб. та доп. - К.: КНЕУ, 2000. - 528с, іл.

13. Бойчук І.М., Харків П.С., Хопчан М.І. Економіка підприємства. -
Львів: в-во „Сплот”. -1998.-с. 212.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ПД 201.000.000 ПЗ

Арк.

					ПД 201.000.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		