

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

«Допущений до захисту»

в.о. зав. кафедри СЕЕС

 Обрубов А.В.

«___» _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»

на тему РОЗРОБКА ТОРЦЕВОГО
АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

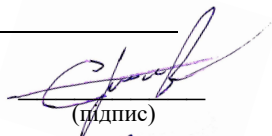
Виконав: здобувач вищої освіти
IV курсу, групи 4301з
спеціальності 141 – Електроенергетика,
(шифр і назва спеціальності)

електротехніка та електромеханіка

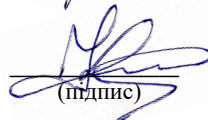
освітньої програми Електромеханіка та
(назва ОП)

електроенергетика

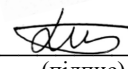
Єрмолаєва О.В.
(прізвище та ініціали)


(підпис)

Керівник Кімстач О.Ю.
(прізвище та ініціали)


(підпис)

Рецензент Білюк І.С.
(прізвище та ініціали)


(підпис)

Миколаїв – 2026 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки

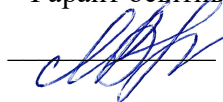
Кафедра Суднових електроенергетичних систем

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

освітньої програми Електромеханіка та електроенергетика
(назва ОП)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Гарант освітньої програми

 Волянська Я.Б.

«__» _____ 2026 р.

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

Здобувачу вищої освіти Єрмолаєвій Олені Володимирівні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка торцевого асинхронного двигуна

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

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

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

3. Вихідні дані до роботи Розробити трифазний торцевий АД.

Вихідні дані: напруга 220/380 В, кількість пар полюсів 2, номінальна корисна
потужність 1100 Вт.

4. Перелік питань, що належать до розробки (найменування розділів)

Опис конструктивного виконання торцевих АД та його переваги; синтез
торцевого АД; розрахунок його характеристик; розгляд питань охорони праці.

5. Перелік презентаційних матеріалів

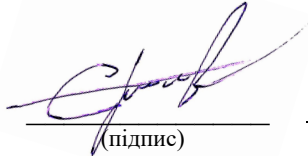
1. Конструктивна схема торцевого АД; 2. Схема статорної обмотки;
3, 4. Характеристики АД.

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/П	Назва етапу роботи	Строк виконання	Примітка
1	Виконання опису конструктивного виконання торцевого АД та його переваг.	15.03.2026	Виконано
2	Вибір конструктивної схеми торцевого АД.	01.04.2026	Виконано
3	Синтез торцевого АД.	15.04.2026	Виконано
4	Розрахунок характеристик торцевого АД.	01.05.2026	Виконано
5	Виконання розділу з охорони праці.	15.05.2026	Виконано
6	Оформлення розрахунково-пояснювальної записки.	01.06.2026	Виконано
7	Оформлення графічної частини.	10.06.2026	Виконано

Здобувач вищої освіти


(підпис)

Єрмолаєва О.В.
(прізвище та ініціали)

Керівник


(підпис)

Кімстач О.Ю.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

У бакалаврській роботі виконано розробку спеціального торцевого асинхронного двигуна.

Виконано опис конструктивних схем і принципу дії торцевих асинхронних двигунів.

Розрахункова частина містить: синтез спеціального торцевого асинхронного двигуна, вибір апарату захисту, а також розрахунок статичних і динамічних характеристик торцевого асинхронного двигуна. Крім того виконано розгляд питань охорони праці.

Ключові слова: апарат захисту, асинхронний двигун, обмотка, пуск, характеристика.

SUMMARY

In the bachelor's thesis, the development of a special axial induction motor was carried out.

A description of the construction and the action of axial induction motors was carried out.

The calculation part includes synthesis of a special axial induction motor, selection of a protection device, and plotting of the static and dynamic characteristics of the axial induction motor. In addition, the labour protection issues were considered.

Keywords: protection device, induction motor, winding, start, characteristic.

					141. 43013. БР. ПЗ.	Лист
Змін.	Лист.	№ докум.	Підпис	Дата		4

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУКЦІЙ	
АСИНХРОННИХ ТОРЦЕВИХ ДВИГУНІВ	10
1.1. Конструкція асинхронних торцевих двигунів.....	11
1.2. Переваги торцевих двигунів	17
РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК СПЕЦІАЛЬНОГО	
АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ТА ВИБІР АПАРАТУ	
ЗАХИСТУ	19
2.1. Обґрунтування конструктивної схеми	20
2.2. Розрахунок спеціального асинхронного двигуна	22
2.3. Вибір автомату захисту	38
РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК	
СПЕЦІАЛЬНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА	39
3.1. Розрахунок електромеханічних характеристик	40
3.2. Розрахунок робочих характеристик при з'єднанні	
трикутник	42
3.3. Розрахунок робочих характеристик при з'єднанні	
зірка	43
3.4. Розрахунок динамічних характеристик	45
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ	48
Вступ.....	49
4.1. Основні законодавчі акти	50
4.2. Фактори, що впливають на умови праці.....	52
4.3. Електрозахисні засоби	54
ВИСНОВКИ	56
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	57
ДОДАТОК. Розрахунок динамічних характеристик	
спеціального АД	58

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

ВСТУП

До сучасних електричних машин пред'являються усе більш тверді вимоги по зниженню витрати активних матеріалів і підвищенню технічного рівня. Особлива увага приділяється зниженню трудомісткості виготовлення асинхронних двигунів і підвищенню рівня автоматизації їх виробництва. Ведуться роботи з поліпшення властивостей магнітних матеріалів, включаючи порошкові, зменшенню товщини пазової й виткової ізоляції й підвищенню класу її нагрівостійкості.

Звичайні шихтовані сердечники в ряді випадків мають знижені магнітні властивості, тому часто експлуатаційні характеристики двигунів не відповідають розрахунковим. При прийнятому механізованому укладанні обмоток у циліндричних двигунах досягаються вища межа поліпшення коефіцієнта заповнення паза круглим дротом. Крім того, подальше підвищення нагрівостійкості ізоляції вимагає застосування спеціальних заходів щодо поліпшення умов роботи підшипників. З урахуванням перерахованих проблем асинхронних двигунів виникає необхідність підвищення їх технічного рівня.

У зв'язку з вищесказаним потрібен пошук нетрадиційних конструкцій асинхронних двигунів, до яких відносяться й торцеві конструкції. У цих конструкціях має місце істотний вигреш по займаному простору за рахунок наближення електродвигуна до робочого механізму, тобто при об'єднанні конструктивних схем механізму й приводного електродвигуна. Мала осьова довжина торцевих двигунів дає можливість забезпечити конструктивну сумісність їх з рядом механізмів, компактність і зручність експлуатації й виготовлення.

У цей час безперервний ріст вимог до якісно нових характеристик електродвигунів не дозволяє в ряді випадків застосувати двигуни циліндричного виконання. Більш раціональним у цьому випадку представляється використання торцевих двигунів, зокрема асинхронних.

Ряд фірм у цей час застосовують торцеві асинхронні двигуни для різ-

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

них приводів промислового й побутового призначення, у тому числі для привода автомобільних виконавчих двигунів, побутових і промислових вентиляторів, повітряних кондиціонерів, пристроїв, що працюють в агресивних середовищах, прожекторів батискафів, виконавчих механізмів точних верстатів і текстильних машин, у якості керуючих і виконавчих двигунів радіоелектронних пристроїв, ЕОМ і авіаційних приладів [8].

Торцеві асинхронні двигуни ефективні в різних агрегатах і механізмах на транспорті, тому що при цьому знижується займана ними площа, що забезпечується конструкцією таких двигунів, і є можливість зменшити розміри й матеріалоемність транспортних систем.

Однороторні та двороторні торцеві асинхронні двигуни можуть застосовуватися в якості мотор-коліс. При застосуванні вбудованих у колеса електродвигунів відпадає необхідність у спеціальних механічних пристроях-диференціалах, карданних і гепоїдних передачах, значно спрощується пристрій і підвищується надійність транспортних систем.

Розширення області застосування торцевих електродвигунів обумовлене рядом переваг у порівнянні з машинами циліндричної конструкції [8]: меншою масою й розмірами; твердістю конструкції; сприятливими умовами тепловіддачі, охолодження й вентиляції; істотним спрощенням обмотувальних робіт завдяки відкритій зубцевої зоні; практично безвідхідним використанням магнітних матеріалів; зручністю зчленування з механізмом і приводом; більшим моментом інерції, що поліпшують експлуатацію механізмів, з різко змінним навантаженням на валу; порівняльною простотою експлуатації, ремонту.

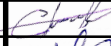
Торцеві машини мають і недоліки: наявність сили осьового магнітного тяжіння в однопакетному виконанні; підвищений момент інерції при роботі з безінерційними механізмами, реверсами, при швидкому гальмуванні; підвищені втрати тертя в підшипниках.

У цей час є ряд робіт, спрямованих на подальше вдосконалювання кон-

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

струкції й технології асинхронних двигунів, наприклад, по машинам з активним розподіленим шаром, з гофрованим зубцевим шаром та ін. Серед них особливе місце займають роботи з торцевих асинхронних електродвигунів інтегрального виготовлення. Для виготовлення активних елементів цих двигунів застосовуються технологічні рішення, за допомогою яких можливо, наприклад, виконання сердечника або обмотки за одну операцію. Крім того, виключені ручні операції з обмотково-ізолювальних робіт.

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

					141. 4301з. БР. ПЗ. Р1					
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата						
Розроб.		Єрмолаєва О.В.			ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУКЦІЙ АСИНХРОННИХ ТОРЦЕВИХ ДВИГУНІВ		Лім.	Лист	Листів	
Керівник		Кімстач О.Ю.							10	9
							НУК			
Н. контр.										
В.о. зав. каф.		Обрубов А.В.								

РОЗДІЛ 1. ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУКЦІЙ АСИНХРОННИХ ТОРЦЕВИХ ДВИГУНІВ

1.1. Конструкція асинхронних торцевих двигунів.

На підставі патентних досліджень, виготовлення і випробування експериментальних зразків двигунів можна зробити висновок, що торцеві конструкції електродвигунів дозволяють суттєво знизити: норму витрати електротехнічної сталі, обмотувальної міді та алюмінію, а також трудомісткість виготовлення [8].

Сутність торцевої конструкції активної частини електричної машини полягає в намотуванні зі стрічки електротехнічної сталі магнітопроводів статора і ротора у вигляді кільця, з одночасним пробиванням пазів зі змінним кроком під обмотку статора і короткозамкнену обмотку ротора.

Особливістю процесу виготовлення такого магнітопроводу ротора є відсутність шихтових операцій, практична незалежність якості виготовлення від величини розкиду розмірів по товщині сталевих стрічки, можливість регулювати кут скошу пазів зміною величини переміщення штампа, суттєво спрощується конструкція штампа, тому що він має всього один пуансон замість декількох десятків у штампах для виготовлення магнітопроводів двигунів класичної конструкції. Немає обмежень за розмірами магнітопроводу.

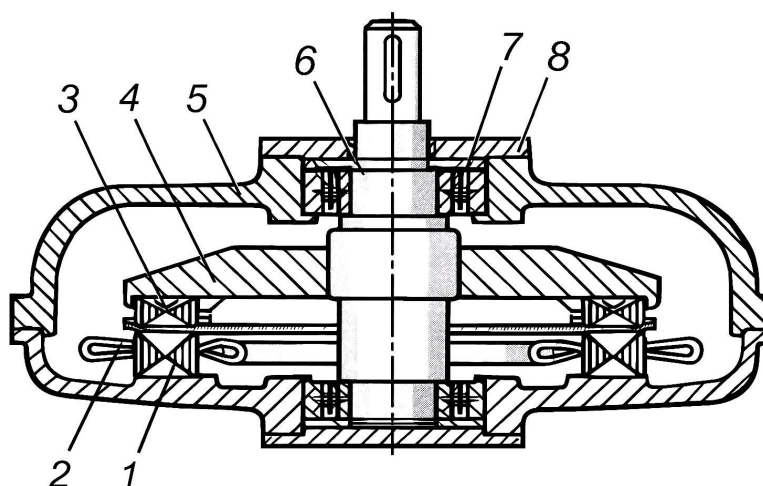


Рис. 1.1. Торцевий АД.

Торцевий двигун (рис. 1.1) складається зі статора 1 з обмотками 2, рото-

ра 3 з короткозамкненою обмоткою, розташований на опорі 4, що закріплена на валу 6; підшипникових щитів 5; підшипників 7 і кришок 8.

Розміщення у двох рівнях обмоток статора дозволяє суттєво скоротити довжину лобових частин, знизити витрату обмотувальної міді, а також зменшити габарити двигуна.

На рис. 1.2 показана схема відцентрового вентилятора с торцевим асинхронним електродвигуном.

Робоче колесо вентилятора кріпиться безпосередньо до ротора. Обмотка статора в зоні лобових частин захищена компаундним покриттям або обмоткоутримувачем. При роботі вентилятора виникає різниця тисків між обсягом, обмеженим внутрішнім діаметром лопаток, і обсягом за зовнішнім діаметром лопаток робочого колеса. У результаті повітря із зони високого тиску через вікна й кільцевий канал попадає в робочий зазор двигуна й через центральний отвір – у зону низького тиску. Тим самим здійснюється примусова циркуляція зовнішнього повітря усередині двигуна без спеціальних охолоджувальних пристроїв.

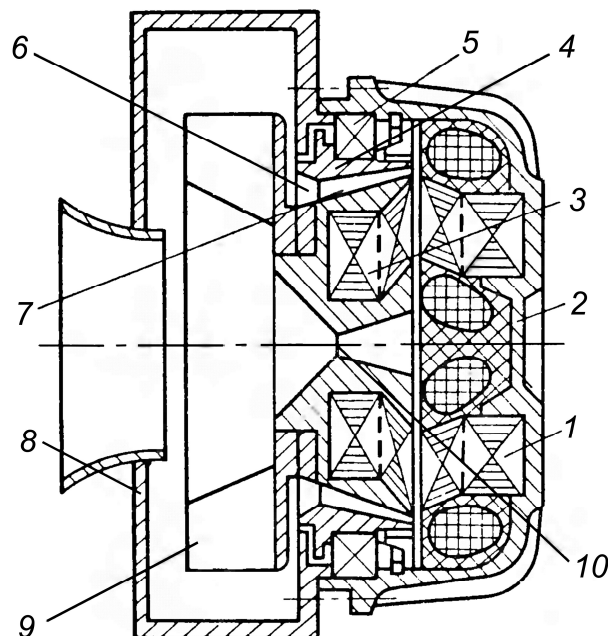


Рис. 1.2. Відцентровий вентилятор:

1 – статор; 2 – корпус; 3 – ротор; 4 – маточина; 5 – підшипник; 6 – вікно;
7 – кільцевий канал; 8 – кожух; 9 – робоче кільце; 10 – центральний отвір.

Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

141. 4301з. БР. ПЗ. Р1

Лист

12

На рис. 1.3 наведена схема відцентрового прямоточного електровентилятора із вбудованим торцевим асинхронним двигуном. Корпус двигуна виконує функції апарата спрямлення вентилятора, а лопатки є одночасно ребрами охолодження двигуна. Двигун охолоджується за допомогою лопаток установлених у корпусі й потоком газу, що нагнітається вентилятором.

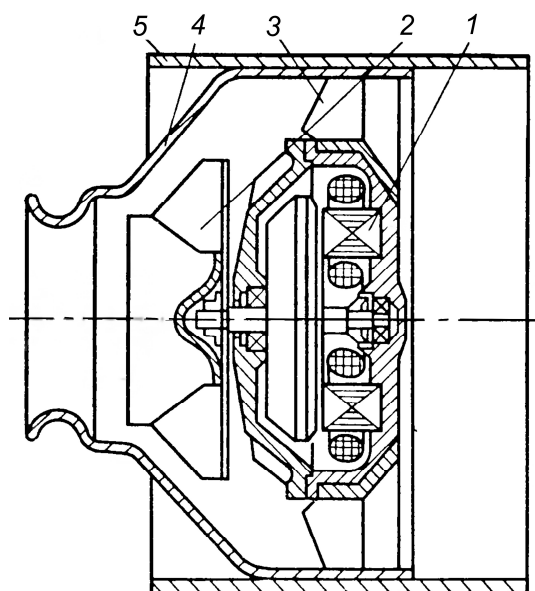


Рис. 1.3. Відцентровий прямоточний електровентилятор:

*1 – двигун; 2 – робоче колесо; 3 – лопатки апарата спрямлення;
4 – напрямний кожух; 5 – корпус вентилятора.*

Застосуванням торцевого двигуна у відцентровому прямоточному вентиляторі досягається спрощення конструкції, зменшення аеродинамічного опору в зоні розширення робочого потоку газу після проходження апарата спрямлення й зменшення габаритних розмірів.

Двухроторна конструкція торцевого асинхронного двигуна із зустрічним обертанням роторів дозволила створити конструкцію осьового вентилятора зі зменшеною масою й розмірами й підвищеною продуктивністю за рахунок зустрічного обертання робочих коліс. Подібна конструкція вентилятора із приводом від циліндричних двигунів вимагає застосування двох окремих двигунів половинної потужності й реалізується в значно більших розмірах.

На рис. 1.4 зображена конструкція герметичного компресора із вбу-

дованим торцевим асинхронним двигуном. Компресор містить маслосбірник, розташований у нижній частині порожнини кожуха, блок циліндрів і двигун. Статор двигуна занурений у масло маслосбірника, а ротор має лопатки. Плоска конфігурація активної частини двигуна дозволяє занурити в масло нижню поверхню статора із зовнішніми й внутрішніми лобовими частинами. При цьому периферійні частини лопаток, відігнуті в напрямку обертання і занурені в масло.

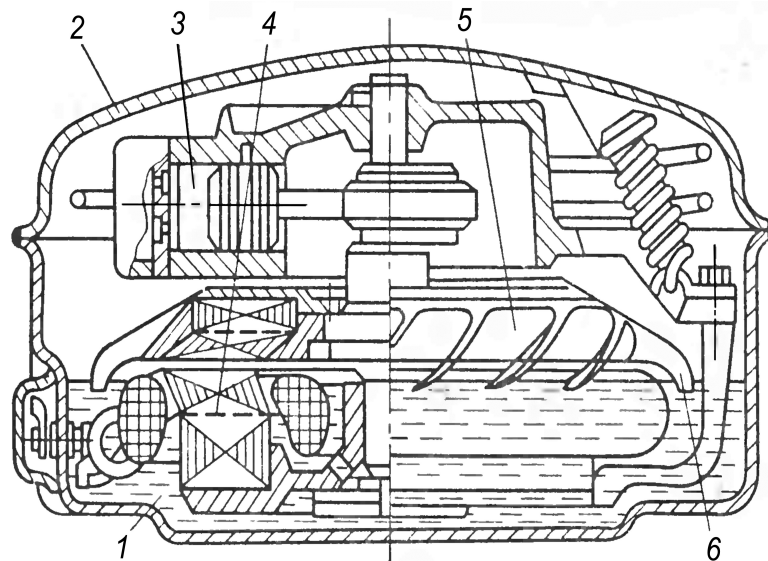


Рис. 1.4. Герметичний компресор із вбудованим асинхронним двигуном:

*1 – маслосбірник; 2 – кожух; 3 – блок циліндрів; 4 – статор; 5 – ротор;
6 – лопатка охолодження на зовнішньому короткозамкненому кільці.*

При обертанні ротора ці частини захоплюють масло, розприскують і розпорошують його у внутрішній порожнині кожуха. Бризи масла, потрапляючи на блок циліндрів, ротор і інші частини, інтенсивно охолоджують їх. У той же час лопатки при обертанні, приводячи шари масла в рух, перемішують їх, що сприяє кращому охолодженню статора, виділенню з масла розчиненого холодоагенту й утвору газових пухирців, що сприяють шумоглушенню. Ця конструкція забезпечує ефективне охолодження елементів компресора без додаткових пристроїв для спінення, розприскування і охолодження. Крім того, забезпечується дегазація масла, підвищується його діелектрична міцність, а торцевий ротор, що виконує функцію маховика, згладжує пульсації навантаження.

Торцеві асинхронні двигуни застосовуються як самогальмівні двигуни.

У таких двигунах значні сили магнітного притягання, що вимагають посилення підшипників та інших конструктивних елементів, виконують корисну роботу гальмування.

На рис. 1.5 наведена схема виконавчого двигуна, що полягає у з'єднанні низькошвидкісного й високошвидкісного торцевих асинхронних самогальмівних двигунів.

Ротор кожного двигуна встановлений на валу з можливістю осевого переміщення й підпружинено. При включенні в мережу під дією електромагнітного притягання ротор притягається до статора, стискаючи осьову пружину, і відходить від гальмової колодки, закріпленої в низькошвидкісному двигуні на торці корпуса, а у високошвидкісному двигуні – на диску зчеплення. При відключенні живлення пружина притискає ротор до гальмової колодки. Згідно [6] виконавчий двигун відрізняється зниженою масою й компактністю, більшим передаточним числом швидкостей, більшим, крутним моментом на низькій швидкості, простотою конструкції, можливістю невеликих переміщень супорта верстата частими включеннями. Двигуни застосовуються для електропривода верстатів, підйомно-транспортних і конвеєрних пристроїв.

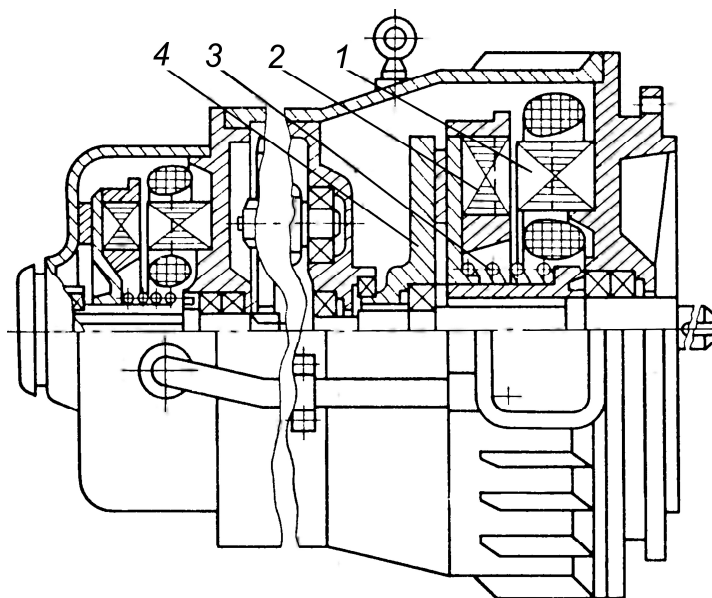


Рис. 1.5. Схема виконавчого двигуна АГ:

1 – статор; 2 – ротор; 3 – осьова пружина; 4 – диск із колодкою гальмування.

Торцеві асинхронні двигуни є кращими для застосування в якості екра-

нованих двигунів герметичних електроприводів [6], тому що плоска форма тонкостінного екрана створює переваги при застосуванні та більш технологічна у виготовленні в порівнянні із циліндричною. Як відомо, в екранованих двигунах погіршені енергетичні характеристики за рахунок збільшеного сумарного електромагнітного зазору й вихрових струмів у суцільних металевих екранах.

Плоска конфігурація поверхні статора торцевого двигуна дозволяє виготовляти екран з інертного в агресивному середовищі неметалу, армованого металевими кільцями, привареними до корпусу, і постаченого феромагнітними вставками з магнітодіелектрика. Феромагнітні вставки мають радіальну довжину, що перевищує активну довжину статора, примикають до зубців статора й установлені між ребрами жорсткості екрана (рис. 1.6). У такій конструкції усунуті втрати на вихрові струми, що мають місце в металевому екрані.

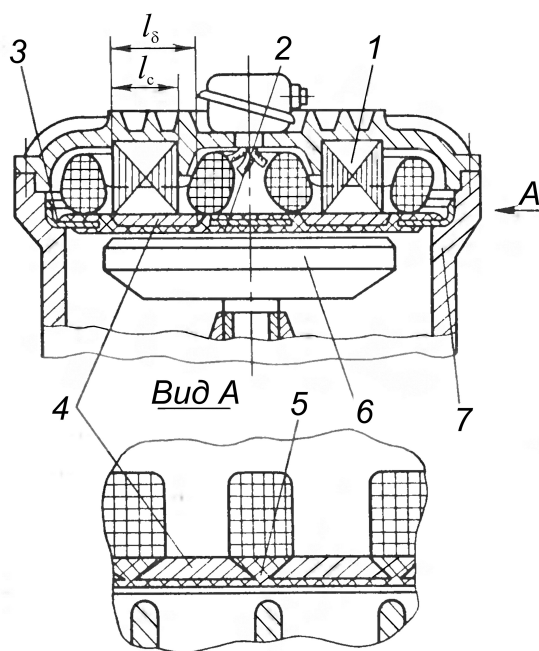


Рис. 1.6. Екранований торцевий двигун:

*1 – статор; 2 – екран; 3 – кільце; 4 – феромагнітна вставка;
5 – ребро жорсткості; 6 – ротор; 7 – корпус герметичного механізму.*

Збільшення магнітного опору сумарного зазору, внесене немагнітною перемичкою, компенсується збільшенням площі зазору за рахунок виконання вставок з радіальною довжиною, що перевищує активну довжину зубців ста-

тора. Ротор також має збільшену активну поверхню. У результаті значно поліпшуються енергетичні характеристики.

Наявність сил однобічного магнітного притягання ротора до статора дозволяє в ряді випадків здійснити магнітний підвіс роторів високошвидкісних електродвигунів [6]. У цьому випадку реалізується ідея двигуна з дисковим ротором без власних підшипникових опор.

Проведений аналіз застосування торцевих асинхронних двигунів у ряді областей техніки показує, що торцева конструктивна схема асинхронної електричної машини в ряді випадків краща для створення спеціальних асинхронних двигунів, а також для вбудовування в механізм і прибудовування до механізмів. Застосування таких двигунів знижує розміри й матеріалоємність механізмів і поліпшує їх експлуатаційні характеристики.

1.2. Переваги торцевих електродвигунів

На підставі викладеного можна сформулювати конструктивно-технологічні переваги торцевого асинхронного електродвигуна у порівнянні із класичним варіантом:

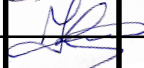
- менші маса і габарити двигуна (маса торцевого двигуна менше більш ніж на 20 %);
- менша витрата активних матеріалів (електротехнічної сталі приблизно на 44 %, обмотувальної міді на 37 %);
- можливе рядове укладання провідників як круглих, так і прямокутних, що зменшує деформацію дроту при намотуванні і зменшує міжвиткову напругу, що призводить до підвищення надійності двигуна;
- практично знімається проблема технологічних відходів електротехнічної сталі, коефіцієнт її використання більш 0,83;
- забезпечується технологічна автономність виготовлення кручених магнітопроводів статора і ротора, котушкових груп;
- можливе балансування ротора тільки з одного боку, наприклад, у пра-

цюючому на холостому ході двигуна, що забезпечує кращу якість балансування і зниження трудомісткості;

- при виробництві кручених магнітопроводів торцевих машин не потрібні складні штампи для вирубки пазів, тому що при намотуванні магнітопроводу вирубється тільки один паз. При виготовленні котушкових груп досить одного верстата, замість декількох функціонально незалежних одиниць верстатного встаткування, необхідного для виготовлення обмотки статора в класичній технології: намотування котушок, витягування їх у пази, розклинення і формування лобових частин, їх ушиття та ін.;

- менша номенклатура і маса застосовуваних матеріалів.

					141. 4301з. БР. ПЗ. Р1	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		18

					141. 4301з. БР. ПЗ. Р2					
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата						
Розроб.		Єрмолаєва О.В.			РОЗРАХУНОК СПЕЦІАЛЬНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ТА ВИБІР АПАРАТУ ЗАХИСТУ		Лім.	Лист	Листів	
Керівник		Кімстач О.Ю.							19	20
							НУК			
Н. контр.										
В.о. зав. каф.		Обрубов А.В.								

РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК СПЕЦІАЛЬНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ТА ВИБІР АПАРАТУ ЗАХИСТУ

2.1. Обґрунтування конструктивної схеми

Конструкція торцевого асинхронного двигуна (ТАД) наведена на рис. 2.1. Він має клемну коробку: для вивідних кінців статорної обмотки. Пази статора виконуються круглими. Для поліпшення охолодження у підшипниковій кришці за сторони вала зроблені шістнадцять вентиляційних отворів. Лобові частини обмотки статора залити компаундом для інтенсифікації охолодження.

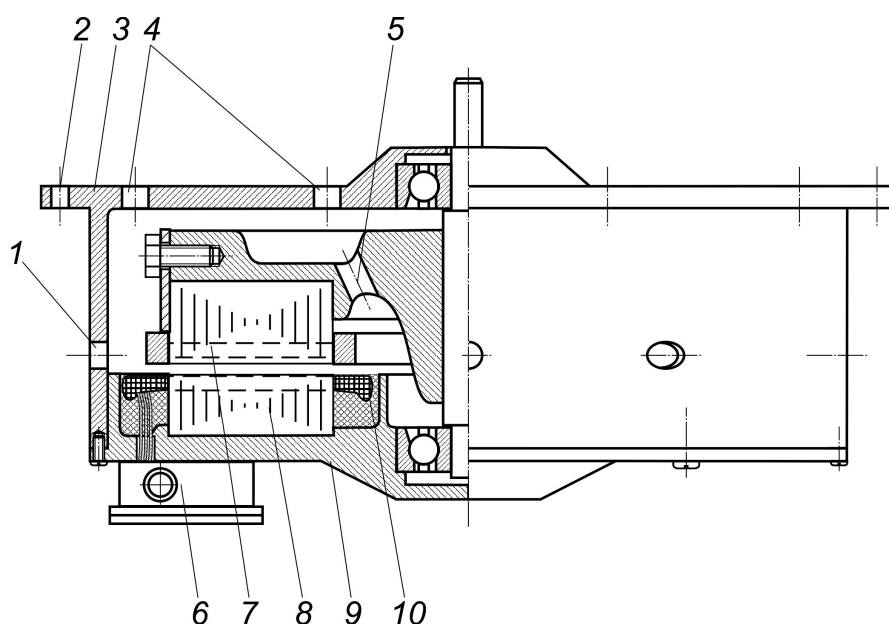


Рис. 2.1. Конструкція торцевого асинхронного двигуна:

- 1 – радіальні вентиляційні отвори; 2 – отвори фланцевого кріплення; 3 – кришка-корпус;
4 – аксіальні вентиляційні отвори; 5 – вентиляційні канали у ступці ротора;
6 – клемна коробка; 7 – ротор; 8 – статор; 9 – кришка;
10 – компаунд лобових частин обмотки статора.

Статорна обмотка ТАД виконується трифазною і на неї подається система напруг, яка створює систему струмів, що у свою чергу створює обертове магнітне поле. Воно перетинає обмотку ротору і наводить у неї систему напруг, що наводить струми у роторі, які у результаті взаємодії з полем статора утворюють обертовий момент.

Захист ТАД виконується за допомогою автоматичного вимикача.

Відповідно до електричної схеми включення двигуна (рис.2.2), він підключається до мережі за допомогою автомату А1.

Для ТАД передбачена можливість включення статорної обмотки на лінійну та фазну напругу мережі. Це забезпечує можливість регулювання потужності ТАД.

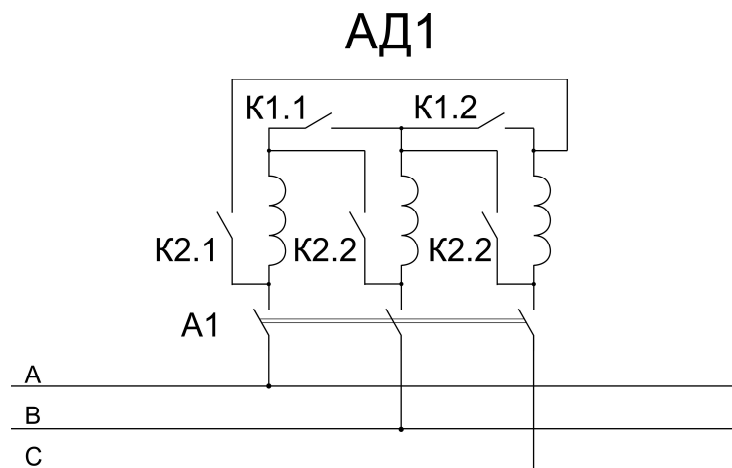


Рис. 2.2. Електрична схема включення торцевого АД.

Додаткові ступені регулювання електроприводу для підвищення гнучкості системи та забезпечення вимог на відповідний проект судна можливо отримати при застосуванні наступних засобів:

- використання статорних обмоток з можливістю переключення кількості полюсів;
- регулювання амплітуди напруги;
- застосування амплітудно-частотного керування.

Другий спосіб найбільш простий при переключенні з фазної на лінійну напругу, але це надає можливість отримати лише два ступеню регулювання. Крім того відомо, що зниження напруги веде до квадратичного зниження моменту, але при вентиляторному, наприклад, характері навантаження це припустимо.

В даному проекті обирається регулювання потужності за рахунок переключення з лінійної на фазну напругу.

2.2. Розрахунок спеціального асинхронного двигуна

Вихідні дані для розрахунку двигуна:

- напруга мережі $U = 380 \text{ В},$
- частота напруги $f = 50 \text{ Гц},$
- кількість фаз $m_1 = 3 ,$
- потужність двигуна $P_{2H} = 1100 \text{ Вт},$
- кількість пар полюсів $p = 2 .$

РОЗРАХУНОК ГОЛОВНИХ РОЗМІРІВ

Розрахунковий магнітний потік

$$\Phi = 4 \cdot 10^{-3} \text{ Вб} .$$

Обмотковий коефіцієнт

$$k_{ob1} = 0.95 .$$

Коефіцієнт ЕРС

$$k_e = 0.95 .$$

Кількість витків обмотки статора

$$W'_1 = \frac{U \cdot k_e}{4.44 \cdot f \cdot k_{ob1} \cdot \Phi} = \frac{380 \cdot 0.95}{4.44 \cdot 50 \cdot 0.95 \cdot 4 \cdot 10^{-3}} = 427.9 ,$$

приймається $W_1 = 428 .$

Розрахункові значення:

- коефіцієнта потужності

$$\cos \phi'_1 = 0.85 ,$$

- ККД

$$\eta' = 0.88 .$$

Синхронна частота обертання полю статора

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

Розрахунковий момент на валу

$$M' = \frac{2P_{2H} \cdot p}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{2 \cdot 1.1 \times 10^3 \cdot 2}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 14 \text{ Нм} .$$

Діаметр вала [7]:

$$d_3 = 32 \text{ мм}.$$

Внутрішній діаметр активної частини

$$D_1 = 3.2d_3 = 3.2 \cdot 32 = 102 \text{ мм}.$$

Струм
статора

$$I_1 = \frac{P_{2H}}{\eta' \cdot \cos\phi'_1 \cdot U \cdot m_1} = \frac{1.1 \times 10^3}{0.88 \cdot 0.85 \cdot 380 \cdot 3} = 1.29 \text{ А}.$$

Щільність струму у обмотці статора

$$\Delta_1 = 5.1 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}.$$

Кількість пазів на полюс і фазу

$$q_1 = 2.$$

Кількість паралельних гілок у обмотці статора

$$a_1 = 1.$$

Кількість зубців

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

Виходячи з висоти обертання вибирається форма паза і тип обмотки:

форма паза - кругла напівзакрита;

тип обмотки - одношарова всипна;

клас нагрівостійкості - F.

Обмотка статора виконується у розвалу (рис.2.3).

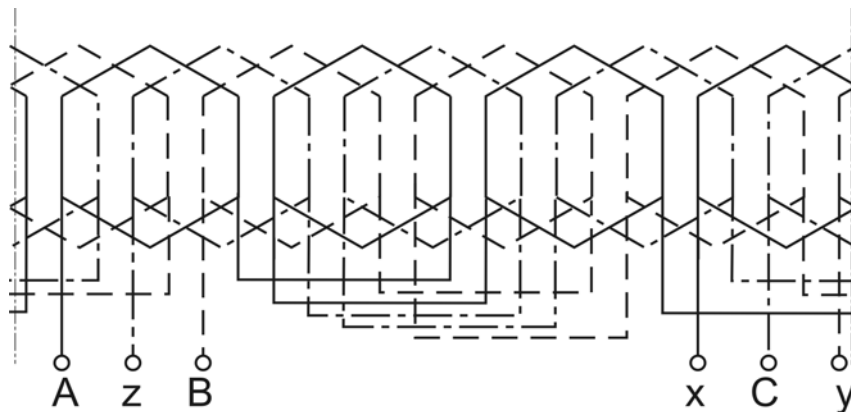


Рис. 2.3. Схема обмотки статора.

Кількість провідників у пазу обмотки статора

$$u_1 = a_1 \cdot \frac{W_1}{p \cdot q_1} = \frac{428}{2 \cdot 2} = 107 .$$

Перетин ефективного провідника обмотки статора

$$q'_{e1} = \frac{I_1}{\Delta_1 \cdot a_1} = \frac{1.29}{5.1} = 0.253 \text{ мм}^2 .$$

Обирається провід ПЕТ-155 з перетином

$$q_{e1} = 0.283 \text{ мм}^2 .$$

Відповідно кількість елементарних провідників дорівнює

$$N_{e1} = 1 .$$

Коефіцієнт заповнення пазу

$$k_{zp} = 0.7 .$$

Площина паза статора

$$S_{p1} = \frac{u_1 \cdot q_{e1} \cdot N_{e1}}{k_{zp}} = \frac{107 \cdot 0.283}{0.7} = 43.3 \text{ мм}^2 .$$

Діаметр паза статора

$$d_{p1} = 2 \cdot \sqrt{\frac{S_{p1}}{\pi}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{43.3}{\pi}} = 7.43 \text{ мм} .$$

Висота шліцу паза статора

$$h_{h1} = 1 \text{ мм} .$$

Ширіна шліцу паза статора

$$b_{h1} = 4 \cdot \sqrt{\frac{q_{e1}}{\pi}} = 4 \cdot \sqrt{\frac{0.283}{\pi}} = 1.2 \text{ мм} .$$

Середня максимальна індукція у зубцях статора

$$B'_{zc1} = 1.2 \text{ Тл} .$$

Коефіцієнт заповнення сталі

$$k_c = 0.97 .$$

Коефіцієнти довжини активної частини

$$k_{l\delta 1} = \frac{4 \cdot p \cdot \Phi \cdot 10^6}{\pi \cdot B'_{zc1} \cdot k_c} = \frac{4 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6}{\pi \cdot 1.2 \cdot 0.97} = 8.75 \times 10^3 \text{ мм}^2 .$$

$$k_{l\delta 2} = \left(\frac{z_1 \cdot d_{p1}}{\pi} - D_1 \right)^2 = \left(\frac{24 \cdot 7.43}{\pi} - 102 \right)^2 = 2.046 \times 10^3 \text{ мм}^2 .$$

$$k_{l\delta 3} = \frac{-z_1 \cdot d_{p1}}{2 \cdot \pi} + \frac{D_1}{2} = \frac{-24 \cdot 7.43}{2 \cdot \pi} + \frac{102}{2} = 22.6 \text{ мм} .$$

Довжина активної частини

$$l'_\delta = -k_{l\delta 3} + 0.5 \cdot \sqrt{k_{l\delta 2} + k_{l\delta 1}} = -22.6 + 0.5 \cdot \sqrt{2.046 \times 10^3 + 8.75 \times 10^3} = 29.4 \text{ мм} .$$

Приймається $l_\delta = 30 \text{ мм} .$

Зовнішній діаметр активної частини

$$D_2 = D_1 + 2 \cdot l_\delta = 102 + 2 \cdot 30 = 162 \text{ мм} .$$

Середній діаметр активної частини

$$D_{cp} = \frac{D_1 + D_2}{2} = \frac{102 + 162}{2} = 132 \text{ мм} .$$

Середня мінімальна ширина зубця статора

$$b_{zc} = \pi \cdot \frac{D_{cp}}{z_1} - d_{p1} = \pi \cdot \frac{132}{24} - 7.43 = 9.85 \text{ мм} .$$

Максимальна середня індукція у зубцях статора

$$B_{zmax1} = \frac{p \cdot \Phi \cdot 10^6}{l_\delta \cdot b_{zc} \cdot z_1 \cdot k_c} = \frac{2 \cdot 4 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6}{30 \cdot 9.85 \cdot 24 \cdot 0.97} = 1.16 \text{ Тл} .$$

Мінімальна ширина зубця статора

$$b_{zmin1} = \pi \cdot \frac{D_1}{z_1} - d_{p1} = \pi \cdot \frac{102}{24} - 7.43 = 5.92 \text{ мм} .$$

Полюсне ділення

$$\tau = \pi \cdot \frac{D_{cp}}{2 \cdot p} = \pi \cdot \frac{132}{2 \cdot 2} = 104 \text{ мм} .$$

Товщина повітряного зазору

$$\delta = 0.2 \text{ мм} .$$

Кількість пазів ротора

$$z_2 = 17 .$$

Розрахунковий коефіцієнт струму намагнічування

$$k_{\mu i} = 1.25 .$$

Струм у стрижні ротора

$$I_2 = \frac{m_1 \cdot W_1 \cdot k_{obl} \cdot 2 \cdot I_1}{z_2 \cdot k_{\mu i}} = \frac{3 \cdot 428 \cdot 0.95 \cdot 2 \cdot 1.29}{17 \cdot 1.25} = 148 \text{ А} .$$

Щільність струму у обмотці ротора

$$\Delta_2 = 2.5 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2} .$$

Площина паза ротора

$$q_{e2} = \frac{I_2}{\Delta_2} = \frac{148}{2.5} = 59.2 \text{ мм}^2 .$$

Діаметр паза ротора

$$d_{p2} = 2 \cdot \sqrt{\frac{q_{e2}}{\pi}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{59.2}{\pi}} = 8.68 \text{ мм} .$$

Мінімальна ширина зубця ротора

$$b_{zmin2} = \pi \cdot \frac{D_1}{z_2} - d_{p2} = \pi \cdot \frac{102}{17} - 8.68 = 10.2 \text{ мм} .$$

Індукція у повітряному зазорі

$$B_\delta = \frac{4 \cdot p \cdot \Phi \cdot 10^6}{\pi \cdot (D_2^2 - D_1^2) \cdot k_c} = \frac{4 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6}{\pi \cdot (162^2 - 102^2) \cdot 0.97} = 0.663 \text{ Тл} .$$

Коефіцієнт

$$\alpha = 0.64 .$$

Індукція в спинці

$$B_c = 1.3 \text{ Тл} .$$

Висота спинки

$$h_c = \frac{0.5 \cdot \alpha \cdot \tau \cdot B_\delta}{B_c \cdot k_c} = \frac{0.5 \cdot 0.64 \cdot 104 \cdot 0.663}{1.3 \cdot 0.97} = 17.5 \text{ мм} .$$

Висота шліца обмотки ротора

$$h_{h2} = 1 \text{ мм} .$$

Ширіна шліца обмотки ротора

$$b_{h2} = 1 \text{ мм} .$$

Середнє пазове ділення ротора

$$t_{cp2} = \frac{\pi \cdot D_{cp}}{z_2} = \frac{\pi \cdot 132}{17} = 24.4 \text{ мм} .$$

РОЗРАХУНОК ОПОРІВ ОБМОТОК

Середнє пазове ділення статора

$$t_{cp1} = \frac{\pi \cdot (D_1 + D_2)}{2z_1} = \frac{\pi \cdot (102 + 162)}{2 \cdot 24} = 17.3 \text{ мм} .$$

Шаг обмотки статора по рис.2.3

$$y_1 = 5 .$$

Довжина лобової частини обмотки статора:

- зовні

$$l_{1H} = y_1 \cdot \frac{\pi \cdot D_2}{z_1} + 4 \cdot d_{p1} = 5 \cdot \frac{\pi \cdot 162}{24} + 4 \cdot 7.43 = 136 \text{ мм} ,$$

- усередині

$$l_{1B} = y_1 \cdot \frac{\pi \cdot D_1}{z_1} + 2 \cdot d_{p1} = 5 \cdot \frac{\pi \cdot 102}{24} + 2 \cdot 7.43 = 81.6 \text{ мм} .$$

Середня довжина витка обмотки статора

$$l_{cp1} = 2 \cdot l_{\delta} + l_{1H} + l_{1B} = 2 \cdot 30 + 136 + 81.6 = 278 \text{ мм} .$$

Середня довжина лобової частини обмотки статора

$$l_{cp.l1} = \frac{l_{1H} + l_{1B}}{2} = \frac{136 + 81.6}{2} = 109 \text{ мм} .$$

Пазове розсіювання обмотки статора

$$\lambda_{п1} = 0.66 + \frac{h_{h1}}{b_{h1}} = 0.66 + \frac{1}{1.2} = 1.49 .$$

Полюсне ділення:

- зовні

$$\tau_H = \frac{\pi \cdot D_2}{2p} = \frac{\pi \cdot 162}{2 \cdot 2} = 127 \text{ мм} ,$$

- усередині

$$\tau_B = \frac{\pi \cdot D_1}{2p} = \frac{\pi \cdot 102}{2 \cdot 2} = 80.1 \text{ мм} .$$

					141.4301з. БР. ПЗ. Р2	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		27

Лобове розсіювання обмотки статора:

- зовні

$$\lambda_{л1Н} = \frac{0.34q_1}{l_\delta} \cdot (l_{1Н} - 0.64 \cdot \tau_H) = \frac{0.34 \cdot 2}{30} \cdot (136 - 0.64 \cdot 127) = 1.24,$$

- усередині

$$\lambda_{л1В} = \frac{0.34q_1}{l_\delta} \cdot (l_{1В} - 0.64 \cdot \tau_B) = \frac{0.34 \cdot 2}{30} \cdot (81.6 - 0.64 \cdot 80.1) = 0.688.$$

Коефіцієнти диференційного розсіювання

$$k_{h1} = 1 - \frac{0.033 \cdot b_{h1}^2}{t_{cp1} \cdot \delta} = 1 - \frac{0.033 \cdot 1.2^2}{17.3 \cdot 0.2} = 0.986,$$

$$k_{д1} = 0.022.$$

Коефіцієнт зубчасті

$$K_{\delta 1} = 1 + \frac{1}{\frac{b_{h1} \cdot t_{cp1} + 5 \cdot t_{cp1} \cdot \delta}{b_{h1}^2} - 1} = 1 + \frac{1}{\frac{1.2 \cdot 17.3 + 5 \cdot 17.3 \cdot 0.2}{1.2^2} - 1} = 1.04.$$

Коефіцієнт зубчасті

$$K_{\delta 2} = 1 + \frac{1}{\frac{(b_{h2} \cdot t_{cp2} + 5 \cdot t_{cp2} \cdot \delta)}{b_{h2}^2} - 1} = 1 + \frac{1}{\frac{24.4 + 5 \cdot 24.4 \cdot 0.2}{1^2} - 1} = 1.02.$$

Загальний коефіцієнт зубчасті

$$K_\delta = K_{\delta 1} \cdot K_{\delta 2} = 1.04 \cdot 1.02 = 1.06.$$

Диференційне розсіювання обмотки статора

$$\lambda_{д1} = \frac{0.9 t_{cp1} \cdot k_{h1} \cdot k_{д1} \cdot (q_1 \cdot k_{об1})^2}{\delta \cdot K_\delta} = \frac{0.9 \cdot 17.3 \cdot 0.986 \cdot 0.022 \cdot (2 \cdot 0.95)^2}{0.2 \cdot 1.06} = 5.75.$$

Повне розсіювання обмотки статора

$$\lambda_1 = \lambda_{п1} + \lambda_{л1Н} + \lambda_{л1В} + \lambda_{д1} = 1.49 + 1.24 + 0.688 + 5.75 = 9.17.$$

Питомий опір для міді

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

Активний опір обмотки статора

$$R_1 = \rho_m \cdot \frac{W_1 \cdot l_{cp1}}{q_{e1} \cdot a_1} = 24.4 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{428 \cdot 278}{0.283} = 10.3 \text{ Ом} .$$

Індуктивний опір обмотки статора

$$X_1 = \frac{1.58 \cdot f \cdot l_\delta \cdot W_1^2 \cdot \lambda_1}{p \cdot q_1 \cdot 10^8} = \frac{1.58 \cdot 50 \cdot 30 \cdot 428^2 \cdot 9.17}{2 \cdot 2 \cdot 10^8} = 9.95 \text{ Ом} .$$

Пазове розсіювання обмотки ротора

$$\lambda_{п2} = 0.66 + \frac{h_{h2}}{b_{h2}} = 0.66 + \frac{1}{1} = 1.66 .$$

Перетин короткозамикаючого кільця обмотки ротора

$$S_k = 0.4 \cdot z_2 \cdot \frac{q_{e2}}{2 \cdot p} = 0.4 \cdot 17 \cdot \frac{59.2}{2 \cdot 2} = 101 \text{ мм}^2 .$$

Висота короткозамикаючого кільця обмотки ротора

$$h_k = 1.1 \cdot d_{p2} = 1.1 \cdot 8.68 = 9.55 \text{ мм} .$$

Довжина короткозамикаючого кільця обмотки ротора

$$l_k = \frac{S_k}{h_k} = \frac{101}{9.55} = 10.6 \text{ мм} .$$

Коефіцієнт зведення опірив к.з. кільця до обмотки ротора

$$k_{pr} = 2 \cdot \sin\left(\pi \cdot \frac{p}{z_2}\right) = 2 \cdot \sin\left(\pi \cdot \frac{2}{17}\right) = 0.722 .$$

Складова лобового розсіювання обмотки ротора:

- зовні

$$\lambda_{л22H} = \log\left[\frac{2.35 \cdot (D_2 + l_k)}{h_k + l_k}\right] = \log\left[\frac{2.35 \cdot (162 + 10.6)}{9.55 + 10.6}\right] = 1.3 ,$$

- усередині

$$\lambda_{л22B} = \log\left[\frac{2.35 \cdot (D_1 - l_k)}{h_k + l_k}\right] = \log\left[\frac{2.35 \cdot (102 - 10.6)}{9.55 + 10.6}\right] = 1.03 .$$

Лобове розсіювання обмотки ротора:

- зовні

$$\lambda_{л2H} = \frac{1.45 \cdot (D_2 + l_k)}{z_2 \cdot l_\delta \cdot k_{pr}^2} \cdot \lambda_{л22H} = \frac{1.45 \cdot (162 + 10.6)}{17 \cdot 30 \cdot 0.722^2} \cdot 1.3 = 1.22 ,$$

- усередині

$$\lambda_{л2В} = \frac{1.45 \cdot (D_1 - l_k)}{z_2 \cdot l_\delta \cdot k_{pr}^2} \cdot \lambda_{л22Н} = \frac{1.45 \cdot (102 - 10.6)}{17 \cdot 30 \cdot 0.722^2} \cdot 1.3 = 0.648 .$$

Коефіцієнт

$$k_{д2} = 0.05 .$$

Диференційне розсіювання обмотки ротора

$$\lambda_{д2} = \frac{0.9 t_{cp2} \cdot k_{д2}}{\delta \cdot K_\delta} \cdot \left(\frac{z_2}{6p} \right)^2 = \frac{0.9 \cdot 24.4 \cdot 0.05}{0.2 \cdot 1.06} \cdot \left(\frac{17}{6 \cdot 2} \right)^2 = 10.4 .$$

Повне розсіювання обмотки ротора

$$\lambda_2 = \lambda_{л2} + \lambda_{л2Н} + \lambda_{л2В} + \lambda_{д2} = 1.66 + 1.22 + 0.648 + 10.4 = 13.9 .$$

Питомий опір для алюмінія

$$\rho_{ал} = 48.8 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{мм} .$$

Активний опір стрижня обмотки ротора

$$R_{2c} = \rho_{ал} \cdot \frac{l_\delta}{q_{e2}} = 48.8 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{30}{59.2} = 2.47 \times 10^{-5} \text{ Ом} .$$

Активний опір зовнішнього к.з. кільця обмотки ротора

$$R_{k2} = \frac{\rho_{ал} \cdot \pi \cdot (D_2 + l_k)}{z_2 \cdot S_k \cdot k_{pr}^2} = \frac{48.8 \cdot 10^{-6} \cdot \pi \cdot (162 + 10.6)}{17 \cdot 101 \cdot 0.722^2} = 2.96 \times 10^{-5} \text{ Ом} .$$

Активний опір внутрішнього к.з. кільця обмотки

$$R_{k1} = \frac{\rho_{ал} \cdot \pi \cdot (D_1 - l_k)}{z_2 \cdot S_k \cdot k_{pr}^2} = \frac{48.8 \cdot 10^{-6} \cdot \pi \cdot (102 - 10.6)}{17 \cdot 101 \cdot 0.722^2} = 1.57 \times 10^{-5} \text{ Ом} .$$

Активний опір к.з. кільців обмотки ротора

$$R_k = R_{k1} + R_{k2} = 1.57 \times 10^{-5} + 2.96 \times 10^{-5} = 4.53 \times 10^{-5} \text{ Ом} .$$

Коефіцієнт зведення опорів обмотки ротора до статора

$$k_{21} = \frac{4 \cdot m_1}{z_2} \cdot (W_1 \cdot k_{об1})^2 = \frac{4 \cdot 3}{17} \cdot (428 \cdot 0.95)^2 = 1.167 \times 10^5 .$$

Зведений активний опір обмотки ротора

$$R_{21} = k_{21} \cdot (R_{2c} + R_k) = 1.167 \times 10^5 \cdot (2.47 \times 10^{-5} + 4.53 \times 10^{-5}) = 8.17 \text{ Ом} .$$

Зведений індуктивний опір обмотки ротора

$$X_{21} = 7.9 \cdot f \cdot l_\delta \cdot k_{21} \cdot \lambda_2 \cdot 10^{-9} = 7.9 \cdot 50 \cdot 30 \cdot 1.167 \times 10^5 \cdot 13.9 \cdot 10^{-9} = 19.2 \text{ Ом}$$

					141. 4301з. БР. ПЗ. Р2	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		30

РОЗРАХУНОК МАГНІТНОГО КОЛА

МРС повітряного зазору

$$F_{\delta} = 0.8 \cdot \delta \cdot K_{\delta} \cdot B_{\delta} \cdot 10^3 = 0.8 \cdot 0.2 \cdot 1.06 \cdot 0.663 \cdot 10^3 = 112 \text{ А} .$$

Напруженість у зубцях статора

$$H_{z1} = 4.01 \frac{\text{А}}{\text{см}} .$$

МРС зубців статора

$$F_{z1} = 0.1 \cdot H_{z1} \cdot (d_{p1} + h_{h1}) = 0.1 \cdot 4.01 \cdot (7.43 + 1) = 3.38 \text{ А} .$$

Площина активної зони

$$S_{az} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_2^2 - D_1^2) = \frac{\pi}{4} \cdot (162^2 - 102^2) = 1.244 \times 10^4 \text{ мм}^2 .$$

Середня індукція у зубцях

$$B_{zc2} = \frac{p \cdot \Phi \cdot 10^6}{(S_{az} - z_2 \cdot d_{p2} \cdot l_{\delta}) \cdot k_c} = \frac{2 \cdot 4 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6}{(1.244 \times 10^4 - 17 \cdot 8.68 \cdot 30) \cdot 0.97} = 1 \text{ Тл} .$$

Напруженість у зубцях ротора

$$H_{z2} = 3.24 \frac{\text{А}}{\text{см}} .$$

МРС зубців ротора

$$F_{z2} = 0.1 \cdot H_{z2} \cdot (d_{p2} + h_{h2}) = 0.1 \cdot 3.24 \cdot (8.68 + 1) = 3.14 \text{ А} .$$

Напруженість у спілці

$$H_c = 3.2 \frac{\text{А}}{\text{см}} .$$

Середня довжина силової лінії у спілці

$$L_c = \frac{\pi \cdot D_{cp}}{4 \cdot p} = \frac{\pi \cdot 132}{4 \cdot 2} = 51.8 \text{ мм} .$$

МРС у спілці

$$F_c = 0.1 \cdot H_c \cdot L_c = 0.1 \cdot 3.2 \cdot 51.8 = 16.6 \text{ А} .$$

Загальна МРС

$$F_{\Sigma} = F_{\delta} + 2 \cdot F_c + F_{z1} + F_{z2} = 112 + 2 \cdot 16.6 + 3.38 + 3.14 = 152 \text{ А} .$$

Струм намагнічування

$$I_{\mu} = \frac{2.22 \cdot F_{\Sigma} \cdot p}{m_1 \cdot W_1 \cdot k_{obl}} = \frac{2.22 \cdot 152 \cdot 2}{3 \cdot 428 \cdot 0.95} = 0.553 \text{ А} .$$

Відносний струм намагнічування

$$I_{\mu\%} = \frac{I_{\mu} \cdot 100}{I_1} = \frac{0.553 \cdot 100}{1.29} = 42.9 \text{ \%} .$$

Індуктивний опір гілки намагнічування

$$X_{\mu} = \frac{k_e \cdot U}{I_{\mu}} = \frac{0.95 \cdot 380}{0.553} = 653 \text{ Ом} .$$

Об'єм пазів статора

$$V_{zp1} = \pi \cdot d_{p1}^2 \cdot \frac{z_1 \cdot l_{\delta}}{4} = \pi \cdot 7.43^2 \cdot \frac{24 \cdot 30}{4} = 3.122 \times 10^4 \text{ мм}^3 .$$

Об'єм шлиців статора

$$V_{zh1} = z_1 \cdot h_{h1} \cdot b_{h1} \cdot l_{\delta} = 24 \cdot 1.2 \cdot 30 = 864 \text{ мм}^3 .$$

Об'єм активної зони статора

$$V_{az1} = S_{az} \cdot (d_{p1} + h_{h1}) = 1.244 \times 10^4 \cdot (7.43 + 1) = 1.049 \times 10^5 \text{ мм}^3 .$$

Об'єм пазів і шлиців статора

$$V_{ph1} = V_{zp1} + V_{zh1} = 3.122 \times 10^4 + 864 = 3.208 \times 10^4 \text{ мм}^3 .$$

Об'єм зубців статора

$$V_{z1} = V_{az1} - V_{ph1} = 1.049 \times 10^5 - 3.208 \times 10^4 = 7.279 \times 10^4 \text{ мм}^3 .$$

Маса зубців статора

$$m_{z1} = 7.8 \cdot 10^{-6} \cdot k_c \cdot V_{z1} = 7.8 \cdot 10^{-6} \cdot 0.97 \cdot 7.279 \times 10^4 = 0.551 \text{ кг} .$$

Маса спілки статора

$$m_{c1} = 7.8 \cdot 10^{-6} \cdot S_{az} \cdot h_c \cdot k_c = 7.8 \cdot 10^{-6} \cdot 1.244 \times 10^4 \cdot 17.5 \cdot 0.97 = 1.65 \text{ кг} .$$

Втрати потужності у зубцях статора

$$P_{z1} = 2.7 \cdot B_{z\max1}^2 \cdot m_{z1} = 2.7 \cdot 1.16^2 \cdot 0.551 = 2 \text{ Вт} .$$

Втрати потужності у спілці статора

$$P_{c1} = 2.7 \cdot B_c^2 \cdot m_{c1} = 2.7 \cdot 1.3^2 \cdot 1.65 = 7.53 \text{ Вт} .$$

Загальні втрати потужності у сталі

$$P_{ст} = P_{z1} + P_{c1} = 2 + 7.53 = 9.53 \text{ Вт} .$$

Активний опір гілки намагнічування

$$R_{\mu} = \frac{P_{ст}}{m_1 \cdot I_{\mu}^2} = \frac{9.53}{3 \cdot 0.553^2} = 10.4 \text{ Ом} .$$

РОЗРАХУНОК НОМІНАЛЬНОГО РЕЖИМУ

Номінальне ковзання

$$s_n = 0.0238 .$$

Повний опір робочої гілки

$$Z_{21s} = \frac{R_{21}}{s_n} + i \cdot X_{21} = \frac{8.17}{0.024} + i \cdot 19.2 = 343 + 19.2i \text{ Ом} .$$

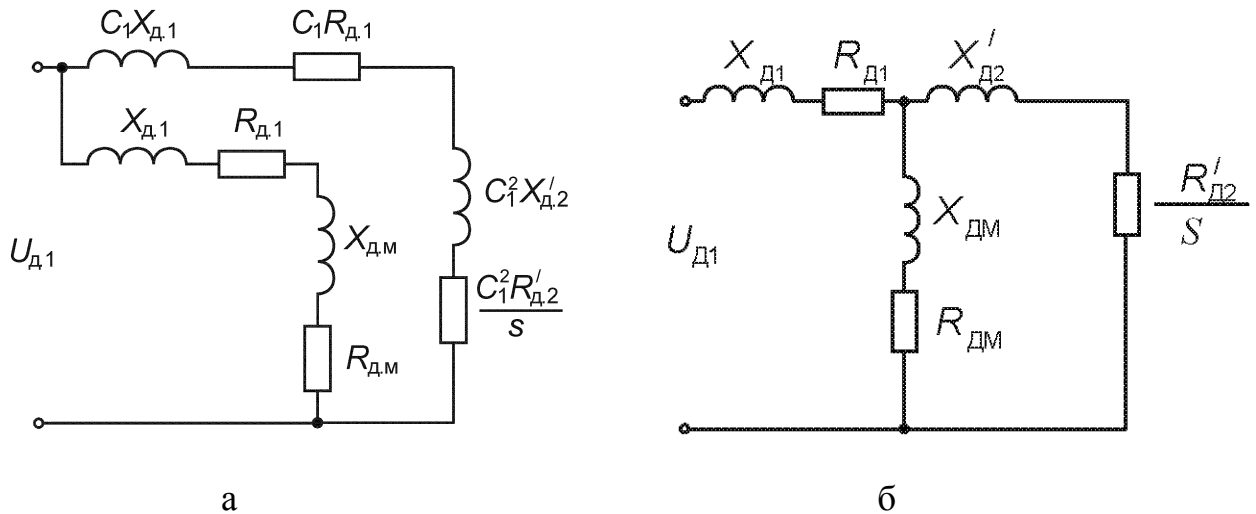


Рис.2.4. Г-подібна (а) та Т-подібна (б) заступні схеми.

Еквівалентний опір паралельних гілок заступної схеми (рис.2.4, б)

$$Z_{ps} = \frac{Z_{21s} \cdot Z_{\mu}}{Z_{21s} + Z_{\mu}} = \frac{(343 + 19.2 \cdot i) \cdot (10.4 + 653 \cdot i)}{343 + 19.2 \cdot i + 10.4 + 653 \cdot i} = 256 + 148i \text{ Ом} .$$

Еквівалентний опір заступної схеми (рис.2.5, б)

$$Z_{ek} = Z_1 + Z_{ps} = 10.3 + 9.95 \cdot i + 256 + 148 \cdot i = 266 + 158i \text{ Ом} .$$

Номінальний коефіцієнт потужності

$$\cos \phi_{1n} = \cos(\arg(Z_{ek})) = \cos(\arg(266 + 158 \cdot i)) = 0.86 .$$

Номінальний струм статора

$$I_{1n} = \frac{U}{|Z_{ek}|} = \frac{380}{|266 + 158 \cdot i|} = 1.23 \text{ А} .$$

Номінальний зведений струм ротора

$$I_{21n} = U \cdot \left| \frac{Z_{ek} - Z_1}{Z_{ek} \cdot Z_{21s}} \right| = 380 \cdot \left| \frac{266 + 158 \cdot i - (10.3 + 9.95 \cdot i)}{(266 + 158 \cdot i) \cdot (343 + 19.2 \cdot i)} \right| = 1.06 \text{ А} .$$

Номінальна потужність споживання

$$P_{1n} = 10^{-3} \cdot m_1 \cdot U \cdot I_{1n} \cdot \cos\phi_{1n} = 10^{-3} \cdot 3 \cdot 380 \cdot 1.23 \cdot 0.86 = 1.21 \text{ кВт.}$$

Втрати потужності:

- у обмотці статора

$$P_{e1} = m_1 \cdot I_{1n}^2 \cdot R_1 = 3 \cdot 1.23^2 \cdot 10.3 = 46.7 \text{ Вт.}$$

- у обмотці ротора

$$P_{e2} = m_1 \cdot I_{21n}^2 \cdot R_{21} = 3 \cdot 1.06^2 \cdot 8.17 = 27.5 \text{ Вт.}$$

- загальні електричні

$$p_{3e} = P_{e1} + P_{e2} = 46.7 + 27.5 = 74.2 \text{ Вт.}$$

- механічні

$$P_{\text{mex}} = \frac{\left[\left[n_1 \cdot (1 - s_n) \right]^2 \cdot D_1^4 \right]}{3 \cdot 10^{14}} = \frac{\left[\left[1.5 \times 10^3 \cdot (1 - 0.024) \right]^2 \cdot 102^4 \right]}{3 \cdot 10^{14}} = 0.774 \text{ Вт.}$$

- додаткові

$$P_{\text{dob}} = 0.01 \cdot P_{2n} = 0.01 \cdot 1.1 \times 10^3 = 11 \text{ Вт.}$$

- загальні

$$p_s = p_{3e} + P_{\text{ст}} + P_{\text{mex}} + P_{\text{dob}} = 74.2 + 9.53 + 0.774 + 11 = 95.5 \text{ Вт.}$$

Корисна потужність

$$P_{2n} = P_{1n} - p_s \cdot 10^{-3} = 1.21 - 95.5 \cdot 10^{-3} = 1.115 \text{ кВт.}$$

ККД

$$\eta = \frac{P_{2n}}{P_{1n}} = \frac{1.115}{1.21} = 0.921.$$

Номінальний момент

$$M_{2n} = \frac{P_{2n} \cdot p \cdot 10^3}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot (1 - s_n)} = \frac{1.115 \cdot 2 \cdot 10^3}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot (1 - 0.024)} = 7.27 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Лінійне навантаження статора

$$A_1 = \frac{10 \cdot I_{1n} \cdot u_1}{t_{\text{ср1}} \cdot a_1} = \frac{10 \cdot 1.23 \cdot 107}{17.3} = 76.1 \frac{\text{А}}{\text{см}}.$$

					141. 4301з. БР. ПЗ. Р2	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		34

Щільність струму в обмотці статора

$$\Delta_1 = \frac{I_{1n}}{a_1 \cdot N_{e1} \cdot q_{e1}} = \frac{1.23}{1 \cdot 0.283} = 4.35 \frac{\text{A}}{\text{мм}^2}.$$

Струм в стрижні короткозамкненого ротора

$$I_{ст} = \frac{I_{21n} \cdot 2 \cdot m_1 \cdot W_1 \cdot k_{об1}}{z_2} = \frac{1.06 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 428 \cdot 0.95}{17} = 152 \text{ A}.$$

Щільність струму в стрижні ротора

$$\Delta_2 = \frac{I_{ст}}{q_{e2}} = \frac{152}{59.2} = 2.57 \frac{\text{A}}{\text{мм}^2}.$$

Номінальний електромагнітний момент

$$M_n = \frac{m_1 \cdot I_{21n}^2 \cdot p \cdot R_{21}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot s_n} = \frac{3 \cdot 1.06^2 \cdot 2 \cdot 8.17}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0.024} = 7.37 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Коефіцієнт зведення до Г-подібної заступної схеми

$$c_1 = 1 + \frac{X_1}{X_\mu} = 1 + \frac{9.95}{653} = 1.02.$$

РОЗРАХУНОК ПУСКОВОГО РЕЖИМУ

Еквівалентний опір паралельних гілок заступної схеми при пуску

$$Z_{pp} = \frac{Z_\mu \cdot (R_{21} + i \cdot X_{21})}{Z_\mu + (R_{21} + i \cdot X_{21})} = \frac{(10.4 + 653 \cdot i) \cdot (8.17 + i \cdot 19.2)}{10.4 + 653 \cdot i + 8.17 + i \cdot 19.2} = 7.72 + 18.7i \text{ Ом}.$$

Еквівалентний опір заступної схеми при пуску

$$Z_{екр} = Z_1 + Z_{pp} = 10.3 + 9.95 \cdot i + 7.72 + 18.7 \cdot i = 18 + 28.6i \text{ Ом}.$$

Пусковий струм:

- при з'єднанні трикутник

$$I_{1p\Delta} = \frac{U_\Delta}{|Z_{екр}|} = \frac{380}{|18 + 28.6 \cdot i|} = 11.2 \text{ A};$$

- при з'єднанні

зір...

$$I_{1pY} = \frac{U_Y}{|Z_{екр}|} = \frac{220}{|18 + 28.6 \cdot i|} = 6.51 \text{ A}.$$

Пусковий зведений струм ротора

- при з'єднанні трикутник

$$I_{21p\Delta} = \frac{U_{\Delta} \cdot |Z_{pp}|}{|Z_{\text{екр}} \cdot (R_{21} + i \cdot X_{21})|} = \frac{380 \cdot |7.72 + 18.7 \cdot i|}{|(18 + 28.6 \cdot i) \cdot (8.17 + i \cdot 19.2)|} = 10.9 \text{ А};$$

- при з'єднанні зірка

$$I_{21pY} = \frac{U_Y \cdot |Z_{pp}|}{|Z_{\text{екр}} \cdot (R_{21} + i \cdot X_{21})|} = \frac{220 \cdot |7.72 + 18.7 \cdot i|}{|(18 + 28.6 \cdot i) \cdot (8.17 + i \cdot 19.2)|} = 6.31 \text{ А}.$$

Пусковий електромагнітний момент

- при з'єднанні трикутник

$$M_{p\Delta} = \frac{m_1 \cdot I_{21p\Delta}^2 \cdot p \cdot R_{21}}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{3 \cdot 10.9^2 \cdot 2 \cdot 8.17}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 18.5 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

- при з'єднанні зірка

$$M_{pY} = \frac{m_1 \cdot I_{21pY}^2 \cdot p \cdot R_{21}}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{3 \cdot 6.31^2 \cdot 2 \cdot 8.17}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 6.21 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Кратність пускового моменту

- при з'єднанні трикутник

$$k_{pm\Delta} = \frac{M_{p\Delta}}{M_n} = \frac{18.5}{7.37} = 2.51;$$

- при з'єднанні зірка

$$k_{pmY} = \frac{M_{pY}}{M_n} = \frac{6.21}{7.37} = 0.843.$$

Кратність пускового струму

- при з'єднанні трикутником

$$k_{pi\Delta} = \frac{I_{1p\Delta}}{I_{1n}} = \frac{11.2}{1.23} = 9.1;$$

- при з'єднанні зірка

$$k_{piY} = \frac{I_{1pY}}{I_{1n}} = \frac{6.51}{1.23} = 5.3.$$

РОЗРАХУНОК МОМЕНТА ІНЕРЦІЇ РОТОРА

Товщина опори ротора

$$\Delta_p = 6 \text{ мм}.$$

Об'єм активної зони ротора

$$V_{za2} = S_{az} \cdot (d_{p2} + h_{h2}) = 1.244 \times 10^4 \cdot (8.68 + 1) = 1.204 \times 10^5 \text{ мм}^3.$$

Об'єм шлиців ротора

$$V_{zh2} = z_2 \cdot h_{h2} \cdot l_\delta \cdot b_{h2} = 17 \cdot 30 = 510 \text{ мм}^3.$$

Об'єм пазів ротора

$$V_{zp2} = \pi \cdot d_{p2}^2 \cdot \frac{z_2 \cdot l_\delta}{4} = \pi \cdot 8.68^2 \cdot \frac{17 \cdot 30}{4} = 3.018 \times 10^4 \text{ мм}^3.$$

Об'єм зубців

$$V_{z2} = V_{za2} - V_{zh2} - V_{zp2} = 1.204 \times 10^5 - 510 - 3.018 \times 10^4 = 8.973 \times 10^4 \text{ мм}^3.$$

Маса зубців ротора

$$m_{z2} = 7.8 \cdot 10^{-6} \cdot k_c \cdot V_{z2} = 7.8 \cdot 10^{-6} \cdot 0.97 \cdot 8.973 \times 10^4 = 0.679 \text{ кг}.$$

Маса спинки ротора

$$m_{c2} = m_{c1} = 1.65 \text{ кг}.$$

Товщина опори спинки ротора

$$\Delta_1 = 6 \text{ мм}.$$

Перша складова об'єму опори ротора

$$V_{o1} = \frac{\pi \cdot \Delta_1 \cdot [D_2^2 - (D_1 - \Delta_p)^2]}{4 \cdot 10^3} = \frac{\pi \cdot 6 \cdot [162^2 - (102 - 6)^2]}{4 \cdot 10^3} = 80.2 \text{ см}^3.$$

Загальна висота магнітопровода ротора

$$h_{\Sigma 2} = d_{p2} + h_{h2} + h_c = 8.68 + 1 + 17.5 = 27.2 \text{ мм}.$$

Друга складова об'єму опори ротора

$$V_{o2} = \frac{\pi \cdot [D_1^2 - (D_1 - \Delta_p)^2] \cdot h_{\Sigma 2}}{4 \cdot 10^3} = \frac{\pi \cdot [102^2 - (102 - 6)^2] \cdot 27.2}{4 \cdot 10^3} = 25.4 \text{ см}^3.$$

Об'єм опори ротора

$$V_o = V_{o1} + V_{o2} = 80.2 + 25.4 = 106 \text{ см}^3.$$

Маса опори ротора

$$m_o = 2.71 \cdot 10^{-3} \cdot V_o = 2.71 \cdot 10^{-3} \cdot 106 = 0.287 \text{ кг}.$$

Маса ротора

$$m_p = m_{z2} + m_{c2} + m_o = 0.679 + 1.65 + 0.287 = 2.62 \text{ кг} .$$

Складова моменту інерції ротора

$$R_j = \frac{D_2^2 + (D_1 - 2 \cdot \Delta_p)^2}{4 \cdot 10^6} = \frac{162^2 + (102 - 2 \cdot 6)^2}{4 \cdot 10^6} = 8.59 \times 10^{-3} \text{ м}^2 .$$

Момент інерції ротора

$$j_p = \frac{m_p}{2} \cdot R_j = \frac{2.62}{2} \cdot 8.59 \times 10^{-3} = 0.011 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 .$$

Загальний момент інерції механізму

$$j_M = 0.089 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 .$$

Загальний момент інерції рухливої частини

$$j = j_p + j_M = 0.011 + 0.089 = 0.1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 .$$

2.3. Вибір автомату захисту.

Робочий струм автомату

$$I_p = 1.25 I_{1n} = 1.25 \cdot 1.23 = 1.54 \text{ А} .$$

Струм електромагнітного розчіплювача автомату

$$I_{cp} = 1.2 \cdot I_{1p\Delta} = 1.2 \cdot 11.2 = 13.4 \text{ А} .$$

Для захисту АД обирається трьохполюсний автомат А 3775М з номінальним струмом спрацьовування електромагнітного розчіплювача 500 А і часом спрацьовування 0,04 с. Для захисту від перевантаження використовується термобіметалічний розчіплювач з уставкою струму 16 А і часу 0,1 с при к.з..

					141. 4301з. БР. ПЗ. РЗ					
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата						
Розроб.		Єрмолаєва О.В.			РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК СПЕЦІАЛЬНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА		Лім.	Лист	Листів	
Керівник		Кімстач О.Ю.							39	9
.							НУК			
Н. контр.										
В.о. зав. каф.		Обрубков А.В.								

РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК СПЕЦІАЛЬНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

3.1. Розрахунок електромеханічних характеристик

Задаючись рядом значень ковзання від 0 до 1, виконується розрахунок у наступному порядку:

Момент опору

$$M_c(s) = \left(\frac{1-s}{1-s_n} \right)^2.$$

Еквівалентний опір

$$Z_{ek}(s) = Z_1 + \frac{Z_\mu \cdot \left(\frac{R_{21}}{s} + i \cdot X_{21} \right)}{Z_\mu + \left(\frac{R_{21}}{s} + i \cdot X_{21} \right)}.$$

Момент двигуна

- при з'єднанні трикутник

$$M_\Delta(s) = \frac{m_1 \cdot U_\Delta^2 \cdot p \cdot R_{21}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot s \cdot M_n \cdot \left[\left(R_1 + \frac{c_1 \cdot R_{21}}{s} \right)^2 + (X_1 + X_{21} \cdot c_1)^2 \right]};$$

- при з'єднанні зірка

$$M_Y(s) = \frac{m_1 \cdot U_Y^2 \cdot p \cdot R_{21}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot s \cdot M_n \cdot \left[\left(R_1 + \frac{c_1 \cdot R_{21}}{s} \right)^2 + (X_1 + X_{21} \cdot c_1)^2 \right]}.$$

Струм двигуна

- при з'єднанні трикутник

$$I_{1\Delta}(s) = \frac{U_\Delta}{I_{1n} \cdot |Z_{ek}(s)|};$$

- при з'єднанні зірка

$$I_{1Y}(s) = \frac{U_Y}{I_{1n} \cdot |Z_{ek}(s)|} .$$

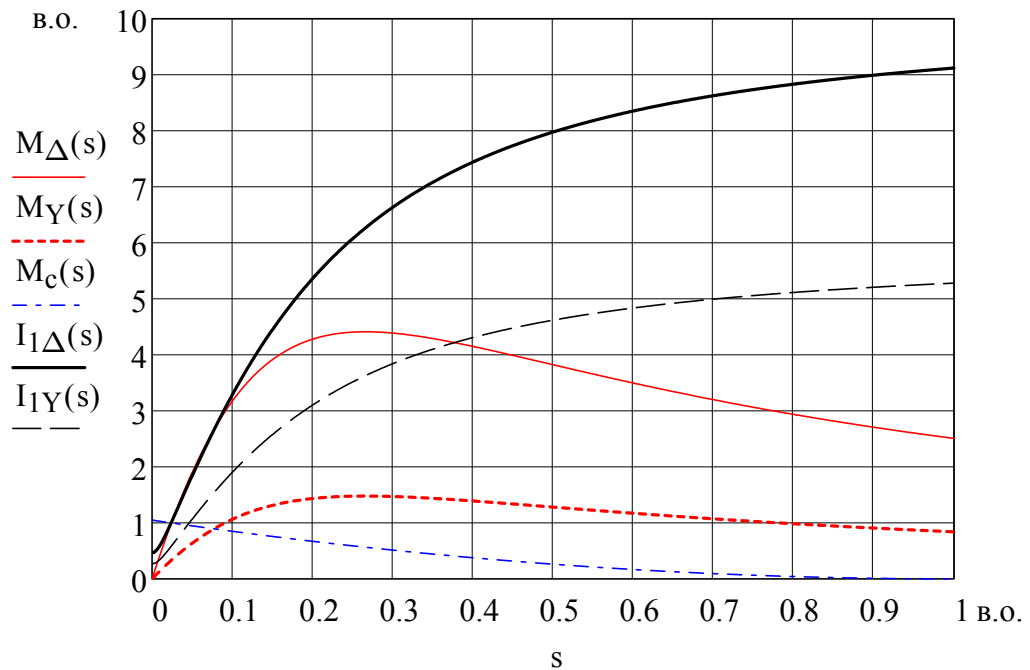


Рис.3.1. Електромеханічні характеристики двигуна

Номінальне ковзання при з'єднанні зірка

$$s_{nY} = 0.077 .$$

Номінальний електромагнітний момент при з'єднанні зірка

$$M_{nY} = M_n \cdot M_Y(s_{nY}) = 7.37 \cdot 0.894 = 6.59 \quad \text{Нм} .$$

Механічні втрати потужності при з'єднанні зірка

$$P_{\text{mexY}} = \frac{\left[n_1 \cdot (1 - s_{nY}) \right]^2 \cdot D_1^4}{3 \cdot 10^{14}} = \frac{\left[1.5 \times 10^3 \cdot (1 - 0.077) \right]^2 \cdot 102^4}{3 \cdot 10^{14}} = 0.691 \quad \text{Вт} .$$

Номінальна механічна потужність при з'єднанні зірка

$$P_{2\text{mHY}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot (1 - s_{nY}) \cdot M_{nY}}{p} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot (1 - 0.077) \cdot 6.59}{2} = 955 \quad \text{Вт} .$$

Номінальна корисна потужність при з'єднанні зірка

$$P_{2\text{HY}} = P_{2\text{mHY}} - (P_{\text{mexY}} + P_{\text{dob}}) = 955 - (0.691 + 11) = 943 \quad \text{Вт} .$$

Номинальний механічний момент при з'єднанні зірка

$$M_{2HY} = \frac{P_{2HY} \cdot p}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot (1 - s_{nY})} = \frac{943 \cdot 2}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot (1 - 0.077)} = 6.51 \text{ Нм}.$$

3.2. Розрахунок робочих характеристик при з'єднанні трикутник

Задаючись рядом значень ковзання s від 0 до 0.07, виконується розрахунок у наступному порядку:

Опір гілки ротору

$$z_{21}(s) = \frac{R_{21}}{s} + i \cdot X_{21}.$$

Еквівалентний опір заступної схеми

$$Z_{ек}(s) = Z_1 + \frac{z_{21}(s) \cdot Z_{\mu}}{z_{21}(s) + Z_{\mu}}.$$

Струм АД

$$I_1(s) = \frac{U_{\Delta}}{|Z_{ек}(s)|}.$$

Коефіцієнт потужності

$$\cos\phi(s) = \cos(\arg(Z_{ек}(s))).$$

Активна потужність споживання

$$P_1(s) = m_1 \cdot U_{\Delta} \cdot I_1(s) \cdot \frac{\cos\phi(s)}{P_{2H}}.$$

Струм робочої гілки АД

$$I_2(s) = U_{\Delta} \cdot \left| \frac{Z_{ек}(s) - Z_1}{Z_{ек}(s) \cdot z_{21}(s)} \right|.$$

Механічні втрати потужності

$$P_{мех}(s) = 0.35 \cdot \left[\frac{n_1 \cdot (1 - s)}{1000} \right]^2 \cdot \left(\frac{D_1}{100} \right)^4.$$

Корисна потужність

$$P_2(s) = \frac{m_1 \cdot R_{21} \cdot I_2(s)^2 \cdot \frac{1 - s}{s} - P_{мех}(s) - P_{доб}}{P_{2H}}.$$

ККД

$$\eta(s) = \frac{P_2(s)}{P_1(s)} \quad .$$

Момент на валу

$$M_2(s) = \frac{P_2(s) \cdot p \cdot P_{2H}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot (1 - s) \cdot M_{2n}} \quad .$$

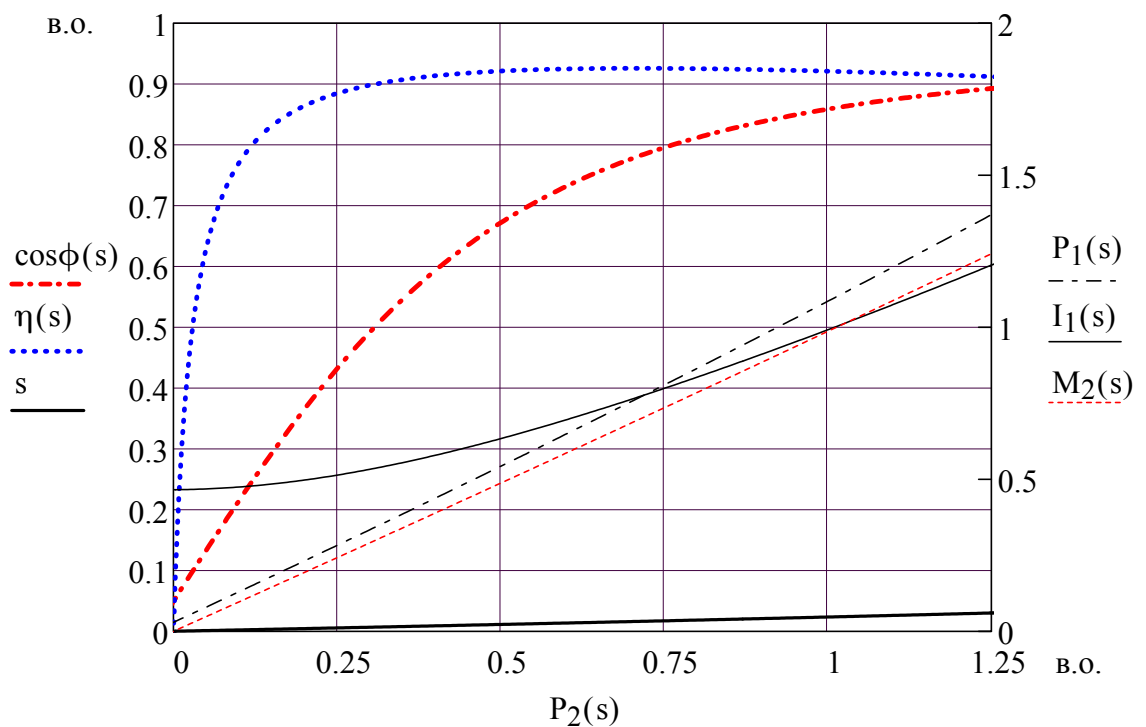


Рис.3.2. Робочі характеристики АД при з'єднанні трикутник.

3.3. Розрахунок робочих характеристик при з'єднанні зірка

Задаючись рядом значень ковзання s від 0 до 0.2, виконується розрахунок у наступному порядку:

Опір гілки ротору

$$z_{21}(s) = \frac{R_{21}}{s} + i \cdot X_{21}.$$

Еквівалентний опір заступної схеми

$$Z_{ек}(s) = Z_1 + \frac{z_{21}(s) \cdot Z_{\mu}}{z_{21}(s) + Z_{\mu}}.$$

Струм АД

$$I_1(s) = \frac{U_Y}{|Z_{ек}(s)|}.$$

Коефіцієнт потужності

$$\cos\phi(s) = \cos(\arg(Z_{ек}(s))).$$

Активна потужність споживання

$$P_1(s) = m_1 \cdot U_Y \cdot I_1(s) \cdot \frac{\cos\phi(s)}{P_{2HY}}.$$

Струм робочої гілки АД

$$I_2(s) = U_Y \cdot \left| \frac{Z_{ек}(s) - Z_1}{Z_{ек}(s) \cdot z_{21}(s)} \right|.$$

Механічні втрати потужності

$$P_{mex}(s) = 0.35 \cdot \left[\frac{n_1 \cdot (1-s)}{1000} \right]^2 \cdot \left(\frac{D_1}{100} \right)^4.$$

Корисна потужність

$$P_2(s) = \frac{m_1 \cdot R_{21} \cdot I_2(s)^2 \cdot \frac{1-s}{s} - P_{mex}(s) - P_{dob}}{P_{2HY}}.$$

ККД

$$\eta(s) = \frac{P_2(s)}{P_1(s)}.$$

Момент на валу

$$M_2(s) = \frac{P_2(s) \cdot p \cdot P_{2HY}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot (1-s) \cdot M_{2HY}}.$$

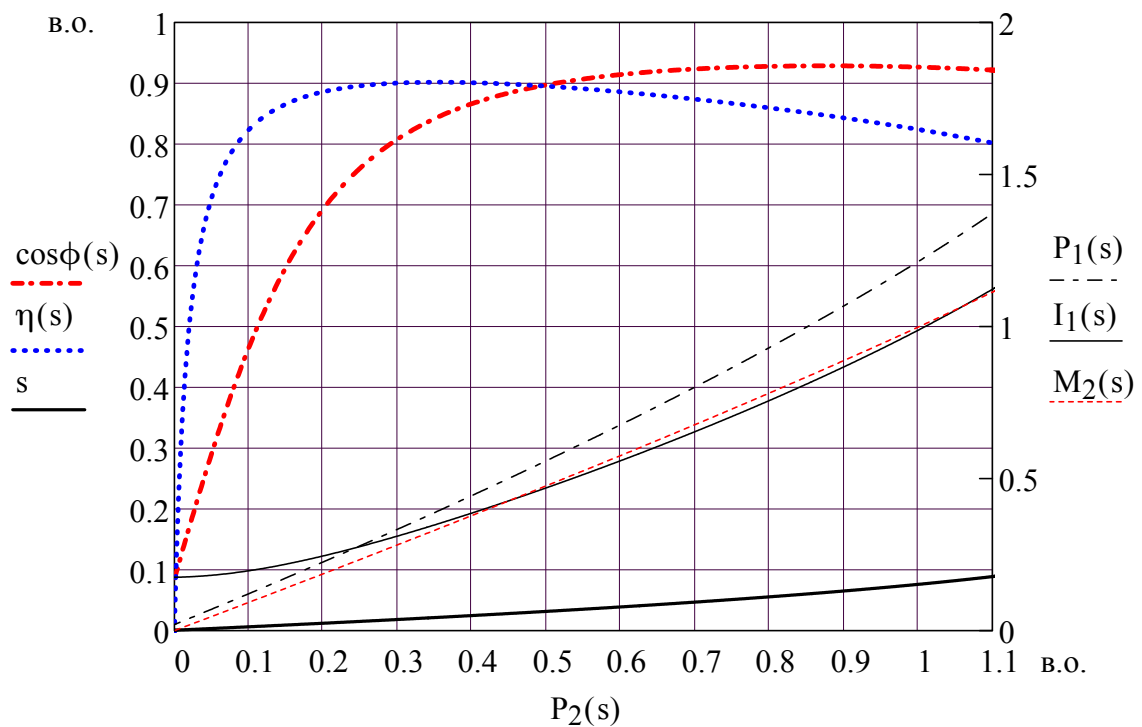


Рис.3.3. Робочі характеристики АД при з'єднанні зірка.

3.4. Розрахунок динамічних характеристик

Різноманітні зміни в режимі роботи електричної машини (ЕМ) (пуск, гальмування, к.з., зміна навантаження та ін.) неминуче викликають складні електромагнітні та електромеханічні процеси. Електромагнітні процеси протікають досить швидко (постійна часу для електромагнітних процесів приблизно на порядок менше, ніж для електромеханічних процесів), тому в першому наближенні ними можна зневажити. Крім цього для спрощення математичних моделей звичайно не враховуються наступні фактори: вихрові струми, насичення магнітного кола, зміна активних опорів через нагрівання, витиснення струмів і т.д. Найбільш важливими перехідними процесами для ЕМ є пуск, реверс і гальмування [9].

При визначенні математичної моделі двигуна використовуються рівняння узагальненої електричної машини в осях u і v , швидкість обертання координатних осей ω_k прийнята рівною швидкості обертання магнітного поля статора.

Параметри рівнянь зв'язку

$$\left. \begin{aligned} c_{dr} &= (x_{dm} + x_{dr}) / x_{dm}; \\ c_{ds} &= (x_{dm} + x_{ds}) / x_{dm}; \\ a_d &= x_{dm} (c_{ds} c_{dr} - 1), \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

де x_{ds} , x_{dr} , x_{dm} – індуктивні опори статора, ротора і гілки намагнічування відповідно.

Рівняння зв'язку для двигуна з урахуванням (3.1)

$$\left. \begin{aligned} i_{dsu} &= (c_{dr} \Psi_{dsu} - \Psi_{dru}) / a_d; \\ i_{dsv} &= (c_{dr} \Psi_{dsv} - \Psi_{drv}) / a_d; \\ i_{dru} &= (c_{ds} \Psi_{dru} - \Psi_{dsu}) / a_d; \\ i_{drv} &= (c_{ds} \Psi_{drv} - \Psi_{dsv}) / a_d, \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

де i_{dsu} , i_{dsv} , i_{dru} , i_{drv} , Ψ_{dsu} , Ψ_{dsv} , Ψ_{dru} , Ψ_{drv} , – струми і потокозчеплення обмоток статора і ротора по осях u і v відповідно.

Рівняння потокозчеплень двигуна

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Psi_{dsu}}{dt} &= U_{dsu} - r_{ds} \cdot i_{dsu} + \Psi_{dsv}; \\ \frac{d\Psi_{dsv}}{dt} &= U_{dsv} - r_{ds} \cdot i_{dsv} - \Psi_{dsu}; \\ \frac{d\Psi_{dru}}{dt} &= -r_{dr} \cdot i_{dru} + s \cdot \Psi_{drv}; \\ \frac{d\Psi_{drv}}{dt} &= -r_{dr} \cdot i_{drv} - s \cdot \Psi_{dru}, \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

де r_{ds} , r_{dr} – активні опори обмоток статора і ротора відповідно.

Математична модель двигуна також містить рівняння електромагнітного моменту і руху. Рівняння електромагнітного моменту

$$M = m_{d1} (\Psi_{dsu} i_{dsv} - \Psi_{dsv} i_{dsu}). \quad (3.4)$$

Рівняння руху

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = M - M_c, \quad (3.5)$$

де M_c – момент опору; J – момент інерції привода.

Основним досліджуваним динамічним режимом роботи є пуск при наявності навантаження на валові двигуна, котре приймається у вигляді вентиляторного навантаження, що відповідає судновим вентиляторам

$$M_c = M_n \cdot (\omega_r / \omega_s)^2, \quad (3.6)$$

де M_n – номінальний момент двигуна; ω_s – синхронна швидкість.

Рівняння (3.2) – (3.6), що становлять математичну модель двигуна, вирішуються найпростішим чисельним методом – методом Ейлера за допомогою ЕОМ. Результати (рис.3.4) розрахунків наведені нижче, котрі отримані за допомогою програми MathCad 15 (див. дод.).

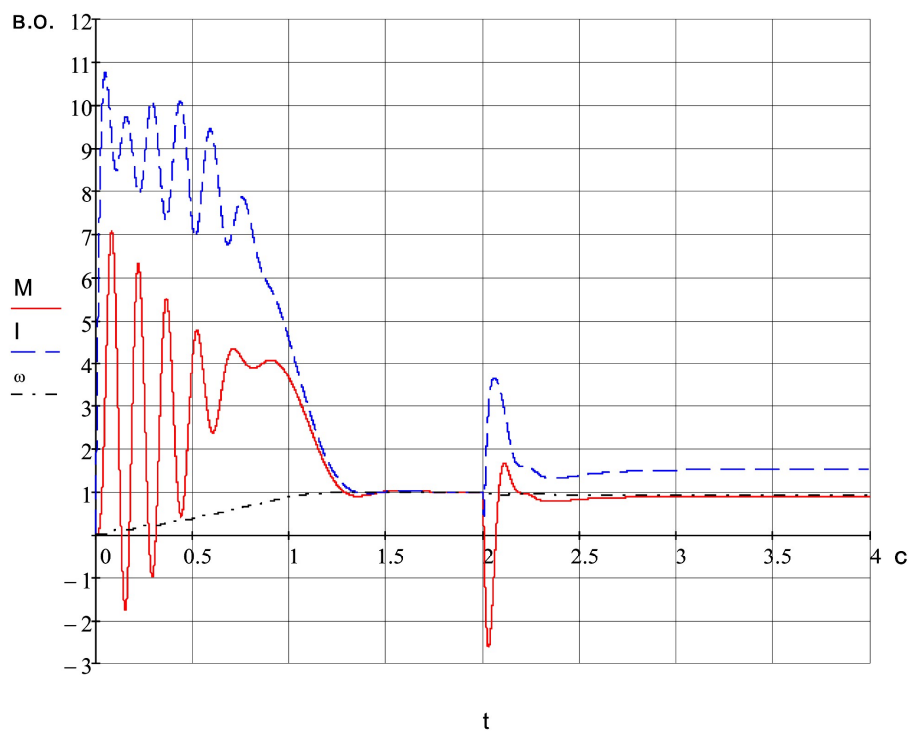


Рис.3.4. Часові перехідні процеси при включенні трикутник/зірка.

Як видно з графіків перехідних процесів при включенні у трикутник двигун досягає номінальної швидкості за 1 с при цьому виникає ударне значення струму статора, що відповідає 10,8 номінальних струмів.

Перехід з трикутника на зірку займає менше 0,5 с.

					141. 4301з. БР. ПЗ. Р4		
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	ОХОРОНА ПРАЦІ		
Розроб.	Єрмолаєва О.В.						
Керівник	Кімстач О.Ю.						
Консульт.							
Н. контр.							
В.о. зав. каф.	Обрубков А.В.				НУК		
					Лім.	Лист	Листів
						48	8

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

Вступ

Людина та її здоров'я – найбільша цінність Української держави. Держава докладає великих зусиль, створюючи умови безпечної життєдіяльності людини як в навколишньому середовищі, так і в середовищі праці.

Закон України «Про охорону праці» визначає: Охорона праці – це система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних та лікувально-профілактичних заходів і засобів, спрямованих на збереження здоров'я та працездатності людини в процесі праці.

Завдання охорони праці – забезпечення безпечних, нешкідливих і сприятливих умов праці через вирішення багатьох складних завдань. Вирішальне значення в розв'язанні цих завдань має науково-технічний прогрес. Використання досягнень науки та техніки сприяє підвищенню рівня безпеки праці, культури та організації виробництва, дозволяє полегшити працю, підсилити її привабливість.

Рівень безпеки людини з розвитком цивілізації постійно зростає. Розвиток науки і техніки, в цілому збільшуючи безпеку життєдіяльності людини, призвів до появи цілого ряду нових проблем.

Науковий аналіз виробничих травм доводить, що вони виникають, головним чином, внаслідок втрати міцності та надійності робочої техніки, небезпечного стану системи «людина-машина-середовище» та ряду технічних факторів. До технічних факторів відносять, насамперед, надійність техніки (конструктивні недоліки, технологічні та експлуатаційні порушення, руйнування деталей машин під дією корозії та корозійного розтріскування), організацію управління охороною праці (документація, правові норми, стандарти безпеки праці, методи навчання тощо), санітарно-гігієнічні умови в приміщеннях та на робочих місцях (шкідливі речовини в робочій зоні, виробниче освітлення, шум, вібрація, іонізуюче, електромагнітне, ультрафіолетове, лазерне випромінювання тощо).

4.1. Основні законодавчі акти

Законодавство про охорону праці ґрунтується на положеннях, які відповідають Конституції України. Статті Конституції України гарантують право громадян України на працю, відпочинок, охорону здоров'я, медичну допомогу та страхування, а також у випадку повної, часткової або тимчасової втрати працездатності, втрати годувальника, у старості та в інших випадках.

Законодавчі документи та положення з охорони праці затверджені і видані в різний час Верховною Радою України, Кабінетом Міністрів України, Державним Комітетом України з нагляду за охороною праці.

Законодавство про охорону праці складається із Закону України “Про охорону праці”. Кодексу законів про працю та інших нормативних актів.

Закон України “Про охорону праці” визначає основні положення *щодо* реалізації конституційного права громадян на охорону їх життя та здоров'я в процесі трудової діяльності, регулює за участю відповідних державних органів відносини між власником підприємства, установи і організації або уповноваженим органом і працівником з питань безпеки, гігієни праці та виробничого середовища і встановлює єдиний порядок організації охорони праці в Україні.

Державна політика в галузі охорони праці закріплена Законом і базується на принципах:

- пріоритету життя та здоров'я працівників відповідно до результатів виробничої діяльності підприємства, повної відповідальності власника за створення безпечних і нешкідливих умов праці;
- комплексного розв'язання завдань охорони праці на основі національних програм із цих питань та з урахуванням інших напрямків економічної і соціальної політики, досягнень в галузі науки і техніки та охорони навколишнього середовища;
- соціального захисту працівників, повного відшкодування збитків особам, які потерпіли від нещасних випадків на виробництві і професійних захворювань;

					141. 4301з. БР. ПЗ. Р4	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		50

- установлення єдиних нормативів з охорони праці для всіх підприємств, незалежно від форм власності та видів їх діяльності;
- використання економічних методів управління охороною праці, проведення політики пільгового оподаткування, що сприяє створенню безпечних та нешкідливих умов праці, участі держави у фінансуванні заходів щодо охорони праці;
- здійснення навчання населення, професійної підготовки і підвищення кваліфікації працівників з охорони праці;
- забезпечення координаційної діяльності державних органів, установ, організацій та громадських об'єднань, що вирішують різні проблеми охорони здоров'я, гігієни та безпеки праці, а також співробітництва та проведення консультацій між власниками та працівниками, між усіма соціальними групами при прийнятті рішень з охорони праці на місцевому та державному рівнях;
- міжнародного співробітництва в галузі охорони праці, використання світового досвіду організації роботи щодо поліпшення умов праці та її безпеки.

Усі норми, які відповідають законодавчим та нормативним актам про охорону праці, що діють в Україні, можна поділити на чотири групи.

До *першої групи* норм відносяться вимоги щодо охорони праці при проектуванні виробничих об'єктів та засобів виробництва.

Машини, механізми, устаткування, транспортні засоби та технологічні процеси, що впроваджуються у виробництво і в стандартах на які є вимоги щодо забезпечення безпеки праці, життя і здоров'я людей, повинні мати сертифікати, що засвідчують безпеку їх використання, видані у встановленому порядку.

Забезпечення безпеки праці під час роботи на підприємстві передбачає *друга група* норм: порядок опрацювання і затвердження положень, інструкцій та інших актів про охорону праці, що діють в межах підприємства; посадова особа здійснює контроль за дотриманням працівниками вимог щодо охорони праці; а працівник зобов'язаний знати і виконувати вимоги нор-

мативних актів про охорону праці.

До *третьої групи* можна віднести норми, які регламентують видачу працівникам спецодягу та інших засобів індивідуального захисту, змиваючих та знешкоджуючих засобів і забезпечення лікувально-профілактичним харчуванням. Не менш важливе значення мають вимоги щодо обов'язкового медичного огляду працівників певних категорій, навчання працівників при прийнятті на роботу і в процесі роботи з питань охорони праці, а також фінансування заходів, що забезпечують відповідність умов праці нормативним вимогам та підвищенням існуючого рівня охорони праці на виробництві.

У *четвертій групі* норм значної уваги надається органам державного нагляду і громадського контролю за дотриманням законодавчих та інших нормативних актів про охорону праці, а також відповідальність за порушення законодавчих актів про охорону праці.

4.2. Фактори, що впливають на умови праці

У процесі праці людина перебуває в контакті з предметом праці, знаряддями праці та іншими людьми. Крім цього, на людину діють різні фактори виробничого середовища, зокрема, температура, вологість та швидкість руху повітря, параметри котрих не відповідають нормативним значенням, надмірний шум, вібрація, електромагнітне та радіоактивне випромінювання тощо. Усе це характеризує умови, в яких працює людина.

Таким чином, поняття умов праці складається з комплексу факторів, які впливають на діяльність людини. Усунути негативний вплив, тобто забезпечити нешкідливі та сприятливі умови праці, можна, виключаючи на робочих місцях шкідливі виробничі фактори, послаблюючи їх дію до допустимих норм чи меж, чи забезпечуючи оптимальні умови праці. Вирішувати ці задачі повинна виробнича санітарія.

Виробнича санітарія – це система організаційних заходів і технічних засобів, які запобігають або зменшують дію шкідливих виробничих факторів на працюючих.

Умови праці — це умови, що формуються в процесі праці людини, яка

є головною продуктивною силою суспільства. Процес праці здійснюється лише при єднанні уречевлених продуктивних сил із робочою силою людини. Зміни у зречевлених елементах продуктивних сил спричиняють зміни в умовах праці. У процесі праці формуються специфічні для кожного виду виробництва умови праці. Це залежить від особливостей вироблюваної продукції, сукупності застосованого обладнання, інструментів, пристосовувань, сировини та матеріалів, методики технології та організації виробництва. Ці чинники перебувають у тісному взаємозв'язку, впливають на процес формування умов праці. Отже, вирішення складного завдання формування сприятливих умов праці залежить, перш за все, від створення безпечної техніки, технології та належної організації виробництва.

Умови праці визначаються двома основними показниками: характером виробничого процесу, пов'язаного з робочою позою, нервово-психічним станом, напругою м'язів робітника та ін., а також виробничими обставинами під час роботи, які впливають на його здоров'я, нервово-м'язову та психічну діяльність. Складовими виробничих обставин є:

- організаційні форми виробничих процесів;
- прийнятий регламент;
- темп і ритм роботи;
- режим праці та відпочинку;
- санітарно-гігієнічні умови у на робочому місці;
- умови, які забезпечують безперебійну високопродуктивну працю;
- форми керування виробничим процесом;
- соціальний мікроклімат у виробничому колективі.

Несприятливі умови праці примушують організм людини витратити енергію на переборювання впливу шкідливих факторів. Унаслідок цього зростає втома організму, що підвищує ймовірність нещасного випадку, оскільки зморений організм не може з необхідною ефективністю реагувати на зміни, що відбуваються навкруги, навіть якщо ці зміни, безпечні для нього. Дія несприятливих умов праці може бути також причиною захворювань робітників – професійних чи виробничих зумовлених.

Безпека – це стан умов праці, при якому з визначеною ймовірністю виключена небезпека, тобто можливість пошкодження здоров'я людини. Безпека – головна мета охорони праці.

Повніший аналіз умов та безпеки праці можна здійснити, враховуючи такі фактори: рухомі машини та механізми; незахищені рухомі елементи виробничого обладнання; вироби, заготовки, матеріали, що переміщуються; підвищення запиленості та загазованість повітря робочої зони; підвищення або зниження температури поверхні обладнання, матеріалів, повітря робочої зони; підвищений рівень шуму на робочому місці, інфразвукових та ультразвукових коливань, вібрації; підвищений або понижений барометричний тиск у робочій зоні та його різка зміна; підвищену або понижену відносну вологість, рухомість та іонізація повітря; небезпечний рівень напруги в електричному колі, замикання якого може пройти через тіло людини; підвищений рівень статичної електрифікації та електромагнітних коливань; підвищена напруженість електричного чи магнітного поля; відсутність або нестача природного світла; понижена контрастність; прямий або відбитий блиск; підвищена пульсація світлового потоку; підвищений рівень ультрафіолетової та інфрачервоної радіації; нервово-психічні навантаження.

Перелічені фактори відносяться до небезпечних та шкідливих. Вони проявляються раптово або поступово. Раптове виникнення небезпеки супроводжується травматичними наслідками – виробничими травмами. Поступовий вплив небезпечних факторів спричиняє професійні захворювання або хронічне отруєння.

Небезпека – це такий стан умов праці, коли людина з певним ступенем ймовірності підлягає дії небезпечних або шкідливих факторів.

Діяльність людини, супроводжувана потенційною небезпекою, може призводити до травм, захворювань, погіршення самопочуття та інших наслідків.

4.3. Електрозахисні засоби

Електрозахисні засоби – це вироби, що переносяться і перевозяться.

					141. 4301з. БР. ПЗ. Р4	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		54

Вони слугують для захисту людей, які працюють з електроустаткуванням, від ураження електричним струмом, від дії електричної дуги і електромагнітного поля; використовуються для забезпечення безпеки людей як при звичайному, так і при аварійному стані електроустаткування. За призначенням електрозахисні засоби (ЕЗЗ) поділяють на ізолюючі, огорожувальні та допоміжні, а за характером застосування – на колективного та індивідуального захисту.

Ізолюючі ЕЗЗ слугують для ізоляції людей від електрообладнання, що перебуває під напругою, а також від землі і поділяються на основні і додаткові. Ізоляція основними ЕЗЗ надійно витримує робочу напругу електроустаткування, тому за їх допомогою можна торкатися струмопровідних частин, які знаходяться під напругою (до 1000 В) – оперативні штанги, ізолюючі і електровимірювальні кліщі, діелектричні рукавички, інструмент з ізольованими ручками, покажчики напруги. Додаткові ізолюючі ЕЗЗ самі не можуть забезпечити безпеку персоналу від ураження електричним струмом і застосовуються як доповнення до основних. В електрообладнанні напругою до 1000 В такими є діелектричне взуття, гумові діелектричні килимки, ізолюючі підставки.

Огорожувальні ЕЗЗ застосовують для тимчасового огороження струмоведучих частин електрообладнання, яке знаходиться під напругою. Це переносні огороження (ширми, бар'єри, щити, клітки), ізолюючі накладки і ковпаки, переносні заземлення, переносні попереджувальні плакати.

Допоміжні ЕЗЗ призначені для захисту персоналу від падіння з висоти (охоронні пояси і страхувальні канати), для безпечного підйому на висоту (драбини, кігті) і для захисту від теплових, світлових, хімічних, механічних та інших дій (спецодяг, рукавиці, протигази, захисні окуляри та ін.).

Особи, які допускаються до обслуговування електроустаткування, проходять медичне обстеження.

ВИСНОВКИ

1. Розроблений спеціальний асинхронний двигун відповідає технічному завданню і спроможний виконувати свої функціональні задачі.

2. Основні параметри та характеристики ТАД показали можливість його ефективного використання. Так ковзання $0,0238 / 0,077$ (Δ/Y), достатньо високій ККД $92,1 \% / 82,2 \%$ (Δ/Y) та коефіцієнт потужності $0,86 / 0,926$ (Δ/Y), при цьому перевантажувальна здатність $4,4 / 1,5$ (Δ/Y).

3. Аналіз перехідних процесів показав, що ТАД запускається за 1 секунду при з'єднанні у трикутник, такий час пуску характерний для більшості загальнопромислових АД.

					141. 4301з. БР. ПЗ.	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		56

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Kimstach O. Optimal starting of the induction motor // ELEKTROTEHNIŠKI VESTNIK. 2022. 89(5), pp. 263-268.
2. Kimstach O., Zhezhelo A., Klymenko Yu. Differences of 2-axes and 3-axes model of induction motor // Прикладні науково-технічні дослідження: матеріали V міжнар. наук.-прак. конф., 5-7 квіт. 2021 р. – Академія технічних наук України. – Івано-Франківськ. – 2021. – С. 167-169.
3. Кимстач О.Ю. Идентификация параметров уточненной математической модели асинхронного двигателя // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. – Том 30 (69) Ч. 1 № 3 2019. – С. 34-39.
4. Кимстач О.Ю., Яростюк Л.Н. Витой трапециевидный магнитопровод для электрических машин и аппаратов торцевого исполнения // Збірник наукових праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2005. – №2 (401). – С. 101–106.
5. Кімстач О.Ю. Індивідуальний комплект навчально-методичних матеріалів з дисципліни «Електричні машини» (розрахунок асинхронних двигунів малої і середньої потужності загального призначення з короткозамкненим ротором): Методичні вказівки. – Миколаїв: ІЗДО НУК, 2011. – 68 с.
6. Кімстач О.Ю. Проектування асинхронних двигунів малої і середньої потужності загального призначення з короткозамкненим ротором: навчальний посібник. – Миколаїв; НУК, 2015. – 188 с.
7. Ткачук В. Електромеханотроніка: Навчальний посібник. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка». 2001. – 404 с.
8. Яцун М.А. Електричні машини. Навч. посібник. – Львів, Видавн. Державного університету «Львівська політехніка», 1999, – 427 с.

					141. 4301з. БР. ПЗ. Д		
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.	Єрмолаєва О.В.						
Керівник	Кімстач О.Ю.						
Н. контр.							
В.о. зав. каф.	Обрубков А.В.						
ДОДАТОК					Лім.	Лист	Листів
						58	3
					НУК		

Додаток

Розрахунок динамічних характеристик спеціального АД

$$jd := 0.1$$

$$snom := 0.0238$$

$$m1 := 3$$

$$f := 50$$

$$mn := 7.37$$

$$i := \sqrt{-1}$$

$$u1 := 380$$

$$p := 2$$

$$I1n := 1.23$$

$$r1 := 10.3$$

$$r22 := 8.17$$

$$rm := 10.4$$

$$x1 := 9.95$$

$$x22 := 19.2$$

$$xm := 653$$

$$wc := 2 \cdot \pi \cdot \frac{f}{p}$$

$$wb := wc$$

$$mb := \frac{u1 \cdot I1n}{wb}$$

$$zb := \frac{u1}{I1n}$$

$$jb := \frac{2mb}{wb^2}$$

$$j := \frac{jd}{jb}$$

$$rs := \frac{r1}{zb}$$

$$rr := \frac{r22}{zb}$$

$$cr := \frac{x22}{xm} + 1$$

$$cs := \frac{x1}{xm} + 1$$

$$a := \frac{xm}{zb} \cdot (cr \cdot cs - 1)$$

$$Tmax := 200$$

$$h = 0.01$$

$$s0 = 1$$

$$t0 = 0$$

$$in := \frac{Tmax}{h} = 2 \times 10^4$$

$$usv := 0$$

$$M0 = 0$$

$$i = 0 .. in$$

$$\psi ru0 = 0$$

$$Mc0 := 0$$

$$\psi su0 = 0$$

$$\psi sv0 = 0$$

$$\psi rv0 = 0$$

$$ti+1 = ti + h$$

$$usu_i = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{3}} & \text{if } i > \frac{in}{2} \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\begin{pmatrix} \text{isu}_i \\ \text{isv}_i \\ \text{iru}_i \\ \text{irv}_i \\ \psi_{\text{su}_{i+1}} \\ \psi_{\text{sv}_{i+1}} \\ \psi_{\text{ru}_{i+1}} \\ \psi_{\text{rv}_{i+1}} \\ M_{i+1} \\ M_{c_i} \\ s_{i+1} \end{pmatrix} := \begin{bmatrix} \frac{\text{cr} \cdot \psi_{\text{su}_i} - \psi_{\text{ru}_i}}{a} \\ \frac{\text{cr} \cdot \psi_{\text{sv}_i} - \psi_{\text{rv}_i}}{a} \\ \frac{\text{cs} \cdot \psi_{\text{ru}_i} - \psi_{\text{su}_i}}{a} \\ \frac{\text{cs} \cdot \psi_{\text{rv}_i} - \psi_{\text{sv}_i}}{a} \\ \psi_{\text{su}_i} + h \cdot (\text{usu}_i - \text{rs} \cdot \text{isu}_i + \psi_{\text{sv}_i}) \\ \psi_{\text{sv}_i} + h \cdot (\text{usv}_i - \text{rs} \cdot \text{isv}_i - \psi_{\text{su}_i}) \\ \psi_{\text{ru}_i} + h \cdot (-\text{rr} \cdot \text{iru}_i + s_i \cdot \psi_{\text{rv}_i}) \\ \psi_{\text{rv}_i} + h \cdot (-\text{rr} \cdot \text{irv}_i - s_i \cdot \psi_{\text{ru}_i}) \\ m1 \cdot (\psi_{\text{su}_i} \cdot \text{isv}_i - \psi_{\text{sv}_i} \cdot \text{isu}_i) \\ \frac{mn}{mb} \cdot \left(\frac{1 - s_i}{1 - \text{snom}} \right)^2 \\ s_i - \frac{M_i - M_{c_i}}{j} \cdot h \end{bmatrix}$$

$$I_d = \sqrt{(\text{isu})^2 + (\text{isv})^2}$$

$$t := \frac{t}{f}$$

$$M := M \cdot \frac{mb}{mn}$$

$$\omega := 1 - s$$

