

Міністерство освіти і науки України
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Навчально-науковий інститут комп'ютерної інженерії, автоматизації,
робототехніки та програмування ім. П.М. Платонова

**Кафедра автоматизації технологічних, електромеханічних і
робототехнічних систем**



**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

**на тему «УДОСКОНАЛЕННЯ ОХОЛОДЖЕННЯ ТЯГОВИХ
ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ З МОНІТОРИНГОМ ТЕМПЕРАТУР ОБМОТОК»**

Здобувач СВО «Бакалавр»: Мачульський Олександр Валентинович
Студент групи АЕМт-20

Керівник: Москалюк Андрій Юрійович,
к.т.н., доцент

Кваліфікаційна робота допускається до захисту

Рішення кафедри від 16.06.2026 р., протокол № 8.

в.о. Завідувача кафедри АТЕіРС

(назва кафедри)

(підпис)

Олексій Жигайло

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Одеса – 2026 рік

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інститут: *Комп'ютерної інженерії, автоматизації, робототехніки та програмування ім. П.М.Платонова*

Кафедра: *електротехніки та мехатроніки*

Рівень ВО: *перший*

Ступень ВО: *бакалавр*

Галузь знань: *14 – Електрична інженерія*

Спеціальність: *141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка*

Освітня програма: *Екоенергетика та інтелектуальна електромеханіка*

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедри ЕтаМ

_____Осадчук П.І.
«_____» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

здобувача СВО «Бакалавр» АЕМт – 20 Мачульського Олександра Валентиновича

1. Тема роботи: **«Удосконалення охолодження тягових електродвигунів з моніторингом температур обмоток»**

Керівник роботи: Москалюк Андрій Юрійович, к.т.н., доцент.

Затверджено наказом ОНТУ № 641-03 від 21.12.2025 р.

2. Срок подання студентом роботи: 15.06.2026 р.

3. Вхідні дані до проекту: Для розрахунків прийнято тяговий асинхронний електродвигун номінальною потужністю $P_n=75$ кВт, номінальною напругою живлення $U_n=380$ В, коефіцієнтом корисної дії $\eta=0,90$, коефіцієнтом потужності $\cos\varphi=0,86$ та номінальною частотою обертання $n=1500$ об/хв. Кількість фаз двигуна $m=3$, опір фази обмотки статора при початковій температурі прийнято $R_0=0,08$ Ом. Початкова температура обмоток становить $T_0=25^\circ\text{C}$, температура навколишнього середовища $T_c=25^\circ\text{C}$, допустима температура ізоляції прийнята $T_{\text{доп}}=140^\circ\text{C}$. На основі прийнятих даних визначаються електромагнітний момент тягового електродвигуна, струм обмоток, потужність, втрати в обмотках, температурний стан двигуна та параметри удосконаленої системи охолодження.

4. Зміст розрахунково-конструкторської частини пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): аналіз особливостей роботи тягових електродвигунів; розрахунок основних параметрів тягового асинхронного електродвигуна; моделювання тягового електроприводу; дослідження режимів струмів з моніторингом температури обмоток; техніко-економічне обґрунтування, охорона праці

5. Перелік демонстраційного матеріалу. Слайди презентації:

1. Титульний слайд, Актуальність теми. Об'єкт і предмет дослідження, Мета та завдання роботи, 2. Галузі застосування потужних електродвигунів та актуальність контролю температури, 3. Конструкція тягового електродвигуна та особливості його роботи, 4. Причини нагрівання та перегріву обмоток електродвигуна, 5. Аналіз існуючих систем охолодження та моніторингу температури, 6. Електричні та теплові процеси в обмотках тягового електродвигуна, 7. Розрахунок основних параметрів тягового електродвигуна, 8. Розрахунок струму, потужності та втрат в обмотках 9. Оцінка температурного стану обмоток до та після удосконалення охолодження, 10. Модель тягового електродвигуна у середовищі MATLAB Simulink, 11. Результати моделювання режимів роботи електродвигуна, 12. Моделювання теплового навантаження та роботи системи моніторингу температури, 13. Економічна частина, 14. Охорона праці, 15. Висновки

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Москалюк А.Ю., доц.		
Економічна частина	Москалюк А.Ю., доц.		

7. Дата видачі завдання: 15.02.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ
ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Строк виконання етапів	Прим
1	1. Загальна характеристика роботи: вибір об'єкта проектування, опис і аналіз роботи тягового електроприводу та його термічних характеристик. Актуальність теми. Об'єкт і мета роботи.	05.03.2026	
2	2. Аналіз роботи тягового електроприводу. Розгляд основних елементів конструкції тягового приводу. Аналіз електричних та теплових процесів в обмотках електродвигунів із зосередженням уваги на температурному стані обмоток.	10.04.2026	
3	3. Розрахунково-конструкторська частина тягового електроприводу. Розрахунок механічної характеристики тягового електродвигуна, розрахунок потужності електроприводу та перевірка двигуна за тепловим перевантаженням.	10.05.2026	
4	4. Дослідження динамічних режимів роботи тягового електроприводу на ЕОМ: розрахунок параметрів тягового електродвигуна у MATLAB, розробка імітаційної моделі електроприводу та аналіз режимів обмеження по температурному показникам обмоток.	25.05.2026	
5	5. Економічна частина: розрахунок економічної ефективності від впровадження системи термічного моніторингу температур обмоток тягового електродвигуна.	13.06.2026	
6	6. Частина з охорони праці: розгляд питань організації охорони праці під час експлуатації тягового електродвигунів, електро- та пожежної безпеки, розрахунок занулення.	15.06.2026	
7	Перевірка роботи на доброчинність. Рецензування роботи	19.06.2026	
8	Захист кваліфікаційної роботи бакалавра.	23.06.2026	

Здобувач: Мачульський О.В. _____

Керівник: Москалюк А.Ю. _____

Несу відповідальність за ідентичність електронного та друкованого варіантів кваліфікаційної роботи, даю згоду на обробку персональних даних та не заперечую проти розміщення кваліфікаційної роботи на офіційних web-ресурсах ОНТУ. Підтверджую, що в кваліфікаційній роботі відсутні порушення норм академічної доброчесності.

Здобувач-дипломник _____ Мачульський О.В.

АНОТАЦІЯ

Мачульський О.В. «УДОСКОНАЛЕННЯ ОХОЛОДЖЕННЯ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ З МОНІТОРИНГОМ ТЕМПЕРАТУР ОБМОТОК». Кваліфікаційна робота бакалавра. – Одеса: ОНТУ, 2026. – 89 с. Бібліогр.: 16 найм. Слайдів презентаційної частини – 15.

Ключові слова:

У кваліфікаційній роботі розглянуто питання зниження перегріву обмоток тягового електродвигуна шляхом удосконалення системи охолодження та впровадження моніторингу температурного стану. Проведено аналіз причин нагрівання обмоток, розглянуто електричні та теплові процеси в двигуні, а також вплив температури на стан ізоляції та надійність роботи електродвигуна.

Ключові слова: тяговий електродвигун, температура обмотки, електромагнітний момент, тепловий режим, моніторинг температури, система контролю температури.

REFEREE

Machulskyi O.V. “IMPROVEMENT OF COOLING OF TRACTION ELECTRIC MOTORS WITH MONITORING OF WINDING TEMPERATURES.” BACHELOR’S QUALIFICATION WORK. – ODESA: ONTU, 2026. – 89 P. BIBLIOGRAPHY: 16 TITLES. PRESENTATION SLIDES – 11.

The qualification work addresses the problem of reducing overheating of traction motor windings by improving the cooling system and introducing thermal condition monitoring. The causes of winding heating are analyzed; electrical and thermal processes in the motor, as well as the influence of temperature on insulation condition and motor reliability, are considered.

Keywords: traction electric motor, winding temperature, electromagnetic torque, thermal mode, temperature monitoring, temperature control system.

ЗМІСТ

	стр.
ВСТУП	8
1 АНАЛІЗ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ТА СИСТЕМ ЇХ ОХОЛОДЖЕННЯ	9
1.1 Особливості конструкції та режимів роботи тягових електродвигунів	9
1.2 Причини нагрівання та перегріву обмоток	12
1.3 Аналіз існуючих систем охолодження і контролю температури	17
1.4 Висновки до розділу 1	23
2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ У ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНАХ	25
2.1 Електричні та теплові процеси в обмотках тягового електродвигуна	25
2.2 Вплив температури обмоток на стан ізоляції та надійність електродвигуна	31
2.3 Методи оцінювання температурного стану обмоток	36
2.4 Висновки до розділу 2	39
3 УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА	41
3.1 Розрахунок необхідного електромагнітного моменту тягового електродвигуна	41
3.2 Визначення струму, потужності та електричних втрат у обмотках двигуна	49
3.3 Розрахунок температурного стану обмоток у наявному режимі роботи	52
3.4 Визначення необхідної інтенсивності охолодження	53
3.5 Оцінка температурного стану обмоток після удосконалення охолодження	54
Висновки до розділу 3	55

					КРБ.АТЕіРС.141.641-03.3.3						
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розробив		Мачульський О.В			УДОСКОНАЛЕННЯ ОХОЛОДЖЕННЯ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ З МОНІТОРИНГОМ ТЕМПЕРАТУР ОБМОТОК			Літ	Аркуш	Аркушів	
Керівни		Москалюк А.Ю								5	84
								ОНТУ, АЕМ _т - 20			
Консульт.											
Зав.кафедри		Жигайло О.М.									

4 РОЗРОБКА СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТЕМПЕРАТУР

ОБМОТОК

4.1 Вимоги до системи електротеплового контролю обмоток	57
4.2 Вибір засобів і приладів вимірювання та місць їх монтажу	59
4.3 Розробка структурної схеми системи контролю	62
4.4 Оцінка ефективності моніторингу стану обмоток двигуна	64
4.5 Висновки до розділу 4	66

5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

5.1 Техніко-економічне провадження системи частотного керування	67
5.2 Визначення капітальних витрат на впровадження системи	68
5.3 Розрахунок експлуатаційних витрат для базового і нового варіантів	72
5.4 Розрахунок економічної ефективності та строку окупності	73
5.5. Висновки до розділу 5	74

6. ОХОРОНА ПРАЦІ

6.1 Організація та управління охороною праці	75
6.2 Аналіз умов праці на робочих місцях, електро- та пожежної безпеки	76
6.3 Розрахунок захисного занулення	78
6.4 Заходи з охорони праці	79
6.5. Висновки до розділу 6	80

ВИСНОВКИ	81
----------	----

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	82
----------------------------	----

ВСТУП

Каналізаційні станції є важливими елементами систем водовідведення, а надійність їх роботи безпосередньо впливає на безперервність відведення стічних вод, санітарний стан територій та екологічну безпеку. Одним із основних вузлів таких станцій є електроприводи фекальних насосів, від працездатності яких залежить ефективність роботи всієї насосної установки.

Електроприводи фекальних насосів працюють у складних умовах, що характеризуються змінним навантаженням, підвищеною вологістю та необхідністю частих пусків і зупинок. Найбільш напруженим режимом роботи є пуск асинхронного двигуна, під час якого виникають значні пускові струми та механічні перевантаження. Це призводить до нагрівання обмоток, прискореного зносу елементів привода та зниження надійності насосного агрегату.

У зв'язку з цим актуальним є удосконалення плавності пуску електроприводів фекальних насосів каналізаційних станцій. Застосування технічних рішень, спрямованих на обмеження пускових струмів і зменшення динамічних навантажень, дозволяє покращити умови роботи обладнання, підвищити його ресурс та знизити імовірність аварійних відмов.

Метою дипломної роботи є підвищення надійності та плавності пуску електроприводів фекальних насосів каналізаційних станцій шляхом аналізу пускових режимів, розрахунку параметрів електропривода та моделювання його роботи.

Для досягнення поставленої мети в роботі розглянуто особливості роботи насосних установок, виконано розрахунок параметрів електропривода, досліджено пускові режими асинхронного двигуна, проведено моделювання перехідних процесів, розглянуто питання охорони праці та виконано економічне обґрунтування запропонованого рішення.

Об'єктом дослідження є електропривод фекального насоса каналізаційної станції. Предметом дослідження є пускові режими асинхронного електропривода та способи підвищення надійності його роботи.

					КРБ. АТЕРС.141.641-03.6.4	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 АНАЛІЗ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ТА СИСТЕМ ЇХ ОХОЛОДЖЕННЯ

1.1 Особливості конструкції та режимів роботи тягових електродвигунів

Тягові електродвигуни є основними елементами електропривода сучасних транспортних засобів з електричною або комбінованою силовою установкою. Їх призначення полягає у перетворенні електричної енергії на механічну з формуванням тягового моменту на ведучих колесах. На відміну від електродвигунів загальнопромислового призначення, тягові машини працюють у значно ширшому діапазоні навантажень і швидкостей, а також повинні забезпечувати високий пусковий момент, стійкість до короточасних перевантажень, можливість рекуперативного гальмування, високий коефіцієнт корисної дії та надійність у складних умовах експлуатації. Саме ці вимоги визначають як вибір типу електродвигуна, так і особливості його конструкції, системи охолодження та контролю температурного стану.

У тягових приводах транспортних засобів застосовують кілька основних типів електричних машин. Історично значне поширення мали двигуни постійного струму, які забезпечують добрі пускові характеристики та просте регулювання швидкості. Проте на сучасному етапі їх використання обмежується наявністю колекторно-щіткового вузла, підвищеними втратами, складністю технічного обслуговування та несприятливими умовами тепловідведення. Значно ширше у сучасних тягових системах застосовуються асинхронні двигуни, синхронні двигуни з постійними магнітами, безщіткові двигуни постійного струму, а також вентильно-індукторні й синхронні реактивні машини. Асинхронні двигуни відзначаються простою конструкцією, надійністю та відсутністю щіткового контакту. Синхронні двигуни з постійними магнітами характеризуються високою питомою потужністю, високим ККД і добрими регульовальними властивостями, однак є більш чутливими до теплових перевантажень. Безщіткові двигуни постійного струму мають високий пусковий момент і добрі масогабаритні показники, але

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

їх застосування обмежується відносно вузькою зоною сталої потужності. Таким чином, вибір типу тягового двигуна завжди пов'язаний із компромісом між ефективністю, перевантажувальною здатністю, вартістю, складністю керування та тепловим режимом.

Незалежно від принципу дії, тяговий електродвигун має низку спільних конструктивних вузлів, від технічного стану яких залежить його працездатність. До них належать магнітопровід статора, обмотки статора або якоря, ротор, вал, підшипникові опори, корпус, вентиляційні канали, елементи електричного підключення та вузли кріплення. У колекторних машинах додатково наявні колектор і щітковий апарат, а в синхронних двигунах з постійними магнітами ротор містить магнітну систему, чутливу до температурного впливу. Для асинхронних машин характерна наявність короткозамкненого або фазного ротора, а головним джерелом електромагнітного перетворення енергії є трифазна обмотка статора. В усіх випадках особливо відповідальним елементом є обмотка, оскільки саме в ній виникає значна частина електричних втрат, які визначають нагрівання машини та впливають на ресурс ізоляції. Крім того, геометрія пазів, спосіб укладання провідників, довжина лобових частин і якість просочення ізоляції безпосередньо впливають як на електричні параметри, так і на умови тепловідведення.

Конструкція тягового електродвигуна повинна забезпечувати роботу в характерних для транспорту режимах. До таких режимів належать пуск, розгін, рух із постійною швидкістю, короточасні та повторні перевантаження, робота в області сталої потужності, а також електричне або рекуперативне гальмування. Для тягових машин типовою є область сталого моменту на низьких швидкостях, коли двигун повинен забезпечувати максимальну тягу, необхідну для початку руху та інтенсивного розгону. Після досягнення базової швидкості двигун переходить у режим сталої потужності, при якому зі зростанням швидкості крутний момент зменшується. Саме така форма

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.2	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

механічної характеристики є найбільш придатною для транспортних застосувань, оскільки поєднує високі пускові властивості з можливістю роботи в широкому діапазоні частот обертання.

Особливістю роботи тягових електродвигунів є також часті пускові режими та перевантаження. У момент пуску струм в обмотках значно перевищує номінальне значення, що супроводжується різким зростанням електричних втрат. Аналогічна ситуація спостерігається під час інтенсивного розгону, руху на підйомах, буксирування або транспортування вантажів. У режимах рекуперативного гальмування двигун переходить у генераторний режим, але електромагнітні та теплові процеси при цьому не припиняються. Навпаки, залежно від алгоритму керування, струмових навантажень і стану силового перетворювача можуть виникати додаткові теплові навантаження на окремі ділянки обмоток. Тому оцінювання роботи тягового двигуна повинно враховувати не лише тяговий режим, а й гальмівні режими, в яких також формується температурний стан машини.

З електротехнічної точки зору основними джерелами тепловиділення в тяговому електродвигуні є втрати в обмотках, втрати в сталі магнітопроводу, механічні втрати та додаткові втрати, пов'язані з гармонійними складовими струму і поля. Для більшості тягових машин визначальними в контексті надійності є саме втрати в обмотках, оскільки вони безпосередньо пов'язані зі струмовим навантаженням і мають квадратичну залежність від струму. Унаслідок цього будь-яке зростання навантаження, особливо в пускових або перевантажувальних режимах, призводить до інтенсивного нагрівання провідників і ізоляції. Додатково ситуація ускладнюється тим, що зі зростанням температури збільшується активний опір обмоток, а це ще більше підвищує електричні втрати. Таким чином, у тяговому електродвигуні виникає взаємозалежність між електричним навантаженням і тепловим станом, яка має виражений самопідсилювальний характер.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

Суттєвою проблемою є нерівномірність температурного поля в активних частинах машини. Навіть якщо середня температура електродвигуна залишається в допустимих межах, в окремих зонах можуть виникати локальні перегріву. Найбільш тепловонавантаженими зазвичай є лобові частини обмоток, пазові провідники та ділянки з ускладненим доступом охолоджувального середовища. Для окремих типів машин характерні також специфічні теплові особливості. Так, у колекторних двигунах суттєва частина тепловиділення припадає на ротор, що ускладнює відведення теплоти. У синхронних машинах з постійними магнітами перегрів може викликати погіршення магнітних властивостей і навіть ризик часткового розмагнічування. У безщіткових машинах, навпаки, розміщення основних джерел тепла в статорі спрощує охолодження, але не усуває необхідності точного температурного контролю.

Отже, тяговий електродвигун слід розглядати не лише як електромеханічний перетворювач енергії, а і як електротепловий об'єкт, у якому конструкція, режими роботи, електричні втрати та умови охолодження тісно взаємопов'язані. Часті пуски, перевантаження, рекуперативне гальмування та робота в широкому діапазоні швидкостей створюють передумови для інтенсивного нагрівання обмоток, що безпосередньо впливає на стан ізоляції, ресурс електродвигуна та надійність тягового електропривода в цілому. Саме тому питання удосконалення охолодження та моніторингу температур обмоток є технічно обґрунтованими і становлять важливий напрям підвищення ефективності та довговічності тягових електродвигунів.

1.2 Причини нагрівання та перегріву обмоток

Нагрівання обмоток тягового електродвигуна є закономірним наслідком перетворення електричної енергії в механічну. У процесі роботи частина підведеної енергії неминуче переходить у теплоту, яка виділяється в активних і конструктивних елементах машини. Однак саме обмотки є найбільш чутливими до теплового впливу, оскільки в них зосереджуються значні

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

електричні втрати, а стан їх ізоляції безпосередньо визначає надійність і довговічність електродвигуна. Для тягових машин ця проблема є особливо актуальною через широкий діапазон режимів роботи, значні струмові навантаження, часті пуски, перевантаження та рекуперативне гальмування. У наданому вами зразку розділу 1 також підкреслюється, що до тягових двигунів ставляться вимоги високої перевантажувальної здатності, роботи в широкому діапазоні швидкостей та здатності до рекуперативного гальмування, а це безпосередньо пов'язано з підвищеним тепловим навантаженням на обмотки.

Основною причиною нагрівання обмоток є електричні втрати в провідниках, які визначаються струмом навантаження та активним опором обмотки. Під час проходження струму через провідник частина електричної енергії перетворюється на теплоту за законом Джоуля–Ленца. Оскільки величина цих втрат зростає пропорційно квадрату струму, навіть відносно невелике перевищення струмового навантаження призводить до істотного зростання тепловиділення. Для тягових електродвигунів це особливо характерно в пускових і перевантажувальних режимах, коли струм може суттєво перевищувати номінальне значення. За таких умов температура обмоток зростає значно швидше, ніж у сталому режимі, що створює передумови для локального або загального перегріву.

Суттєвим чинником нагрівання є повторно-короткочасний характер роботи тягового електропривода. У процесі експлуатації транспортного засобу електродвигун багаторазово переходить між режимами пуску, розгону, руху з різною швидкістю, гальмування та повторного навантаження. При цьому теплота, що виділилася в попередньому циклі, не завжди встигає повністю відводитися в навколишнє середовище. Унаслідок цього в обмотках відбувається поступове накопичення тепла, а їх температура може досягати небезпечних значень навіть тоді, коли окремі режими не перевищують допустимих меж. Саме така особливість тягових машин відрізняє їх від електродвигунів, що працюють у тривалому стаціонарному режимі. Для

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

наочного подання причин нагрівання обмоток на рисунку 1.1 наведено схему основних теплових втрат у тяговому електродвигуні та напрямків відведення теплоти від внутрішніх елементів машини в навколишнє середовище.

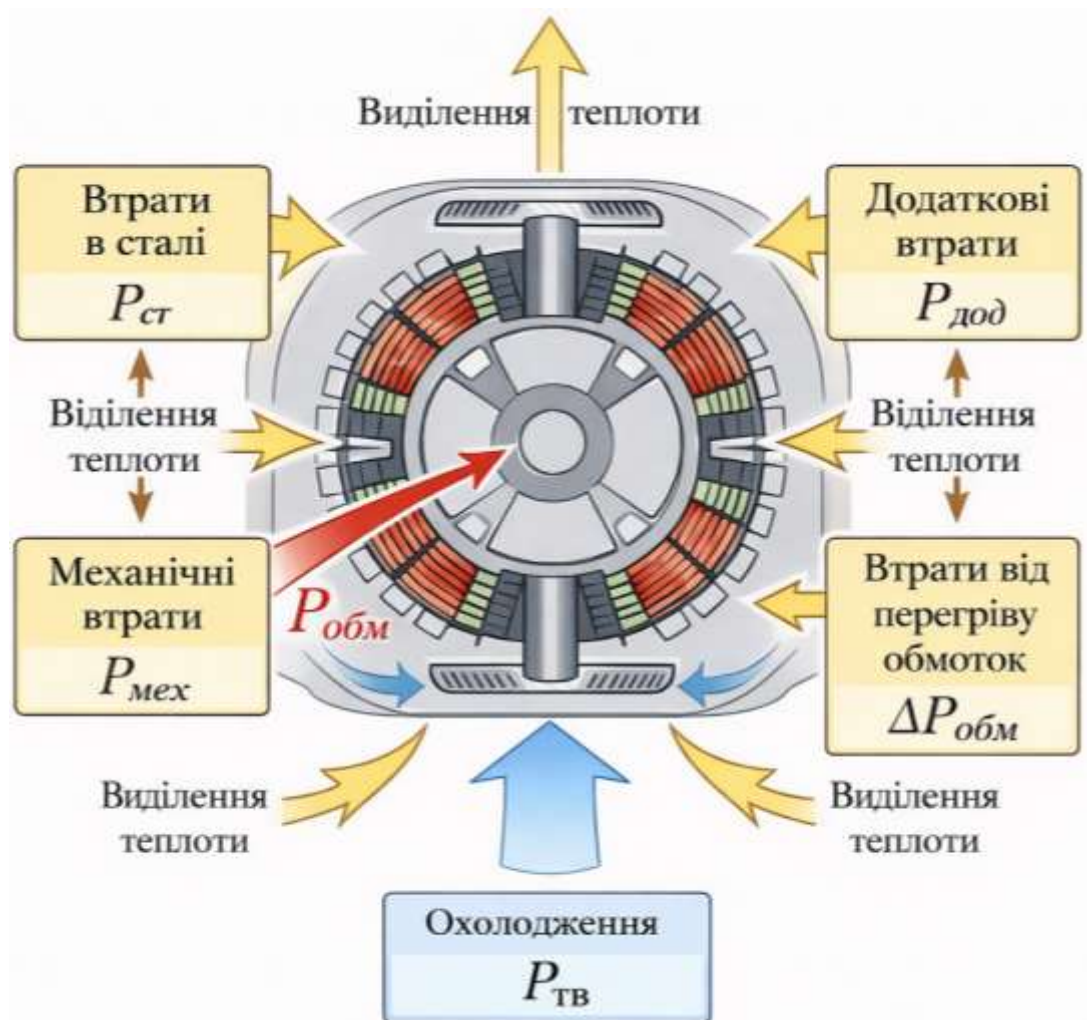


Рис. 1.1 Схема утворення теплових втрат та відведення теплоти у тяговому електродвигуні

Як показано на рисунку 1.3, тепловий стан тягового електродвигуна формується під дією втрат в обмотках, втрат у сталі магнітопроводу, механічних і додаткових втрат. Найбільший вплив на температурний режим машини мають втрати в обмотках, оскільки вони безпосередньо пов'язані зі струмовим навантаженням і визначають ступінь нагрівання ізоляційної системи. Утворена в активних частинах теплота відводиться через конструктивні елементи двигуна та систему охолодження в навколишнє середовище. Отже, ефективність тепловідведення є одним із визначальних

чинників забезпечення допустимого температурного режиму та надійної роботи тягового електродвигуна.

Інші причини нагріву та подальшого перегріву обмоток є також зростання активного опору провідників зі збільшенням температури. У міру нагрівання мідних або алюмінієвих провідників їх електричний опір зростає, що викликає додаткове збільшення втрат потужності. Таким чином, виникає самопідсилювальний процес: підвищення температури спричиняє збільшення опору, а збільшення опору призводить до ще більшого тепловиділення. Якщо система охолодження не забезпечує своєчасне відведення теплоти, такий процес може перейти в небезпечний режим перегріву, що особливо критично для ізоляції обмоток.

Окрім втрат у провідниках, на тепловий стан обмоток впливають і інші види втрат у електродвигуні. До них належать втрати в сталі магнітопроводу, механічні втрати в підшипниках і на вентиляцію, а також додаткові втрати, зумовлені вищими гармоніками струму та магнітного поля. Хоча ці втрати не завжди безпосередньо виділяються саме в обмотках, вони підвищують загальну температуру внутрішнього простору машини й погіршують умови охолодження обмоток. У двигунах з постійними магнітами додатково виникають теплові обмеження, пов'язані з чутливістю магнітної системи до підвищеної температури; у наданому вами джерелі прямо зазначено, що зі зростанням температури постійних магнітів погіршуються характеристики машини та зростає ризик розмагнічування.

Важливою причиною перегріву є робота електродвигуна в режимах перевантаження. Для тягових машин це може бути рух на підйомах, буксирування, перевезення підвищеного вантажу, тривалий розгін або робота за умов частих стартів і зупинок. У таких режимах струм в обмотках тривалий час залишається вищим за розрахунковий, а отже і тепловиділення перевищує рівень, на який розрахована система охолодження. У наданому вами розділі 1 підкреслюється, що тяговий двигун повинен забезпечувати високий момент у

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

зоні низьких швидкостей і працювати в області сталої потужності на вищих швидкостях, що означає роботу в умовах змінного, а часто й граничного електромагнітного навантаження.

Окремо слід виділити вплив режимів електричного і рекуперативного гальмування. У цих режимах електродвигун переходить у генераторний стан, однак це не означає відсутності нагрівання. Залежно від схеми силового перетворювача, алгоритму керування та величини струмів у фазах, у обмотках можуть зберігатися значні втрати, а в окремих зонах навіть виникати локальні теплові перевантаження. Тому при аналізі причин перегріву тягових електродвигунів необхідно враховувати не лише тяговий режим, а весь робочий цикл транспортного електропривода, включаючи гальмівні процеси.

Суттєвим чинником перегріву є недостатня ефективність системи охолодження. Навіть за нормального рівня електричних втрат температура обмоток може перевищити допустимі межі, якщо відведення теплоти є недостатнім. Причинами цього можуть бути недосконалість конструкції вентиляційних каналів, забруднення повітряних проходів, зменшення витрати охолоджувального повітря, підвищення температури навколишнього середовища або загальна невідповідність системи охолодження сучасним режимам навантаження. Для окремих конструкцій двигунів охолодження ускладнюється розміщенням джерел тепла. Так, у колекторних машинах тепловиділення значною мірою припадає на ротор, що погіршує умови тепловідведення, тоді як у безщіткових машинах частина тепла зосереджена у статорі, де його простіше відводити.

Перегрів обмоток часто має локальний характер. Це пов'язано з нерівномірністю розподілу температури в машині. Найбільш навантаженими ділянками зазвичай є пазова частина обмоток, лобові частини, місця з погіршеним тепловим контактом та зони, де циркуляція охолоджувального середовища є недостатньою. У таких точках можуть формуватися так звані “гарячі осередки”, температура яких значно перевищує середнє значення по

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

машині. Саме локальні перегріву є особливо небезпечними, оскільки вони прискорюють старіння ізоляції та можуть викликати міжвиткові замикання ще до того, як загальна температура електродвигуна стане критичною.

Ще однією важливою причиною перегріву є погіршення стану ізоляції та старіння матеріалів. У процесі тривалої експлуатації ізоляція втрачає еластичність, погіршується її теплопровідність, з'являються мікропошкодження, тріщини та ділянки зниженої електричної міцності. Це не лише зменшує допустиму температуру роботи, а й погіршує умови тепловідведення від провідників до осердя та корпусу. У результаті навіть звичайні робочі режими, які раніше не були небезпечними, можуть призводити до підвищеного нагрівання та прискореного руйнування ізоляційної системи.

Для наочного відображення основних джерел нагрівання тягового електродвигуна та шляхів відведення теплоти в навколишнє середовище на рисунку 1.2 наведено схему теплових втрат і тепловідведення в машині.



Рис.1.2 причини нагрівання обмоток електродвигунів

Як видно з рисунка 1.3, тепловий стан тягового електродвигуна формується під дією втрат у мідних обмотках, у сталі магнітопроводу, механічних втрат і втрат на вентиляцію, а відведення утвореної теплоти здійснюється через корпус і систему охолодження в навколишнє середовище.

Таким чином, причини нагрівання та перегріву обмоток тягових електродвигунів мають комплексний характер. До них належать великі струмові навантаження, часті пуски і перевантаження, повторно-короткочасний режим роботи, зростання опору провідників із температурою, вплив супутніх втрат у машині, недосконалість або зниження ефективності системи охолодження, нерівномірність температурного поля та старіння ізоляції. Сукупна дія цих факторів призводить до погіршення теплового стану обмоток, зменшення ресурсу електродвигуна та підвищення ймовірності аварійних пошкоджень. Це обґрунтовує необхідність удосконалення систем охолодження та впровадження засобів безперервного моніторингу температур обмоток як важливих елементів підвищення надійності тягового електропривода.

1.3 Аналіз існуючих систем охолодження і контролю температури

Надійність і довговічність тягового електродвигуна значною мірою визначаються ефективністю системи охолодження та можливістю своєчасного контролю температурного стану його обмоток. У процесі роботи в електродвигуні виникають теплові втрати в обмотках, магнітопроводі, підшипникових вузлах і вентиляційній системі, внаслідок чого температура активних частин машини зростає. Якщо відведення теплоти є недостатнім або контроль температури здійснюється з низькою точністю, це призводить до перегріву ізоляції, прискореного старіння матеріалів, погіршення електричних характеристик і зниження загальної надійності електропривода. Саме тому в сучасних тягових електродвигунах системи охолодження і температурного контролю слід розглядати як взаємопов'язані функціональні підсистеми.

Існуючі системи охолодження тягових електродвигунів можна поділити на повітряні, рідинні та комбіновані. Найпростішим варіантом є природне повітряне охолодження, при якому відведення теплоти відбувається за рахунок природної конвекції і теплопровідності через корпус машини. Такий спосіб є конструктивно простим, не потребує додаткового обладнання та

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

характеризується невисокою вартістю. Однак його ефективність обмежена, тому він придатний переважно для електродвигунів малої потужності або для режимів з незначним тепловим навантаженням. Для тягових машин, які працюють у повторно-короткочасних та перевантажувальних режимах, природного охолодження, як правило, недостатньо.

Більш поширеним є примусове повітряне охолодження, за якого циркуляція повітря створюється вентилятором або зовнішньою вентиляційною установкою. У такій системі охолоджувальне повітря проходить через вентиляційні канали, обдуває поверхні статора, ротора, лобові частини обмоток і сприяє більш інтенсивному відведенню теплоти. Перевагами цього способу є відносна простота реалізації, можливість використання у двигунах різної потужності та достатньо висока ефективність при правильному конструюванні повітряних каналів. Разом з тим повітряне охолодження має і недоліки: його ефективність суттєво залежить від температури навколишнього середовища, чистоти вентиляційних трактів, швидкості потоку повітря та режиму роботи двигуна.

Для наочного подання принципу контролю температурного стану тягового електродвигуна на рисунку 1.3 наведено схему контролю температури обмоток і підшипникових вузлів із формуванням керуючих та захисних дій.

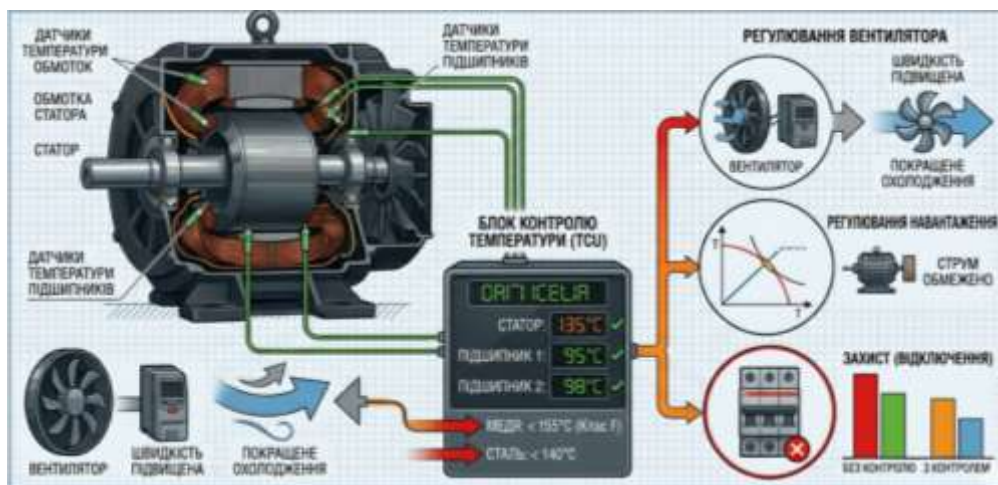


Рисунок 1.3 Схема контролю температури електродвигуна

У тягових електродвигунах підвищеної потужності все частіше застосовується рідинне охолодження. У таких системах теплота відводиться через корпус, спеціальні канали або охолоджувальні сорочки за допомогою рідини, яка має більшу теплоємність і теплопровідність порівняно з повітрям. Це дає змогу значно підвищити інтенсивність тепловідведення, зменшити габарити машини за однакової потужності та забезпечити стабільніший температурний режим. Перевагою рідинного охолодження є також краща керованість тепловим процесом. Водночас такі системи є складнішими за конструкцією, потребують насосів, теплообмінників, герметичних з'єднань і додаткового контролю стану охолоджувального контуру. Це підвищує вартість електропривода та ускладнює його обслуговування.

Окрему групу становлять комбіновані системи охолодження, у яких поєднуються кілька способів тепловідведення. Наприклад, основне відведення теплоти може здійснюватися рідинним контуром через корпус статора, а додаткове — за рахунок внутрішньої вентиляції. Такі рішення є більш ефективними з точки зору підтримання допустимого температурного стану активних частин, особливо в умовах високих перевантажень і змінного режиму роботи. Проте вони характеризуються ще більшою складністю конструкції та підвищеними вимогами до надійності всіх елементів системи.

Ефективність будь-якої системи охолодження визначається не лише видом охолоджувального середовища, а й особливостями конструкції самого двигуна. Важливу роль відіграють геометрія вентиляційних каналів, розміщення лобових частин обмоток, щільність укладання провідників у пазах, матеріали ізоляції, теплопровідність конструктивних елементів та взаємне розташування зон найбільшого тепловиділення. У багатьох випадках загальна температура двигуна може залишатися в допустимих межах, тоді як в окремих ділянках обмоток виникають локальні перегріви. Саме це є однією з головних причин того, що удосконалення систем охолодження має бути

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

орієнтоване не лише на зниження середньої температури машини, а й на вирівнювання температурного поля обмоток.

Поряд із системами охолодження важливе значення мають засоби контролю температури. Існуючі методи контролю можна умовно поділити на прямі та непрямі. Прямий контроль передбачає безпосереднє вимірювання температури за допомогою датчиків, установлених у контрольованих точках електродвигуна. До таких датчиків належать термопари, терморезистори, термістори та датчики опору типу Pt100 або Pt1000. Основною перевагою прямого контролю є можливість отримання реального значення температури в конкретній зоні машини. Недоліком є обмежена кількість точок вимірювання, складність розміщення датчиків у найбільш нагрітих ділянках обмоток та можливий вплив умов монтажу на точність показань.

Непрямі методи контролю ґрунтуються на оцінюванні температурного стану обмоток за електричними параметрами двигуна або за математичною моделлю теплових процесів. Найпростішим прикладом є визначення температури за зміною активного опору обмотки. Оскільки опір провідника залежить від температури, за відомої величини струму і напруги можна оцінити ступінь нагрівання обмоток. Більш складні системи використовують теплові моделі, в яких температура розраховується на основі поточних навантажень, часу роботи, швидкості обертання, режиму охолодження та інших параметрів. Перевагою непрямих методів є можливість безперервного контролю без встановлення великої кількості внутрішніх датчиків, однак їх точність залежить від адекватності моделі та правильності врахування реальних умов роботи двигуна.

У практиці тягового електропривода найбільш доцільним є поєднання прямих і непрямих методів контролю температури. Датчики температури забезпечують контроль найбільш відповідальних зон, а розрахункові алгоритми дають змогу оцінювати тепловий стан у важкодоступних точках і прогнозувати наближення до граничних режимів. Такий підхід дозволяє не

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

лише фіксувати вже наявний перегрів, а й формувати попереджувальні сигнали, змінювати режим роботи електропривода або вмикати захисні функції до виникнення аварійної ситуації.

Для узагальнення особливостей основних систем охолодження тягових електродвигунів у таблиці 1.1 наведено їх порівняльну характеристику за перевагами та недоліками.

Табл. 1.1 Переваги та недоліки систем охолодження

Система охолодження	Переваги	Недоліки
Природне повітряне	Проста конструкція; низька вартість; не потребує додаткового обладнання	Низька ефективність тепловідведення; обмежене застосування при високих навантаженнях
Примусове повітряне	Вища ефективність порівняно з природним охолодженням; відносна простота реалізації; можливість застосування в двигунах різної потужності	Залежність від стану вентиляційних каналів і температури середовища; можливість локальних перегрівів
Рідинне	Висока інтенсивність охолодження; стабільний температурний режим; можливість зменшення габаритів двигуна	Складніша конструкція; вища вартість; потреба в герметичності та додатковому обслуговуванні
Комбіноване	Висока ефективність тепловідведення; краще пристосування до змінних режимів роботи; можливість охолодження найбільш навантажених зон	Найбільша конструктивна складність; підвищена вартість; складніше технічне обслуговування

Як видно з таблиці 1.1, зі зростанням ефективності охолодження ускладнюється конструкція системи та підвищуються вимоги до її обслуговування, тому вибір конкретного способу охолодження повинен здійснюватися з урахуванням потужності двигуна, режимів його роботи та допустимого температурного стану обмоток.

Аналіз існуючих систем охолодження і контролю температури показує, що жодне окреме рішення не є універсальним. Повітряне охолодження є простішим і дешевшим, але поступається рідинному за інтенсивністю тепловідведення. Рідинні та комбіновані системи забезпечують вищу ефективність, проте вимагають складнішої конструкції й додаткового обслуговування. Аналогічно, прямий контроль температури є наочним і точним у місцях встановлення датчиків, але не охоплює весь об'єм машини, тоді як непрямі методи залежать від точності математичного опису теплових процесів. Тому для підвищення надійності тягових електродвигунів доцільним є удосконалення системи охолодження одночасно з впровадженням системи моніторингу температур обмоток.

Таким чином, сучасний рівень розвитку тягового електропривода потребує комплексного підходу до забезпечення допустимого теплового режиму. Ефективна система охолодження повинна забезпечувати інтенсивне відведення теплоти від найбільш нагрітих ділянок обмоток, а система контролю температури — своєчасно виявляти небезпечні відхилення теплового стану. Саме поєднання цих двох напрямів створює передумови для підвищення ресурсу ізоляції, зниження ймовірності аварійних відмов і покращення загальної надійності тягового електродвигуна. Це безпосередньо обґрунтовує доцільність подальшого удосконалення охолодження тягових електродвигунів з моніторингом температур обмоток як предмета даної роботи.

Висновки розділу 1

Встановлено, що застосовувані системи охолодження не завжди забезпечують достатньо ефективне відведення теплоти від найбільш нагрітих зон електродвигуна, насамперед від обмоток. Крім того, використання лише традиційних засобів теплового захисту не дає змоги своєчасно виявляти локальні перегріву та оперативно реагувати на зміну теплового стану машини. У зв'язку з цим актуальним є вдосконалення системи охолодження тягового

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

електродвигуна з одночасним впровадженням моніторингу температур обмоток.

Метою дипломного проєкту є підвищення надійності та ефективності роботи тягового електродвигуна шляхом удосконалення системи його охолодження та розробки системи моніторингу температур обмоток.

Об'єктом дослідження є теплові процеси в тяговому електродвигуні в умовах змінних експлуатаційних режимів.

Предметом дослідження є система охолодження тягового електродвигуна та засоби моніторингу температурного стану його обмоток.

Для досягнення поставленої мети в дипломному проєкті необхідно розв'язати такі основні задачі:

1. Проаналізувати конструктивні особливості тягових електродвигунів та режими їх роботи, що впливають на тепловий стан обмоток.
2. Визначити основні причини нагрівання та перегріву обмоток тягового електродвигуна.
3. Провести аналіз існуючих систем охолодження та методів контролю температури обмоток.
4. Обґрунтувати напрям удосконалення системи охолодження тягового електродвигуна.
5. Розробити технічне рішення щодо покращення тепловідведення від обмоток електродвигуна.
6. Запропонувати систему моніторингу температур обмоток із вибором датчиків та принципу контролю.
7. Оцінити очікувану ефективність запропонованих рішень з точки зору зниження температурного навантаження та підвищення надійності роботи двигуна.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ У ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНАХ

2.1 Електричні та теплові процеси в обмотках двигуна.

Під електричними та тепловими процесами в обмотках тягового електродвигуна слід розуміти сукупність явищ, які виникають у провідниках, ізоляції та прилеглих елементах конструкції під час роботи машини. Ці процеси охоплюють проходження електричного струму по обмотках, створення електромагнітного поля, виникнення електромагнітного моменту, появу втрат потужності, нагрівання провідників і ізоляції, поширення теплоти в середині двигуна та її подальше відведення в навколишнє середовище. Отже, мова йде не про два ізольовані явища, а про єдину взаємопов'язану систему, у якій електричний стан обмоток визначає їх тепловий стан, а температура, у свою чергу, впливає на електричні параметри та режими роботи машини.

Електричний процес в обмотках починається з підведення напруги до електродвигуна. Під дією електричного поля в провідниках виникає струм, який формує магнітне поле та бере участь у створенні електромагнітного моменту. Саме завдяки цьому забезпечується перетворення електричної енергії на механічну. Разом з тим реальні обмотки мають активний опір, тому проходження струму неминуче супроводжується електричними втратами. Частина підведеної енергії не перетворюється на корисну механічну роботу, а переходить у теплоту. Таким чином, уже на рівні електричного процесу закладається причина майбутнього нагрівання обмоток.

Зміст електричних процесів в обмотках не обмежується лише фактом наявності струму. До них також належать зміни струмового навантаження у часі, перерозподіл струмів між окремими фазами або секціями, зміна падіння напруги на активному та індуктивному опорах, вплив режиму пуску, розгону, перевантаження чи гальмування. Для тягових електродвигунів ці процеси мають особливе значення, оскільки такі машини працюють у змінних режимах, за яких навантаження не є сталим. Саме через це обмотки тягового

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

двигуна зазнають складних і часто нерівномірних електричних впливів, що безпосередньо відбивається на їх тепловому стані.

Тепловий процес є фізичним наслідком електричного процесу. Після виділення теплоти в провідниках вона починає поширюватися через ізоляцію, осердя, лобові частини обмоток, корпус двигуна та інші конструктивні елементи. Частина тепла акумулюється в матеріалах двигуна, а частина відводиться в навколишнє середовище. Отже, тепловий процес в обмотках включає не лише саме нагрівання провідників, а й перенесення теплової енергії, формування температурного поля, локальні перегріву, теплову інерційність та охолодження машини.

У реальному тяговому електродвигуні теплові процеси відбуваються за рахунок трьох основних механізмів теплообміну: теплопровідності, конвекції та теплового випромінювання. Теплопровідність забезпечує перенесення теплоти всередині твердих тіл, тобто від провідників до ізоляції, від ізоляції до осердя та корпусу. Конвекція визначає інтенсивність відведення теплоти від поверхонь двигуна до повітряного потоку або іншого охолоджувального середовища. Теплове випромінювання також бере участь у теплообміні, хоча в більшості електродвигунів його частка є меншою, ніж роль теплопровідності та конвекції. Саме співвідношення між кількістю теплоти, що виділяється, і можливістю її відведення визначає фактичну температуру обмоток у кожний момент часу.

Важливою особливістю теплових процесів є їх інерційний характер. На відміну від електричного струму, який може змінюватися практично миттєво, температура обмоток не здатна так швидко реагувати на зміну режиму роботи. Після збільшення навантаження струм в обмотках зростає одразу, але температура підвищується поступово. Аналогічно після зменшення струму або вимкнення двигуна температура ще деякий час залишається підвищеною. Це пояснюється теплоємністю матеріалів, складністю внутрішнього теплообміну та кінцевою швидкістю поширення теплового потоку в

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.2	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

конструкції машини. Для тягового електродвигуна така особливість має велике практичне значення, оскільки під час повторно-короткочасних режимів теплота може накопичуватися від циклу до циклу.

Ще однією суттєвою рисою є нерівномірність температурного поля. У різних частинах обмотки температура може відрізнятися, оскільки умови тепловідведення та щільність тепловиділення в пазових і лобових частинах обмоток є неоднаковими. Це означає, що навіть при відносно допустимій середній температурі двигуна окремі ділянки обмоток можуть працювати в режимі локального перегріву. Саме тому при аналізі теплового стану тягового електродвигуна слід враховувати не лише середню температуру, а й можливість появи найбільш нагрітих точок, які є критичними з точки зору старіння ізоляції та надійності машини.

Таким чином, електричні та теплові процеси в обмотках є складною сукупністю взаємопов'язаних явищ, що визначають роботу тягового електродвигуна як електромеханічної системи. Електричний процес формує струм, втрати та електромагнітний момент, а тепловий процес відображає наслідки цих явищ у вигляді нагрівання, поширення теплоти та встановлення певного температурного режиму. Саме від характеру протікання цих процесів залежать навантажувальна здатність двигуна, ресурс ізоляції, ефективність системи охолодження та необхідність моніторингу температурного стану обмоток.

Отже, електричні та теплові процеси в обмотках тягового електродвигуна є взаємопов'язаними, оскільки струмове навантаження визначає рівень електричних втрат, а температура обмоток впливає на активний опір, допустимі режими роботи та надійність машини. Тепловий стан електричних машин безпосередньо пов'язаний з їх ефективністю, ресурсом і працездатністю, а для тягового обладнання це особливо важливо через змінні та перевантажувальні режими експлуатації.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

У процесі роботи тягового електродвигуна частина підведеної електричної енергії перетворюється на механічну, а частина втрачається у вигляді теплоти. Сумарні втрати потужності в двигуні доцільно подати як суму втрат в обмотках, сталі, механічних і додаткових втрат:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\text{обм}} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{дод}} \quad (2.1)$$

де $\Delta P_{\text{обм}}$ — втрати в обмотках; ΔP_{Fe} — магнітні втрати в осерді; $\Delta P_{\text{мех}}$ — механічні втрати; $\Delta P_{\text{дод}}$ — додаткові втрати.

Для обмоток основним джерелом тепловиділення є джоулеві втрати, що визначаються законом Джоуля–Ленца:

$$\Delta P_{\text{обм}} = m I_{\phi}^2 R_{\phi} \quad (2.2)$$

де m — число фаз або еквівалентних гілок; I_{ϕ}^2 — струм фази, А; R_{ϕ} — активний опір фази, Ом.

У спрощеному випадку для однієї еквівалентної обмотки вигляд формули:

$$\Delta P_{\text{обм}} = I^2 R \quad (2.3)$$

з наведених співвідношень видно, що втрати в обмотках зростають пропорційно квадрату струму. Це означає, що для тягового електродвигуна найбільш небезпечними з точки зору нагрівання є режими пуску, інтенсивного розгону, перевантаження та гальмування.

Важливою особливістю електричних процесів в обмотках є залежність активного опору провідників від температури. Для мідної обмотки в першому наближенні ця залежність записується так:

$$R_T = R_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (2.4)$$

де R_0 — опір обмотки при початковій температурі T_0 — опір при температурі T ; α — температурний коефіцієнт опору.

Тоді мідні втрати з урахуванням температурного фактора можна подати у вигляді:

$$\Delta P_{\text{обм}}(T) = m I_{\phi}^2 R_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (2.5)$$

Звідси випливає, що в двигуні формується позитивний електротепловий зворотний зв'язок: зростання температури збільшує опір, а збільшення опору

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

підвищує втрати потужності в обмотках, що спричиняє подальше нагрівання. На практиці це означає, що при недостатньому охолодженні навіть відносно помірне перевантаження може перевести машину в небезпечний тепловий режим.

Теплота, що виділяється в обмотках, передається в інші елементи конструкції та далі в навколишнє середовище. Основними видами теплообміну при цьому є теплопровідність, конвекція і теплове випромінювання. Для теплопровідності використовується закон Фур'є:

$$q'' = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (2.6)$$

де q'' — густина теплового потоку;

Конвективний теплообмін можна описати законом Ньютона–Ріхмана:

$$Q_k = \alpha_k S (T_s - T_{air}) \quad (2.7)$$

де α_k — коефіцієнт тепловіддачі; S — площа теплообміну; T_s — температура поверхні; T_{air} — температура охолоджувального середовища.

Теплове випромінювання в узагальненому вигляді описується виразом:

$$Q_{вип} = \varepsilon \sigma S (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.8)$$

де ε — ступінь чорноти поверхні; σ — стала Стефана–Больцмана.

У тягових електродвигунах найбільше значення мають теплопровідність у твердих елементах конструкції та конвективний теплообмін з повітрям або іншим охолоджувальним середовищем, тоді як внесок випромінювання зазвичай є меншим.

Для інженерного аналізу нагрівання двигуна часто використовують спрощену модель однорідного тіла з еквівалентною теплоємністю та узагальненим коефіцієнтом тепловіддачі. У такому разі рівняння теплового балансу можна записати як:

$$C \frac{dT}{dt} + A\tau = \Delta P_\Sigma \quad (2.9)$$

де C — еквівалентна теплоємність двигуна, Дж/°C; A — коефіцієнт тепловіддачі, Вт/°C; $A\tau$ — перевищення температури двигуна над температурою навколишнього середовища; ΔP_Σ — сумарні втрати потужності.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

Усталений тепловий режим настає тоді, коли температура перестає змінюватися в часі, тоді маємо:

$$\tau_{уст} = \frac{\Delta P_{\Sigma}}{A} \quad (2.10)$$

Це співвідношення показує, що температура обмоток залежить не тільки від рівня втрат, а й від здатності системи охолодження відводити теплоту. Отже, підвищення ефективності вентиляції або покращення умов теплообміну дозволяє зменшити робочу температуру навіть без зміни електромагнітної схеми двигуна.

Для випадку постійного навантаження розв'язок рівняння нагрівання має експоненціальний характер:

$$\tau(t) = \tau_{уст} + (\tau_0 - \tau_{уст})e^{-\frac{t}{T_n}} \quad (2.11)$$

Теплова стала часу визначається виразом:

$$T_n = \frac{C}{A} \quad (2.12)$$

Із цих формул випливає, що температура обмоток змінюється не миттєво, а поступово. Це є проявом теплової інерційності двигуна. У практичних умовах експлуатації тягового електродвигуна це означає, що після короткочасного зростання навантаження температура обмоток ще деякий час може продовжувати підвищуватися, навіть якщо струм уже зменшився. Саме тому аналіз теплового стану повинен враховувати не лише поточний режим, а й попередню теплову історію машини.

Для тягових електродвигунів характерною є робота у змінних режимах, за яких температура розподіляється по обмотках нерівномірно. Найбільш нагрітими можуть бути пазові ділянки, лобові частини обмоток та зони з погіршеним теплообміном. Тому середня температура двигуна не завжди відображає реальний стан найбільш небезпечних ділянок. У сучасному тепловому аналізі електричних машин для цього застосовують еквівалентні теплові схеми, моделі зосереджених параметрів і детальні теплові мережі LPTN. Для інженерного змісту даної роботи це означає, що при удосконаленні

системи охолодження і розробці системи моніторингу необхідно орієнтуватися саме на температуру критичних зон обмоток, а не лише на усереднені показники.

Таким чином, електричні та теплові процеси в обмотках тягового електродвигуна утворюють єдину електротеплову систему. Струмове навантаження визначає рівень втрат в обмотках, втрати формують тепловий потік, а температура впливає на опір, допустимі режими роботи та надійність машини. З інженерної точки зору це означає, що для потужного тягового електродвигуна потрібно одночасно враховувати електромагнітний момент, струми в обмотках, інтенсивність вентиляції, теплову інерційність і реальний температурний стан обмоток. Саме це є теоретичною основою для подальшого розгляду впливу температури на ізоляцію, а також для обґрунтування заходів з удосконалення охолодження та моніторингу температур.

2.2 Вплив температури обмоток на стан ізоляції

Під впливом температури обмоток на стан ізоляції та надійність електродвигуна слід розуміти сукупність теплових, електричних і механічних змін, які виникають в ізоляційній системі та конструктивних елементах машини внаслідок нагрівання обмоток під час роботи. Іншими словами, температура обмоток є не просто окремим експлуатаційним параметром, а одним із головних факторів, що визначають технічний стан двигуна, його довговічність, допустимі режими навантаження і ймовірність виникнення пошкоджень. Чим вищою є температура обмоток і чим довше вона зберігається на підвищеному рівні, тим сильніше вона впливає на електричну міцність ізоляції, механічну стійкість матеріалів та загальну надійність машини.

Суть цього впливу полягає в тому, що ізоляція обмоток працює в умовах одночасної дії електричного поля, температурного навантаження, вібрацій, механічних напружень і змінних режимів роботи. Поки температура перебуває в межах, допустимих для відповідного класу ізоляції, матеріали зберігають

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

свої основні властивості: електричну міцність, еластичність, адгезію до провідника, стійкість до механічних коливань і локальних перенапруг. Однак при підвищенні температури починаються процеси термічного старіння, тобто поступового погіршення властивостей ізоляційних матеріалів. У результаті змінюється їх структура, зменшується механічна міцність, погіршується теплостійкість, знижується здатність витримувати електричні напруження, а отже, збільшується ризик пошкодження обмоток.

Вплив температури на ізоляцію проявляється насамперед у фізико-хімічному руйнуванні її матеріалу. При тривалому нагріванні прискорюються процеси окиснення, висихання, втрати пластичності, старіння просочувальних сполук і лаків. Це може призводити до появи мікротріщин, відшарування ізоляції, погіршення міжвиткової ізоляції та зниження електричної міцності в окремих ділянках обмотки. Особливо небезпечним є те, що такі зміни спочатку можуть не викликати негайної відмови двигуна, але поступово накопичуються і створюють передумови для аварійного пошкодження під час чергового перевантаження або комутаційного впливу.

Крім безпосереднього впливу на ізоляційний матеріал, температура обмоток впливає і на конструктивну надійність електродвигуна в цілому. Нагрівання викликає теплове розширення провідників, пазових клинів, сердечника, ізоляційних прокладок та інших елементів активної частини. Оскільки різні матеріали мають різні коефіцієнти теплового розширення, у конструкції виникають додаткові внутрішні напруження. При багаторазових циклах нагрівання й охолодження ці напруження можуть сприяти ослабленню кріплення лобових частин обмоток, появі мікропошкоджень ізоляції, порушенню щільності укладання провідників і погіршенню теплового контакту між елементами машини. Усе це знижує механічну та електричну надійність електродвигуна.

Особливу небезпеку становить не лише висока середня температура обмоток, а й локальні перегріву окремих зон. У реальній машині температура

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

розподіляється нерівномірно, тому найбільш термічно навантажені ділянки можуть досягати критичних значень раніше, ніж це стане помітно за середніми показниками. Саме в таких зонах найчастіше починається прискорене старіння ізоляції, погіршення міжвиткової міцності та формування осередків майбутнього короткого замикання. Тому під впливом температури обмоток слід розуміти не лише загальний нагрів машини, а й локальний тепловий стан найбільш уразливих ділянок активної частини.

З точки зору теорії надійності температура обмоток впливає на двигун через зміну інтенсивності відмов. Чим вищою є робоча температура, тим швидше зменшується ресурс ізоляції і тим більша ймовірність виникнення дефектів у процесі експлуатації. Отже, температурний фактор діє одночасно у двох напрямках: по-перше, прискорює старіння матеріалів, а по-друге, зменшує запас працездатності машини в перевантажувальних та перехідних режимах. Саме тому температурний стан обмоток розглядається як один із ключових показників технічного стану тягового електродвигуна.

Для тягових електродвигунів дане питання має особливе значення, оскільки вони працюють у складних експлуатаційних умовах: за частих пусків, змін навантаження, розгонів, гальмувань, вібрацій та впливу зовнішнього середовища. У таких умовах навіть допустимий у середньому температурний режим не завжди гарантує достатню надійність, якщо окремі ділянки обмоток систематично перегріваються. Тому аналіз впливу температури на ізоляцію і надійність двигуна є необхідним не лише для пояснення причин можливих пошкоджень, а й для подальшого обґрунтування системи охолодження, моніторингу температури, сигналізації та захисту.

Таким чином, вплив температури обмоток на стан ізоляції та надійність електродвигуна слід розглядати як комплексний процес, у якому підвищена температура змінює властивості ізоляційних матеріалів, прискорює їх старіння, викликає додаткові механічні напруження в конструкції та знижує загальну довговічність машини. Саме через це контроль температурного стану

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

обмоток і недопущення перегріву є одними з головних умов забезпечення надійної та тривалої роботи тягового електродвигуна.

Для інженерного оцінювання ресурсу ізоляції часто використовують наближене правило «10 °С». Воно означає, що збільшення робочої температури приблизно на 10 °С зменшує строк служби ізоляції приблизно вдвічі. У розрахунковому вигляді це можна подати так:

$$\frac{L_2}{L_1} = 2^{-\frac{T_2 - T_1}{10}} \quad (2.13)$$

де L_1 і L_2 — ресурс ізоляції при температурах T_1 і T_2 .

$$L = L_0 e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} \quad (2.14)$$

де L — очікуваний ресурс ізоляції; L_0 — базовий ресурс; B — коефіцієнт, пов'язаний з енергією активації процесу старіння; T і T_0 — абсолютні температури. Ці співвідношення добре показують, що навіть порівняно невелике перевищення температури може істотно скоротити ресурс ізоляційної системи.

Температура обмоток впливає не лише на ізоляцію, а й на електричні параметри двигуна. Як було показано в п. 2.1, зі зростанням температури збільшується активний опір обмотки:

$$R_T = R_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (2.15)$$

Тоді втрати в обмотках також зростають:

$$\Delta P_{\text{обм}}(T) = m I_{\phi}^2 R_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (2.16)$$

Отже, перегрів обмоток не лише прискорює старіння ізоляції, а й безпосередньо підвищує електричні втрати, знижує ККД та погіршує тепловий режим машини. На практиці це проявляється у збільшенні нагрівання під час тривалого тягового навантаження, при русі з великим моментом або в умовах недостатнього охолодження.

Окрему небезпеку становлять локальні перегріви обмоток. Середня температура машини може ще залишатися в допустимих межах, тоді як у

найгарячішій точці ізоляція вже працює в критичному режимі. Для інженерного опису це зручно подати співвідношенням:

$$T_{hs} = T_{сер} + \Delta T_{лок} \quad (2.17)$$

де T_{hs} — температура найгарячішої точки обмотки; $T_{сер}$ — середня температура обмотки; $\Delta T_{лок}$ — локальне перевищення температури.

Відповідно, умова безпечної роботи ізоляції може бути записана як:

$$T_{hs} \leq T_{доп} \quad (2.18)$$

де $T_{доп}$ — допустима температура для відповідного класу ізоляції.

Саме температура hot-spot є найважливішою з точки зору довговічності, оскільки руйнування ізоляції починається не за середньою температурою двигуна, а в найбільш термічно навантажених ділянках.

Крім термохімічного старіння, підвищена температура викликає термомеханічні напруження. Різні елементи конструкції — мідь провідників, сталь осердя, просочувальні матеріали, міжвиткова ізоляція — мають різні коефіцієнти теплового розширення. Через це при циклічному нагріванні й охолодженні в обмотках виникають додаткові механічні напруження, які можуть сприяти появі мікротріщин, ослабленню фіксації лобових частин, погіршенню теплового контакту і прискоренню деградації ізоляції. Для потужних тягових двигунів це особливо актуально через часті зміни навантаження та вібраційні впливи.

З практичної точки зору важливо оцінювати температурний запас ізоляції. Його можна подати як різницю між допустимою температурою класу ізоляції та фактичною робочою температурою:

$$\Delta T_{зап} = T_{доп} - T_{роб} \quad (2.19)$$

Де $\Delta T_{зап}$ — температурний запас; $T_{доп}$ — допустима температура ізоляції; $T_{роб}$ — реальна робоча температура обмотки.

Чим менший цей запас, тим вищий ризик прискореного старіння та аварійної відмови. Саме тому в сучасних конструкціях двигунів застосовують

або ізоляцію вищого класу, або роботу з нижчим температурним підйомом, щоб отримати додатковий тепловий резерв і збільшити строк служби машини.

Для тягового електродвигуна це має безпосереднє інженерне значення. Якщо температура обмоток не контролюється, то двигун може працювати в режимі прихованого перегріву: середній режим ще не виглядає аварійним, але ресурс ізоляції вже швидко зменшується. Тому під час удосконалення системи охолодження необхідно не просто знизити середню температуру корпусу чи повітря в каналах, а забезпечити зменшення температури саме в критичних зонах обмоток. У сучасних роботах показано, що зменшення температури hot-spot одночасно знижує і термохімічне старіння, і термомеханічні напруження в обмотці.

Таким чином, температура обмоток є одним із визначальних параметрів надійності тягового електродвигуна. Її зростання прискорює старіння ізоляції, збільшує електричні втрати, знижує довговічність і підвищує ймовірність міжвиткових пошкоджень. З інженерної точки зору це означає, що забезпечення надійної роботи електродвигуна повинно включати одночасно ефективне охолодження, контроль температури найгарячіших ділянок та своєчасне формування сигналізації і захисту при наближенні до граничних температур.

2.3 Методи оцінювання температурного стану обмоток

Оцінювання температурного стану обмоток тягового електродвигуна є необхідною умовою забезпечення його надійної та безпечної роботи. На відміну від разового вимірювання температури корпусу або окремих поверхонь, контроль саме температури обмоток дає змогу своєчасно виявити перегрів активної частини машини, оцінити тепловий запас ізоляції та сформувати сигнали попередження або захисту. У сучасній практиці методи теплового контролю електричних машин умовно поділяють на три основні групи: прямі методи, непрямі методи та модельні методи оцінювання. Така

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

класифікація широко використовується в сучасних оглядах з теплового моніторингу електродвигунів.

Прямі методи базуються на безпосередньому вимірюванні температури в певній точці обмотки або поблизу неї за допомогою датчиків. До найбільш поширених належать термометри опору типу RTD, термістори, термопари та волоконно-оптичні датчики. У промислових системах захисту двигунів використовують як RTD, так і термісторні датчики; наприклад, захисні пристрої можуть безпосередньо вимірювати температуру обмоток через вбудовані RTD і термістори, а РТС-термістори спеціально вбудовують у фазні обмотки статора для контролю досягнення граничної температури.

Термометри опору, зокрема Pt100, є одним із найбільш уживаних засобів точного контролю температури обмоток. Стандартизований Pt100 має номінальний опір 100 Ом при 0 °С, а для зменшення похибки від опору підвідних проводів у практиці застосовують 3- та 4-провідні схеми підключення. Для технічної реалізації це важливо, оскільки саме в умовах тягового двигуна, де кабельні лінії можуть мати значну довжину, помилка від провідників без компенсації може спотворювати результат вимірювання.

Аналітично для металевого датчика опору температурна залежність у робочому наближенні може бути подана як:

$$R_T = R_0(1 + \alpha(T - T_0)) \quad (2.20)$$

звідки температура визначається виразом:

$$T = T_0 + \frac{R_T - R_0}{\alpha R_0} \quad (2.21)$$

де R_0 — опір датчика при температурі T_0 ; R_T — опір при температурі T ; α — температурний коефіцієнт опору.

Перевагою RTD є висока точність і добра довготривала стабільність, тому такі датчики доцільно використовувати там, де потрібен не лише захист, а й вимірювальний канал моніторингу. Водночас при практичному монтажі потрібно враховувати самонагрів датчика, якість ізоляції та можливий вплив опору лінії зв'язку.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

Термістори, особливо РТС-датчики, широко застосовуються саме як засіб теплового захисту. Їх особливість полягає в тому, що поблизу номінальної температури спрацювання опір різко зростає, і це дає змогу формувати чіткий сигнал аварійного перегріву. Такий принцип зручний для захисних схем, але менш придатний для точного безперервного вимірювання всієї температурної кривої, ніж RTD. Разом з тим напівпровідникові терморезистори мають достатньо широкий робочий діапазон і прийнятні похибки для технічного контролю.

Термопари використовують тоді, коли потрібна висока швидкодія, широкий температурний діапазон або конструктивна простота датчика. Однак для них характерні менші рівні вихідного сигналу, потреба в компенсації холодного спаю та більша залежність точності від монтажних умов і завод. Тому у системах моніторингу електродвигунів термопари частіше застосовують у випробувальних або спеціальних вимірювальних задачах, ніж у штатному вбудованому контролі тягових машин.

Окрему групу прямих методів утворюють волоконно-оптичні датчики. Їх основною перевагою є електромагнітна стійкість, можливість встановлення безпосередньо в зонах, близьких до hot-spot, і придатність до розподіленого вимірювання температури. У літературі наведено приклади використання таких датчиків безпосередньо у статорних обмотках і вентиляційних каналах електричних машин. Для тягового електродвигуна цей підхід є технічно привабливим, але складнішим і дорожчим у впровадженні, тому для бакалаврського проєкту він доцільний скоріше як перспективний напрям, ніж як базове рішення.

Непрямі методи ґрунтуються не на безпосередньому вимірюванні температури, а на визначенні температурного стану за іншими параметрами двигуна, що змінюються з температурою. Найпростішим і найпоширенішим варіантом є оцінювання температури обмотки за її активним опором. Оскільки опір міді зростає зі збільшенням температури, можна використати залежність:

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.2	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$R_{обм,T} = R_{обм,0}(1 + \alpha(T - T_0)) \quad (2.22)$$

звідки

$$T = T_0 + \frac{R_{обм,T} - R_{обм,0}}{\alpha R_{обм,0}} \quad (2.23)$$

Такий метод зручний тим, що не потребує вбудованого датчика в кожній контрольованій точці, але його суттєвим недоліком є те, що він дає, як правило, усереднену температуру обмотки, а не температуру найбільш нагрітої ділянки. У програмі підготовки з випробувань і діагностики електричних машин окремо виділяються як контроль температури частин електричних машин, так і методи вимірювання опору обмоток із коригуванням результатів за температурою.



Рис. 2.2 Класифікація методів оцінювання температурного стану обмоток

Як видно з рисунка 2.2, прямі методи забезпечують безпосереднє вимірювання температури, непрямі дозволяють оцінити її за електричними параметрами двигуна, а модельні поєднують експериментальні дані з тепловою моделлю машини. Для практики тягових електродвигунів найбільш доцільним є комбіноване використання цих підходів. Узагальнена класифікація та практичні обмеження таких методів наведені в сучасному огляді теплового моніторингу електродвигунів.

Для порівняння основних підходів до контролю температури обмоток у таблиці 2.1 наведено їх узагальнені характеристики з позиції практичного застосування в тяговому електродвигуні.

Таблиця 2.1 – Порівняльна характеристика методів оцінювання температурного стану обмоток

Метод	Принцип	Переваги	Обмеження	Доцільність для нашої теми
RTD (Pt100, Pt1000)	Пряме вимірювання температури за зміною опору датчика	Висока точність, стабільність, придатність для моніторингу	Потрібен монтаж у конструкцію, вплив лінії зв'язку та самонагріву	Доцільний як основний вимірювальний канал
РТС-термістори	Контроль досягнення граничної температури за різким зростанням опору	Простота, надійність, зручність для захисту	Менш придатні для точного безперервного вимірювання	Доцільні для сигналізації та аварійного захисту
Термопары	Вимірювання за термо-ЕРС	Широкий діапазон температур, швидкодія	Потрібна компенсація холодного спаю, низька завадостійкість	Доцільні переважно для випробувань
Волоконно-оптичні датчики	Пряме вимірювання в критичних точках без електромагнітного впливу	Стійкість до ЕМ-завад, можливість hot-spot контролю	Висока вартість, складність впровадження	Перспективний, але складний варіант

За активним опором обмотки	Непряма оцінка температури за зміною опору провідника	Не потребує датчика в кожній точці, простота розрахунку	Дає усереднену температуру, не показує локальний перегрів	Доцільний як допоміжний розрахунковий метод
За тепловою моделлю	Оцінка температури за втратами та параметрами теплової схеми	Дає змогу прогнозувати температур у в часі	Потребує правильної ідентифікації параметрів моделі	Доцільний для аналітичного моніторингу

Отже, для задачі даного диплома найбільш обґрунтованим є поєднання двох основних підходів: прямого контролю температури в критичних точках обмоток та розрахункової оцінки температурного стану за електричними або тепловими параметрами двигуна. Це дозволяє одночасно забезпечити надійний захист, отримати достатню інформативність для моніторингу та створити основу для визначення похибки, уставок сигналізації й захисту в наступному розділі. Узагальнення в таблиці базується на сучасному огляді методів теплового моніторингу, матеріалах АВВ щодо RTD і PTC-захисту двигунів та навчальних матеріалах з діагностики електричних машин.

Висновки. У розділі 2 було розглянуто теоретичні основи теплових процесів у тягових електродвигунах і встановлено, що електричні та теплові явища в обмотках мають тісний взаємозв'язок. Показано, що проходження струму по обмотках супроводжується виникненням електричних втрат, які переходять у теплоту та формують температурний стан активної частини машини. При цьому температура обмоток не є сталою величиною, а залежить від режиму навантаження, тривалості роботи, інтенсивності охолодження та теплової інерційності електродвигуна. Отже, тепловий режим тягового двигуна повинен розглядатися як один із визначальних факторів його працездатності.

Було встановлено, що основною причиною нагрівання обмоток є втрати потужності в провідниках, які зростають зі збільшенням струму навантаження. Разом з тим підвищення температури викликає зростання активного опору обмоток, унаслідок чого формується позитивний електротепловий зворотний зв'язок: зростання температури підсилює втрати, а збільшення втрат призводить до подальшого нагрівання. Це особливо характерно для тягових електродвигунів, що працюють у змінних, часто перевантажувальних режимах. Також показано, що теплові процеси в двигуні визначаються не лише кількістю виділеної теплоти, а й умовами її відведення через конструкцію машини та систему охолодження.

Також визначено, що температура обмоток безпосередньо впливає на стан ізоляції та надійність електродвигуна. Підвищення температури прискорює старіння ізоляційних матеріалів, знижує їх електричну міцність, викликає погіршення механічних властивостей і підвищує ймовірність міжвиткових та корпусних пошкоджень. Особливо небезпечними є локальні перегріви, оскільки вони можуть виникати навіть за відносно допустимої середньої температури машини. Таким чином, температурний стан обмоток є одним із головних показників, що визначають довговічність, надійність і безпечність експлуатації тягового електродвигуна.

Проаналізовано основні методи оцінювання температурного стану обмоток. Показано, що для практичного застосування можуть використовуватися прямі методи вимірювання температури за допомогою датчиків, непрямі методи на основі зміни електричних параметрів, а також модельні методи, що спираються на теплові схеми та розрахункові залежності.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

3 РОЗРАХУНОК ТЕМПЕРАТУРНОГО СТАНУ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА

3.1 Розрахунок необхідного електромагнітного моменту тягового електродвигуна

Метою розділу 3 є визначення основних електричних і теплових параметрів тягового електродвигуна, які необхідні для подальшого аналізу температурного стану обмоток та побудови моделі в середовищі Simulink. Оскільки тема роботи пов'язана з удосконаленням охолодження, основну увагу приділено струмовому навантаженню, втратам потужності та температурному режиму двигуна.

Для розрахунку приймаємо тяговий асинхронний електродвигун, який може застосовуватися у складі електропривода міського електротранспорту. Такий двигун працює у режимах пуску, розгону, руху з усталеною швидкістю, електричного гальмування та короткочасних перевантажень. Саме ці режими створюють підвищене теплове навантаження на обмотки.

Таблиця 3.1

Найменування параметра	Значення	Одиниця вимірювання
Номінальна потужність двигуна	75	кВт
Номінальна напруга живлення	380	В
Коефіцієнт корисної дії	0,90	—
Коефіцієнт потужності	0,86	—
Номінальна частота обертання	1500	об/хв
Кількість фаз	3	—
Опір фази обмотки статора при початковій температурі	0,08	Ом
Початкова температура обмотки	25	°С
Допустима температура ізоляції	140	°С
Температура навколишнього середовища	25	°С

Номінальна кутова швидкість двигуна визначається за частотою обертання:

$$\omega_n = (2\pi n_n)/60 = (2 \cdot 3,14 \cdot 1500)/60 = 157 \text{ рад/с}$$

Номінальний електромагнітний момент двигуна визначається за формулою:

$$M_n = P_n / \omega_n \quad (3.1)$$

де M_n — номінальний електромагнітний момент двигуна, Н·м; P_n — номінальна потужність двигуна, Вт; ω_n — номінальна кутова швидкість двигуна, рад/с.

Оскільки потужність у таблиці наведена у кВт, для розрахунку її переводимо у Вт:

$$P_n = 75 \cdot 1000 = 75000 \text{ Вт}$$

$$M_n = 75000 / 157 = 477,7 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Отже, номінальний електромагнітний момент тягового електродвигуна становить приблизно 478 Н·м.

Для тягових електродвигунів характерною є робота з короткочасними перевантаженнями під час пуску та розгону. Для подальшого аналізу приймаємо коефіцієнт перевантаження за моментом:

Максимальний момент двигуна у перевантажувальному режимі визначається:

$$M_{max} = k_p M_n$$

де M_{max} — максимальний момент двигуна в перевантажувальному режимі, Н·м; k_p — коефіцієнт перевантаження; M_n — номінальний момент двигуна.

$$M_{max} = 1,5 \cdot 477,7 = 716,6 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Таким чином, у короткочасному перевантажувальному режимі тяговий електродвигун може розвивати момент близько 717 Н·м. Такі режими є найбільш небезпечними з точки зору нагрівання обмоток, оскільки збільшення моменту супроводжується зростанням струму, а втрати в обмотках залежать від квадрата струму. Результати розрахунку зведено в таблицю 3.2.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

Таблиця 3.2 – Результати розрахунку моменту тягового електродвигуна

Найменування параметра	Значення	Одиниця вимірювання
Номінальна кутова швидкість	157	рад/с
Номінальна потужність	75000	Вт
Номінальний електромагнітний момент	477,7	Н·м
Коефіцієнт перевантаження	1,5	–
Максимальний момент у перевантажувальному режимі	716,6	Н·м

Отримані значення будуть використані у наступному підрозділі для визначення номінального струму, втрат у мідних обмотках і теплової потужності, що викликає нагрівання тягового електродвигуна.

Номінальні діючі значення фазної напруги та струму статора, рифазного двигуна:

$$I_n = P_n / (\sqrt{(3)} U_n \eta \cos \varphi) \quad (3.2)$$

де I_n – номінальний струм статора, А; P_n – номінальна потужність двигуна, Вт; U_n – лінійна напруга живлення, В; η – коефіцієнт корисної дії двигуна; $\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності.

Підставимо числові значення:

$$I_n = 75000 / (\sqrt{(3)} \cdot 380 \cdot 0,90 \cdot 0,86) = 147,4 \text{ А}$$

При з'єднанні обмоток статора зіркою фазна напруга становить

$$U_\phi = 380 / \sqrt{(3)} = 219,4 \text{ В}$$

Тоді пусковий струм:

$$I_n = 6,5 \cdot 147,4 = 958,1 \text{ А}$$

Амплітудне значення фазної напруги статора

$$I_m = \sqrt{(2)} \cdot 147,4 = 208,5 \text{ А}$$

Амплітудне значення потокозчеплення статора в режимі холостого ходу для $R_1 = 0$:

Отримані значення показують, що в пусковому режимі струм обмоток може істотно перевищувати номінальне значення. Оскільки втрати в обмотках пропорційні квадрату струму, саме пускові та перевантажувальні режими є найбільш небезпечними з точки зору теплового стану тягового електродвигуна. У наступному підрозділі на основі розрахованого струму буде визначено електричні втрати в обмотках двигуна.

3.2 Розрахунок електричних втрат у обмотках тягового електродвигуна

Основним джерелом нагрівання обмоток тягового електродвигуна є електричні втрати в провідниках. Ці втрати виникають під час проходження струму через активний опір обмоток статора. Для тягового двигуна вони мають особливе значення, оскільки у пускових, розгінних і перевантажувальних режимах струм може значно перевищувати номінальне значення.

Втрати потужності в обмотках статора визначаються за законом Джоуля–Ленца:

$$P_{Cu} = m I_n^2 R_0 \quad (33)$$

де P_{Cu} — втрати потужності в мідних обмотках статора, Вт; m — кількість фаз; I_n — номінальний струм статора, А; R_0 — активний опір фази обмотки статора при початковій температурі, Ом.

Підставимо числові значення:

$$P_{Cu} = 3 \cdot 147,4^2 \cdot 0,08 = 5214,7 \text{ Вт}$$

Отже, втрати в обмотках статора при номінальному навантаженні становлять приблизно 5,2 кВт.

Оскільки під час роботи двигуна температура обмоток підвищується, активний опір провідників також зростає. Для мідної обмотки залежність активного опору від температури можна описати формулою:

$$R_T = R_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (3.4)$$

де R_T — активний опір обмотки при температурі T , Ом; R_0 — активний опір обмотки при початковій температурі T_0 , Ом; α — температурний коефіцієнт

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

опору міді, $1/^{\circ}\text{C}$; T — поточна температура обмотки, $^{\circ}\text{C}$; T_0 — початкова температура обмотки, $^{\circ}\text{C}$. Для міді приймаємо: $\alpha = 0,004\ 1/^{\circ}\text{C}$

Для попередньої оцінки приймемо температуру обмотки у наявному режимі роботи $T=120^{\circ}\text{C}$. Тоді активний опір фази становитиме:

$$R_T = 0,08[1 + 0,004(120 - 25)] = 0,1104\ \text{Ом}$$

З урахуванням зростання активного опору втрати в обмотках при температурі 120°C визначаються:

$$P_{cu.T} = mI_n^2 R_T = 3 \cdot 147,4^2 \cdot 0,1104 = 7196,3\text{Вт}$$

Отже, при підвищенні температури обмоток до 120°C втрати в мідних обмотках збільшуються приблизно до 7,2 кВт. Це підтверджує наявність електротеплового зворотного зв'язку: нагрівання обмоток збільшує їх активний опір, а збільшення опору призводить до подальшого зростання втрат.

Для оцінки пускового режиму визначимо втрати в обмотках при пусковому струмі. Оскільки пусковий струм значно перевищує номінальний, відповідні втрати мають короткочасний, але дуже інтенсивний характер:

$$P_{cu.p} = mI_p^2 R_0 = 3 \cdot 958,1^2 \cdot 0,08 = 220304\text{Вт}$$

Отримане значення показує, що в момент пуску втрати в обмотках можуть досягати приблизно 220 кВт. Такий рівень втрат не є тривалим режимом, але він пояснює, чому часті пуски та розгони є небезпечними для температурного стану тягового електродвигуна.

Для подальших теплових розрахунків приймаємо розрахункову теплову потужність, що виділяється в обмотках у робочому режимі:

$$P_{th} = P_{cu.T} = 7196,3\text{Вт} \approx 7,2\text{кВт}$$

Результати розрахунку електричних втрат у обмотках наведено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Результати розрахунку електричних втрат у обмотках тягового електродвигуна

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

Найменування параметра	Значення	Одиниця вимірювання
Кількість фаз	3	—
Номінальний струм статора	147,4	А
Пусковий струм	958,1	А
Опір фази при початковій температурі	0,08	Ом
Температурний коефіцієнт опору міді	0,004	1/°C
Початкова температура обмотки	25	°C
Прийнята робоча температура обмотки	120	°C
Опір фази при температурі 120 °C	0,1104	Ом
Втрати в обмотках при початковій температурі	5214,7	Вт
Втрати в обмотках при температурі 120 °C	7196,3	Вт
Втрати в обмотках у пусковому режимі	220304	Вт
Розрахункова теплова потужність	7196,3	Вт

Таким чином, у номінальному робочому режимі з урахуванням нагрівання в обмотках тягового електродвигуна виділяється приблизно 7,2 кВт теплової потужності. У пусковому режимі втрати мають короткочасний, але значно більший характер, що підтверджує необхідність ефективного охолодження та моніторингу температури обмоток. Отримане значення P_{th} буде використано в наступному підрозділі для розрахунку температурного стану обмоток у наявній системі охолодження.

3.3 Розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення

Математична модель асинхронного тягового електродвигуна, яка надалі буде використана для моделювання, зручно подається через Т-подібну схему заміщення. Така схема дозволяє врахувати активний опір статора, індуктивний опір розсіювання статора, контур намагнічування, а також приведені параметри ротора. Каталожні параметри асинхронних двигунів часто подаються для Г-подібної схеми заміщення, тому для подальших розрахунків необхідно виконати перерахунок параметрів у Т-подібну схему. На рисунку 3.1 наведено Т-подібну схему заміщення асинхронного двигуна, а на рисунку 3.2 — Г-подібну схему заміщення.

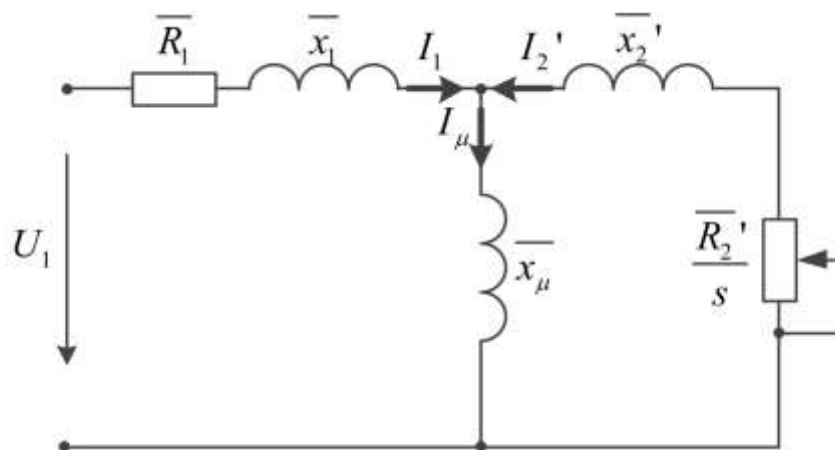


Рис. 3.1 – Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

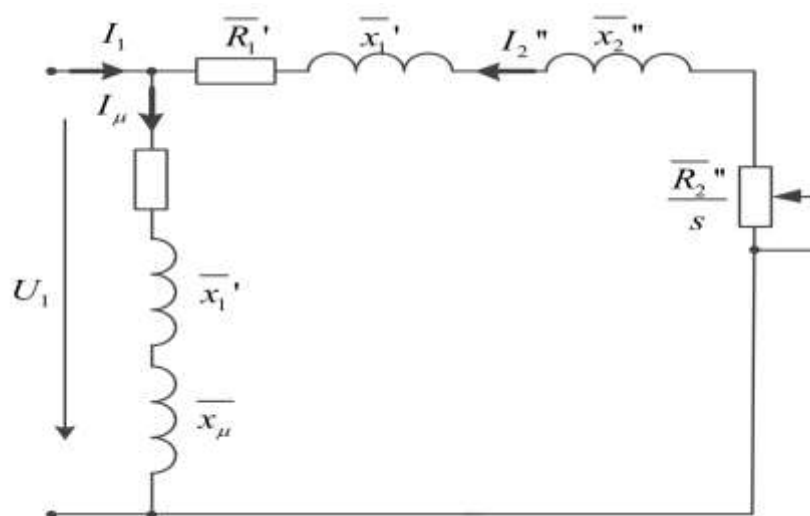


Рис. 3.2 – Г-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

Для розрахунку приймаємо такі параметри Г-подібної схеми заміщення у відносних одиницях.

Таблиця 3.4 – Початкові параметри Г-подібної схеми заміщення

Найменування параметра	Значення	Одиниця вимірювання
Активний опір статора	0,049	в. о.
Індуктивний опір розсіювання статора	0,092	в. о.
Приведений активний опір ротора	0,022	в. о.
Приведений індуктивний опір ротора	0,120	в. о.
Індуктивний опір контуру намагнічування	4,5	в. о.

Коефіцієнт перерахунку між Т-подібною та Г-подібною схемами заміщення визначається за формулою:

$$c_1 = \left(\bar{x}_\mu + \sqrt{\bar{x}_\mu^2 + 4\bar{x}'_{1\bar{x}_\mu}} \right) / (2\bar{x}_\mu) \quad (3.5)$$

де c_1 — коефіцієнт перерахунку; $\bar{x}^-$ — індуктивний опір контуру намагнічування у відносних одиницях; $\bar{x}^{-1}$ — індуктивний опір розсіювання статора у Г-подібній схемі.

Підставимо числові значення:

$$c_1 = \left(4,5 + \sqrt{4,5^2 + 4 \cdot 0,092 \cdot 4,5} \right) / (2 \cdot 4,5) = 1,02$$

Параметри Т-подібної схеми заміщення у відносних одиницях визначаються так:

$$\bar{x}_1 = \bar{x}'_1 / c_1 \quad (3.6)$$

Активний опір статора у Т-подібній схемі:

$$\bar{R}_1 = \bar{R}'_1 / c_1 = 0,049 / 1,02 = 0,048$$

Приведений індуктивний опір ротора:

$$\bar{x}'_2 = \bar{x}''_2 / c_1^2 \quad (3.7)$$

$$\bar{x}'_2 = 0,120 / 1,02^2 = 0,115$$

Приведений активний опір ротора:

$$\bar{R}'_2 = \bar{R}''_2 / c_1^2$$

$$\bar{R}'_2 = 0,022 / 1,02^2 = 0,021$$

Для переходу від відносних одиниць до абсолютних визначимо базовий опір двигуна:

$$Z_n = U_\phi / I_n \quad (3.8)$$

де Z_n — базовий опір двигуна, Ом; U_ϕ — фазна напруга статора, В; I_n — номінальний струм статора, А.

Підставимо числові значення:

$$Z_n = 219,4 / 147,4 = 1,490 \text{ Ом}$$

Абсолютне значення індуктивного опору розсіювання статора:

$$x_1 = \bar{x}_1 Z_n = 0,090 \cdot 1,49 = 0,1340 \text{ Ом}$$

Активний опір статора:

$$R_1 = \bar{R}_1 Z_n = 0,048 \cdot 1,49 = 0,07150 \text{ Ом}$$

Приведений індуктивний опір ротора:

$$x'_2 = \bar{x}'_2 Z_n = 0,115 \cdot 1,49 = 0,1720 \text{ Ом}$$

Приведений активний опір ротора:

$$R'_2 = \bar{R}'_2 Z_n = 0,021 \cdot 1,49 = 0,03150 \text{ Ом}$$

Індуктивний опір контуру намагнічування:

$$x_\mu = \bar{x}_\mu Z_n = 4,5 \cdot 1,49 = 6,700 \text{ Ом}$$

Індуктивності розсіювання статора і ротора визначаються через відповідні індуктивні опори:

$$L_{\sigma 1} = x_1 / \omega_0$$

де L_σ — індуктивність розсіювання статора, Гн; x_1 — індуктивний опір розсіювання статора, Ом; ω_0 — кутова частота напруги живлення, рад/с.

Для мережі частотою 50 Гц:

$$\omega_0 = 2\pi f = 314,16 \text{ рад/с} = 0,134 / 314,16 = 0,000427 \text{ Гн}$$

Індуктивність розсіювання ротора:

$$L_{\sigma 2} = x'_2 / \omega_0 = 0,172 / 314,16 = 0,000546 \text{ Гн}$$

Індуктивність контуру намагнічування:

$$L_\mu = x_\mu / \omega_0 = 6,70 / 314,16 = 0,0213 \text{ Гн}$$

Індуктивність статора:

$$L_1 = L_{\sigma 1} + L_\mu = 0,000546 + 0,0213 = 0,0219 \text{ Гн}$$

Результати розрахунку параметрів Т-подібної схеми заміщення наведено в таблиці 3.5.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

Таблиця 3.5 – Параметри Т-подібної схеми заміщення тягового асинхронного електродвигуна

Найменування параметра	Значення	Одиниця вимірювання	
Базовий опір двигуна	1,49	Ом	
Коефіцієнт перерахунку	1,02	—	
Активний опір статора	0,0715	Ом	
Індуктивний опір розсіювання статора	0,134	Ом	
Приведений активний опір ротора	0,0315	Ом	
Приведений індуктивний опір ротора	0,172	Ом	
Індуктивний опір контуру намагнічування	6,70	Ом	
Індуктивність розсіювання статора	0,000427	Гн	
Індуктивність розсіювання ротора	0,000546	Гн	
Індуктивність контуру намагнічування	0,0213		Гн
Повна індуктивність статора	0,0217		Гн
Повна індуктивність ротора	0,0219		Гн

Таким чином, у підрозділі виконано перерахунок параметрів Г-подібної схеми заміщення в Т-подібну схему та отримано основні електричні параметри тягового асинхронного електродвигуна. Надалі ці параметри можуть бути використані для побудови математичної моделі двигуна та моделювання його режимів роботи в середовищі Simulink. Для теплового розрахунку особливе значення має активний опір обмотки статора R_{1R_1R1} , оскільки саме він визначає втрати в обмотках і, відповідно, тепловиділення в тяговому електродвигуні.

Отримані параметри схеми заміщення характеризують електромагнітні властивості тягового асинхронного електродвигуна та можуть бути використані для побудови моделі в середовищі Simulink. Для подальших теплових розрахунків особливе значення має активний опір обмотки статора R_1 , оскільки саме він визначає величину електричних втрат і тепловиділення в обмотках двигуна.

3.3 Розрахунок температурного стану обмоток.

На основі отриманих значень втрат у мідних обмотках визначимо температурний стан тягового електродвигуна. Відповідно до розглянутих у розділі 2 теоретичних положень, для інженерної оцінки температурного режиму можна використати спрощену теплову модель з одним тепловим опором.

Тоді перевищення температури обмоток над температурою навколишнього середовища становить:

$$\Delta T = P_{th} R_{th} \quad (3.9)$$

де ΔT — перевищення температури обмоток над температурою навколишнього середовища, °C; P_{th} — теплова потужність, що виділяється в обмотках, Вт; R_{th} — тепловий опір системи охолодження, °C/Вт.

$$\Delta T = 7196,3 \cdot 0,015 = 107,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Абсолютна температура обмоток:

$$T_{обм} = 25 + 107,9 = 132,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Температурний запас ізоляції:

$$\Delta T_3 = T_{доп} - T_{обм} \quad (3.10)$$

$$\Delta T_3 = 140 - 132,9 = 7,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Отримане значення температури обмоток становить 132,9 °C, що наближається до гранично допустимої температури ізоляції класу F. Температурний запас складає лише 7,1 °C, тому при підвищенні навантаження, збільшенні температури навколишнього середовища або погіршенні умов охолодження можливий перегрів обмоток. Це підтверджує доцільність удосконалення системи охолодження та впровадження моніторингу температури.

3.4 Розрахунок необхідної інтенсивності охолодження

Результати попереднього підрозділу показали, що температура обмоток тягового електродвигуна в наявному режимі роботи наближається до допустимої межі для ізоляції класу F. Для підвищення надійності роботи

електродвигуна пропонується удосконалити систему охолодження шляхом підвищення інтенсивності повітряного обдування та впровадження автоматичного керування вентиляцією за сигналами температурних датчиків.

Ефективність системи охолодження визначається тепловим опором між обмотками двигуна та навколишнім середовищем. Чим меншим є тепловий опір, тим нижчою буде температура обмоток за однакових втрат потужності.

Після удосконалення системи охолодження приймаємо зменшення теплового опору на 30 %.

Нове значення теплового опору визначається:

$$R_{th2} = 0,7 R_{th1} \quad (3.11)$$

$$R_{th2} = 0,7 \cdot 0,015 = 0,0105^{\circ}\text{C 1/Вт}$$

Перевищення температури обмоток над температурою навколишнього середовища після удосконалення охолодження становитиме:

$$\Delta T_2 = P_{th} R_{th2} \quad (3.12)$$

$$\Delta T_2 = 7196,3 \cdot 0,0105 = 75,6^{\circ}\text{C}$$

Отримане значення показує, що покращення вентиляції дозволяє суттєво зменшити перевищення температури обмоток над температурою навколишнього середовища.

Для оцінки ефективності охолодження визначимо коефіцієнт зниження температури:

$$k_T = ((\Delta T_1 - \Delta T_2) / \Delta T_1) \cdot 100 \quad (3.13)$$

Підставимо числові значення:

$$k_T = ((107,9 - 75,6) / 107,9) \cdot 100 = 29,9\%$$

Таким чином, запропоноване удосконалення системи охолодження забезпечує зменшення перевищення температури обмоток майже на 30 %, що створює необхідний резерв для роботи двигуна в режимах короткочасних перевантажень.

3.5 Оцінка температурного стану обмоток після удосконалення охолодження

Після удосконалення системи охолодження тепловий опір між обмотками двигуна та навколишнім середовищем зменшується. Це дозволяє знизити температуру обмоток без зміни електричних параметрів самого тягового електродвигуна. Такий підхід є доцільним, оскільки основна мета роботи полягає не в заміні двигуна, а в покращенні умов його охолодження та контролю температурного стану.

Температура обмоток після удосконалення охолодження визначається за формулою:

$$T_{обм2} = T_c + \Delta T_2 \quad (3.14)$$

де $T_{обм}$ — температура обмоток після удосконалення охолодження, °C;
 T_c — температура навколишнього середовища, °C; ΔT_2 — перевищення температури обмоток після удосконалення охолодження, °C.

Підставимо числові значення:

$$T_{обм2} = 25 + 75,6 = 100,6^\circ\text{C}$$

Температурний запас ізоляції після удосконалення охолодження визначається:

$$\Delta T_{з2} = T_{доп} - T_{обм2} \quad (3.15)$$

$$\Delta T_{з2} = 140 - 100,6 = 39,4^\circ\text{C}$$

Для порівняння визначимо зменшення температури обмоток після удосконалення системи охолодження:

$$\Delta T_{зн} = T_{обм1} - T_{обм2} \quad (3.16)$$

$$\Delta T_{зн} = 132,9 - 100,6 = 32,3^\circ\text{C}$$

Отримані результати показують, що після удосконалення системи охолодження температура обмоток зменшується з $132,9^\circ\text{C}$ до $100,6^\circ\text{C}$. Температурний запас ізоляції збільшується з $7,1^\circ\text{C}$ до $39,4^\circ\text{C}$, що суттєво підвищує надійність роботи тягового електродвигуна.

Результати порівняння температурного стану обмоток до та після удосконалення охолодження наведено в таблиці 3.6.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

Таблиця 3.6 – Порівняння температурного стану обмоток тягового електродвигуна

Найменування параметра	До удоск.	Після удоск.
Теплова потужність в обмотках	7196,3	7196,3
Тепловий опір системи охолодження	0,015	0,0105
Перевищення температури обмоток	107,9	75,6
Температура навколишнього середовища	25	25
Температура обмоток	132,9	100,6
Допустима температура ізоляції	140	140
Температурний запас ізоляції	7,1	39,4

За результатами розрахунку встановлено, що удосконалення системи охолодження дозволяє знизити температуру обмоток на 32,3°C. При цьому температура обмоток після удосконалення становить 100,6°C, що значно нижче допустимого значення для прийнятого класу ізоляції. Це створює достатній температурний запас і зменшує ризик прискореного старіння ізоляції.

Для підвищення надійності роботи тягового електродвигуна доцільно поєднувати удосконалене охолодження з моніторингом температури обмоток. У такому разі система контролю може формувати попереджувальний сигнал при досягненні температури 110°C та аварійний сигнал при наближенні до 130°C. Це дозволяє своєчасно реагувати на погіршення умов охолодження або перевантаження двигуна.

Висновки до розділу 3

У розділі 3 виконано розрахунок основних параметрів тягового асинхронного електродвигуна, що впливають на його температурний стан. Визначено номінальну кутову швидкість, електромагнітний момент, фазну напругу, номінальний і пусковий струми статора.

Виконано спрощений розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення асинхронного двигуна, що дозволяє оцінити електричні параметри

обмоток. Особливе значення для подальшого теплового аналізу має активний опір статора, оскільки саме він визначає величину втрат у мідних обмотках.

Розраховано електричні втрати в обмотках двигуна. Встановлено, що при номінальному режимі з урахуванням нагрівання в обмотках виділяється приблизно 7,2 кВт теплової потужності. У пусковому режимі втрати мають значно більший, але короткочасний характер.

За результатами теплового розрахунку встановлено, що при наявній системі охолодження температура обмоток може досягати 132,9°C, а температурний запас ізоляції становить лише 7,1°C. Це свідчить про недостатній резерв теплової стійкості двигуна.

Після удосконалення системи охолодження тепловий опір зменшується з 0,015 до 0,0105 °C/Вт, а температура обмоток знижується до 100,6°C. Температурний запас ізоляції збільшується до 39,4°C, що підтверджує ефективність запропонованого рішення.

Отже, удосконалення системи охолодження разом із моніторингом температури обмоток дозволяє підвищити надійність роботи тягового електродвигуна, знизити ризик перегріву та створити умови для більш стабільної експлуатації в пускових і перевантажувальних режимах.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

4 МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА З УРАХУВАННЯМ ТЕМПЕРАТУРНОГО СТАНУ ОБМОТОК

4.1 Створення моделі тягового електродвигуна у середовищі Simulink

Моделювання дозволяє перевірити характер перехідних процесів і показати, як змінюється тепловий стан обмоток при різній ефективності охолодження. Для цього модель доповнюється тепловою підсистемою, яка відображає нагрівання обмоток і роботу температурного моніторингу.

Для створення моделі використовується структура асинхронного електропривода з перетворювачем частоти. Така структура є універсальною і може застосовуватись не лише в тягових електроприводах, а й у приводах промислових механізмів харчової галузі: вентиляторів, насосів, компресорів, транспортерів, мішалок та іншого обладнання, де використовуються асинхронні двигуни з частотним керуванням.

Основою моделі є асинхронний двигун, силовий перетворювач, блок керування, вимірювальні блоки та осцилографи для виведення результатів. Для теми даної роботи модель додатково доповнено блоком визначення температурного стану обмоток і блоком контролю граничних температур.

Для дослідження режимів роботи тягового асинхронного електродвигуна створено модель електропривода в середовищі Matlab Simulink. Модель дозволяє аналізувати електромеханічні процеси під час пуску та виходу двигуна на усталений режим роботи, а також отримувати осцилограми струму статора, електромагнітного моменту та кутової швидкості ротора.

При побудові моделі використано стандартні бібліотеки Simscape Electrical, що містять готові блоки асинхронної машини, інвертора напруги та засобів вимірювання електричних параметрів. Такий підхід дає можливість отримати результати моделювання, наближені до реальних режимів роботи

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

асинхронного електропривода. Структурна схема розробленої моделі наведена на рисунку 4.1.

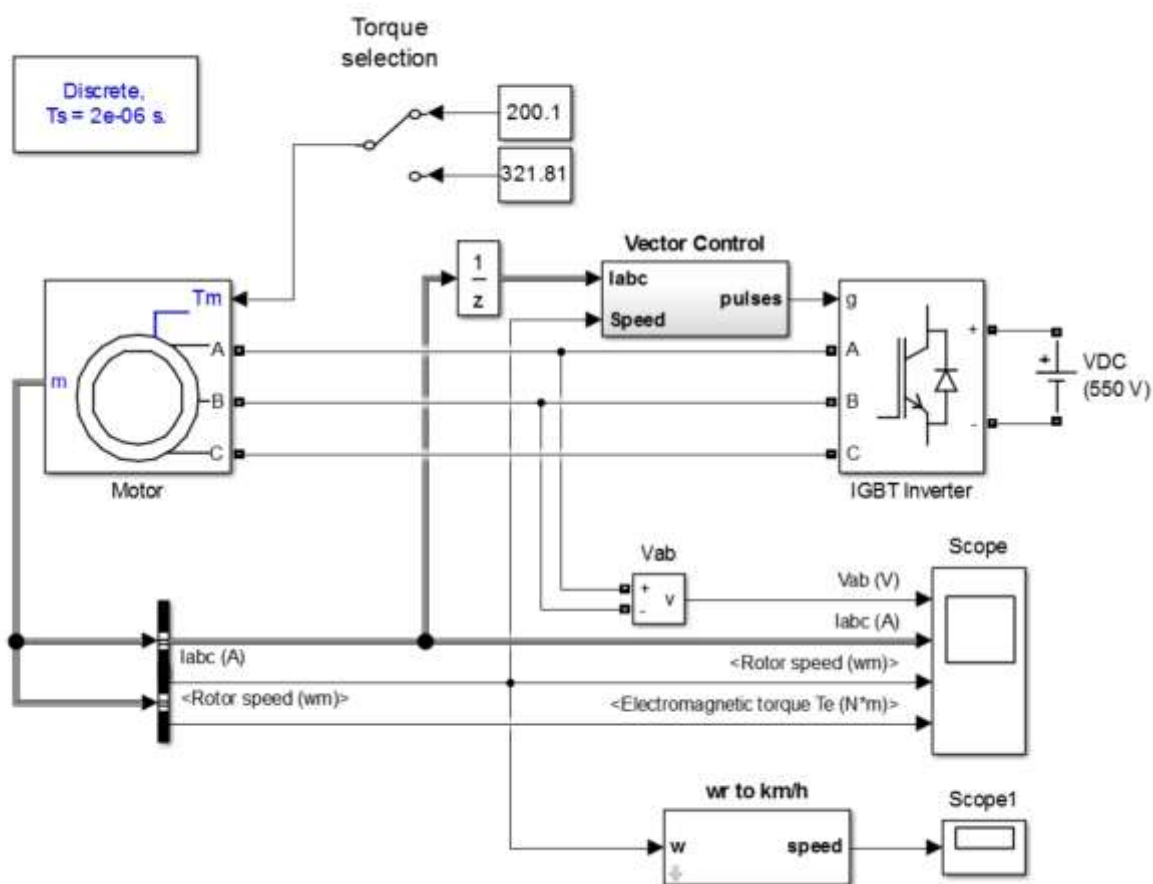


Рис. 4.1 – Модель тягового асинхронного електродвигуна у середовищі Matlab Simulink

Модель складається з асинхронного електродвигуна Motor, автономного інвертора напруги IGBT Inverter, блока керування Vector Control, джерела постійної напруги та вимірювальних блоків.

Блок Motor реалізує математичну модель асинхронного двигуна та формує сигнали струмів статора, кутової швидкості ротора і електромагнітного моменту. Для живлення двигуна використовується інвертор напруги IGBT Inverter, який перетворює постійну напругу джерела живлення у трифазну напругу необхідної частоти та амплітуди.

Керування інвертором здійснюється блоком Vector Control, який формує сигнали керування силовими ключами інвертора. Завдяки цьому забезпечується плавний пуск двигуна та підтримання заданого режиму роботи.

Для контролю параметрів електропривода в моделі передбачені вимірювання фазної напруги, струму статора, електромагнітного моменту та швидкості ротора. Отримані сигнали передаються на блоки **Scope**, де формуються відповідні осцилограми.

Розроблена модель є основою для подальшого дослідження перехідних процесів у двигуні та аналізу теплового навантаження обмоток. На наступному етапі виконано моделювання режимів роботи двигуна та отримано графіки основних електромеханічних параметрів.

4.2 Моделювання режимів роботи тягового електродвигуна

Після створення математичної моделі у середовищі Matlab Simulink виконано моделювання режимів роботи тягового електродвигуна. У процесі моделювання досліджувалися зміни електромагнітного моменту, швидкості електропривода та струмів статора під час перехідних процесів.

Результати моделювання дозволяють оцінити характер роботи двигуна та визначити режими, при яких виникають найбільші електричні втрати і, відповідно, найбільше нагрівання обмоток.

На першому етапі було досліджено зміну електромагнітного моменту двигуна під час перехідних процесів. Отримана осцилограма наведена на рисунку 4.2.

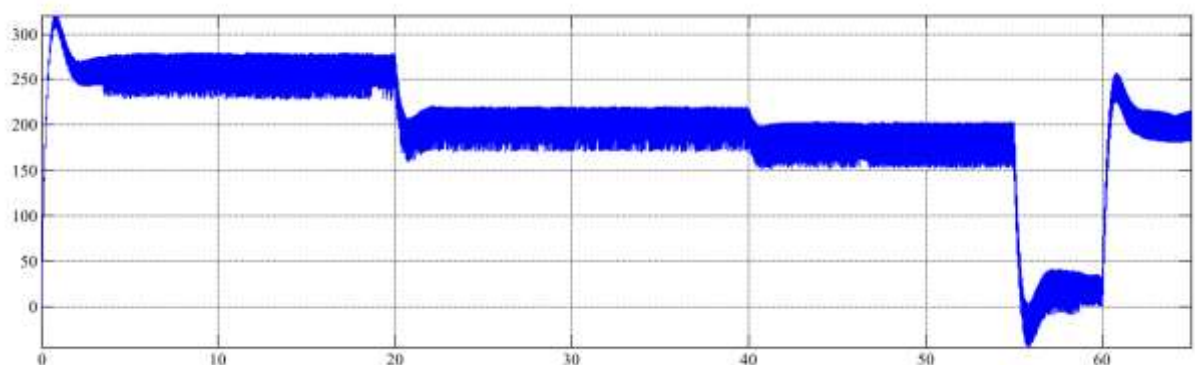


Рис. 4.2 Осцилограма електромагнітного моменту тягового електродвигуна

З аналізу графіка видно, що в початковий момент часу спостерігається короткочасний кидок електромагнітного моменту, необхідний для розгону

ротора двигуна. Після завершення перехідного процесу момент стабілізується та підтримується на рівні, що відповідає навантаженню електропривода.

У моменти зміни режимів роботи відбуваються відповідні зміни електромагнітного моменту, після чого система знову переходить до усталеного режиму. Отримані результати свідчать про достатню стійкість роботи електропривода та відсутність тривалих коливальних процесів.

Електромагнітний момент безпосередньо впливає на величину струмів статора, а отже і на тепловиділення в обмотках двигуна.

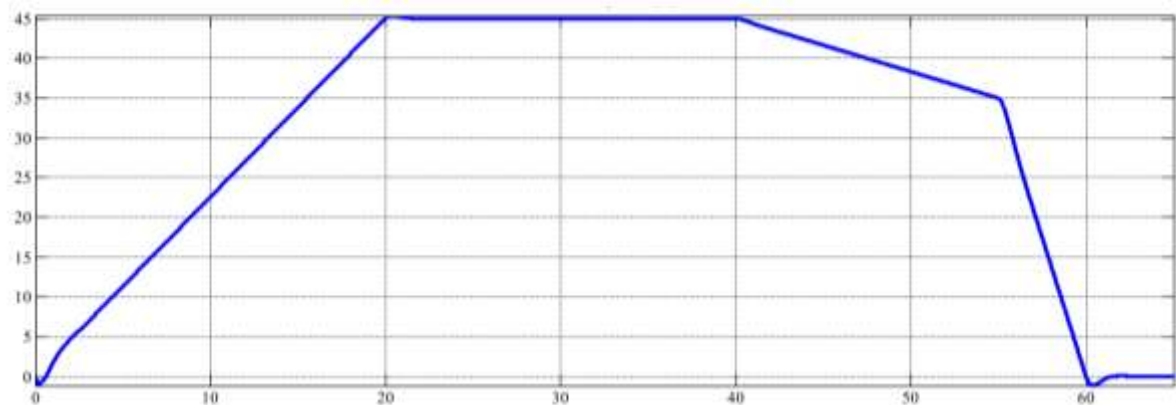


Рис. 4.3 – Осцилограма тягового електродвигуна

З рисунка видно, що швидкість двигуна плавно зростає від нульового значення до заданого режиму роботи. Після завершення розгону підтримується усталене значення швидкості. При зміні навантаження або режиму керування спостерігається відповідна зміна швидкості, що підтверджує працездатність системи керування електроприводом.

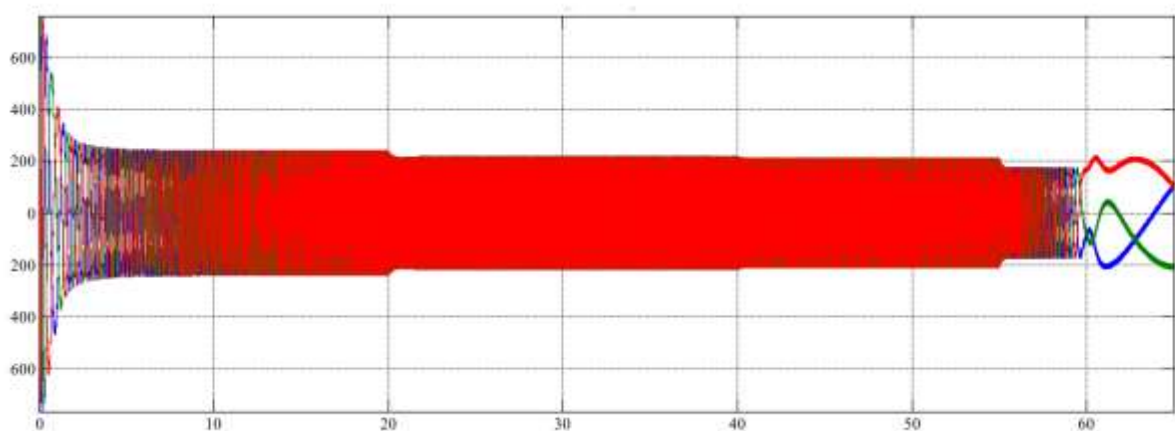


Рис.4.4 – Осцилограма струму статора

Аналіз осцилограм показує, що найбільші значення струму виникають у момент пуску двигуна та під час переходу між режимами роботи. Після завершення перехідних процесів струми набувають усталеного синусоїдального характеру.

Саме струми статора визначають величину електричних втрат у обмотках двигуна. Зі збільшенням струму зростає кількість теплоти, що виділяється в обмотках, внаслідок чого підвищується їх температура. Тому для оцінювання ефективності запропонованого удосконалення системи охолодження необхідно дослідити температурний стан обмоток при різних режимах роботи двигуна.

4.3 Моделювання теплового навантаження та роботи системи моніторингу температури

Під час роботи асинхронного електродвигуна частина споживаної електричної енергії перетворюється у теплову. Основними джерелами нагрівання є втрати в обмотках статора, магнітопроводі та механічні втрати у підшипникових вузлах. При збільшенні навантаження температура обмоток зростає, що може призводити до прискореного старіння ізоляції та зниження надійності електропривода.

Для контролю теплового стану двигуна в роботі передбачено використання системи моніторингу температури обмоток. Інформація від температурних датчиків може передаватися до системи керування електроприводом для контролю режимів роботи та своєчасного виявлення перегріву.

Процес нагрівання електродвигуна має інерційний характер і описується експоненціальною залежністю. Після подачі навантаження температура поступово зростає до усталеного значення, а після зменшення навантаження або вимкнення двигуна відбувається охолодження.

У першому випадку температура обмоток зростає до значення, близького до гранично допустимого для прийнятого класу ізоляції. У другому

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

випадку за рахунок підвищення інтенсивності охолодження температура обмоток знижується, а температурний запас ізоляції збільшується. На рисунку 4.6 наведено графік зміни температури обмоток електродвигуна в процесі роботи. Початкова температура відповідає температурі навколишнього середовища та становить близько 25 °С. Під час роботи двигуна температура поступово підвищується до 75 °С, після чого стабілізується. Після зменшення навантаження температура знижується внаслідок роботи системи охолодження.

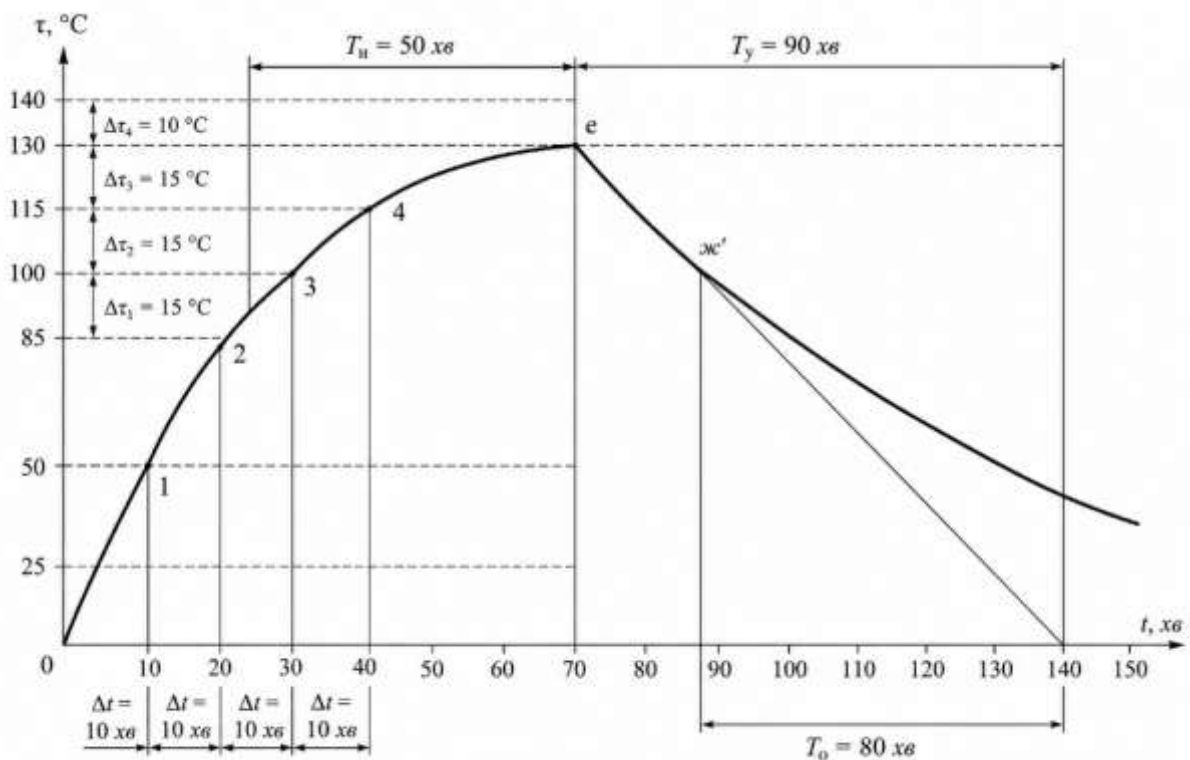


Рис. 4.5 – Графік зміни температури обмоток при наявній системі охолодження

Аналіз отриманої залежності показує, що максимальна температура обмоток не перевищує допустимих значень для ізоляції класу F, яка допускає тривалу роботу при температурах до 155 °С. Отримані результати підтверджують ефективність запропонованої системи охолодження та можливість застосування системи моніторингу температури для підвищення

надійності роботи електроприводів технологічного обладнання харчових виробництв.

Використання температурного контролю дозволяє своєчасно виявляти перевантаження, запобігати аварійним режимам роботи та забезпечувати підтримання безпечного теплового режиму електродвигуна протягом усього терміну експлуатації.

З графіка видно, що при наявній системі охолодження температура обмоток поступово зростає від температури навколишнього середовища до усталеного значення. У сталому режимі температура наближається до $132,9^{\circ}\text{C}$. Це значення є нижчим за допустиму температуру ізоляції 140°C , однак температурний запас становить лише $7,1^{\circ}\text{C}$. Такий режим не можна вважати достатньо надійним, оскільки при підвищенні навантаження або погіршенні умов охолодження можливий перегрів обмоток.

Після удосконалення системи охолодження температура обмоток зростає повільніше і виходить на нижче усталене значення. За результатами моделювання температура обмоток становить приблизно $100,6^{\circ}\text{C}$. Це свідчить про суттєве покращення теплового режиму двигуна та збільшення температурного запасу ізоляції. Порівняння результатів моделювання наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Порівняння температурного стану обмоток за результатами моделювання

Параметр	До удосконалення	Після удосконалення
Температура навколишнього середовища	25	25
Усталена температура обмоток	132,9	100,6
Допустима температура ізоляції	140	140
Температурний запас	7,1	39,4
Характер теплового режиму	близький до граничного	нормальний

Після удосконалення охолодження температура обмоток не досягає попереджувального рівня. У цьому випадку система моніторингу перебуває в нормальному режимі, а аварійний сигнал не формується. Результати роботи температурного контролю наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Стан системи температурного моніторингу

Режим роботи	Температура обмоток, °C	Попередження 110 °C	Аварія 130 °C
Наявна система охолодження	132,9	спрацьовує	спрацьовує / наближення до аварії
Удосконалена система охолодження	100,6	не спрацьовує	не спрацьовує

Для оцінки ефективності запропонованого удосконалення було виконано моделювання теплового режиму тягового електродвигуна. Як навантажувальний вплив використовувалась ступінчаста зміна моменту навантаження, що відповідає різним режимам роботи електропривода. У процесі моделювання визначалась зміна температури обмоток статора залежно від часу та рівня навантаження.

На рисунку 4.6 наведено результати моделювання процесів нагрівання та охолодження двигуна. Синя крива відображає зміну відносного навантаження, а червона – відповідну температуру обмоток статора. Отримані результати дозволяють оцінити швидкість нагрівання двигуна під час роботи та ефективність відведення тепла після зменшення навантаження.

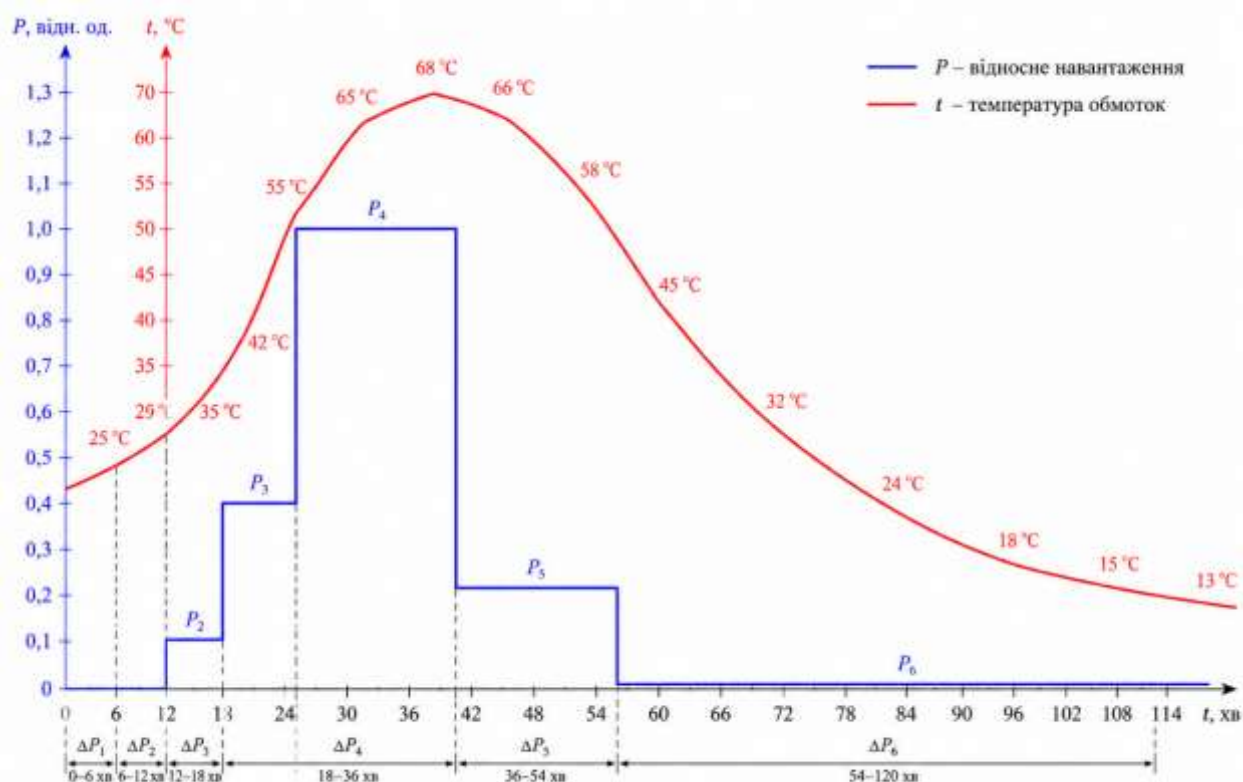


Рис. 4.6 – Результати моделювання теплового навантаження та зміни температури обмоток електродвигуна

Аналіз отриманих результатів показує, що зі збільшенням навантаження температура обмоток поступово підвищується від 25 °С до максимального значення близько 68 °С. Після зменшення навантаження спостерігається плавне охолодження двигуна, що відповідає характерним тепловим процесам у реальних електричних машинах.

Максимальна температура не перевищує допустимих значень для ізоляції обмоток, що підтверджує працездатність запропонованої системи охолодження. Введення безперервного контролю температури забезпечує можливість своєчасного виявлення небезпечних режимів роботи та формування сигналів попередження при наблизненні температури до граничних значень.

Отримані результати підтверджують доцільність використання системи моніторингу температури обмоток у складі електроприводів, що працюють у

тривалих та змінних режимах навантаження, зокрема на технологічному обладнанні підприємств харчової промисловості.

Висновки до розділу 4

У розділі виконано моделювання режимів роботи тягового електродвигуна з урахуванням температурного стану його обмоток. Для дослідження використано математичну модель асинхронного двигуна, реалізовану у середовищі MATLAB Simulink із застосуванням стандартних блоків бібліотеки Simscape Electrical.

Розроблена модель дозволила відтворити процеси пуску, розгону, роботи в усталеному режимі та зупинки електродвигуна. За результатами моделювання отримано осцилограми електромагнітного моменту, кутової швидкості ротора та фазних струмів статора. Аналіз графіків показав, що перехідні процеси мають стійкий характер, а параметри двигуна не перевищують допустимих значень.

Також виконано моделювання теплового навантаження обмоток електродвигуна. Встановлено закономірності зміни температури під час нагрівання та охолодження двигуна при зміні режимів роботи. Отримані результати підтвердили, що застосування удосконаленої системи охолодження забезпечує підтримання температури обмоток у допустимих межах та знижує ризик перегріву ізоляції.

Моделювання роботи системи моніторингу температури показало можливість своєчасного контролю теплового стану електродвигуна та виявлення небезпечних режимів експлуатації. Це сприяє підвищенню надійності роботи електропривода, збільшенню ресурсу ізоляції обмоток і зменшенню ймовірності аварійних відмов.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

5.1 Техніко-економічне обґрунтування впровадження удосконаленої системи охолодження та моніторингу температур обмоток

У даній дипломній роботі запропоновано удосконалення системи охолодження тягового електродвигуна та впровадження системи моніторингу температур обмоток. Технічна доцільність такого рішення була підтверджена в попередніх розділах, де встановлено, що зниження температури обмоток дозволяє покращити тепловий режим двигуна, підвищити температурний запас та зменшити ризик перегріву ізоляції. Економічна доцільність упровадження визначається тим, що зменшення нагрівання обмоток сприяє зниженню частоти ремонтів, збільшенню міжремонтного періоду та зменшенню експлуатаційних витрат.

Для тягового електродвигуна температура обмоток є одним із головних факторів, що впливають на довговічність ізоляції. При підвищеному нагріванні ізоляційні матеріали швидше старіють, внаслідок чого погіршується електрична міцність обмоток і підвищується ймовірність виникнення пошкоджень. Це призводить до необхідності більш частого технічного обслуговування, поточного ремонту або навіть капітального ремонту двигуна. Отже, у базовому варіанті, коли охолодження є менш ефективним, витрати на підтримання працездатності двигуна є вищими.

У новому варіанті, після удосконалення системи охолодження, температура обмоток знижується, а тепловий режим двигуна стає більш сприятливим. Це дозволяє зменшити термічне навантаження на ізоляцію, знизити інтенсивність її старіння та підвищити надійність роботи тягового електродвигуна. Додаткове впровадження системи моніторингу температур обмоток дає можливість своєчасно виявляти небезпечне підвищення температури, формувати попереджувальні сигнали та запобігати аварійним режимам. Таким чином, технічний ефект від запропонованого рішення безпосередньо переходить в економічний.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

Основний економічний ефект у даному випадку досягається не стільки за рахунок зменшення споживання електроенергії, скільки за рахунок зниження витрат на ремонти та обслуговування двигуна. Якщо обмотки працюють у більш сприятливому температурному режимі, двигун рідше потребує відновлення ізоляції, перемотування або заміни окремих вузлів, пов'язаних з наслідками перегріву. Крім цього, зменшується ймовірність вимушених простоїв обладнання, які також супроводжуються економічними втратами.

Для техніко-економічного порівняння далі розглядаються два варіанти. Перший варіант є базовим і відповідає роботі тягового електродвигуна без удосконаленого охолодження та без повноцінного моніторингу температурного стану обмоток. Другий варіант є новим і передбачає використання удосконаленої системи охолодження разом із системою контролю температури обмоток. Порівняння цих варіантів дозволяє визначити одноразові витрати на впровадження, зміну поточних експлуатаційних витрат, річний економічний ефект і строк окупності запропонованого технічного рішення.

До одноразових витрат нового варіанта належать витрати на придбання та монтаж додаткових елементів системи охолодження, температурних датчиків, приладів контролю, засобів сигналізації та допоміжних матеріалів. До експлуатаційних витрат належать витрати на технічне обслуговування, ремонт, заміну елементів системи контролю та витрати, пов'язані з підтриманням працездатності тягового електродвигуна. При цьому очікується, що за рахунок зменшення перегріву обмоток річні витрати на ремонт двигуна в новому варіанті будуть нижчими, ніж у базовому.

Отже, техніко-економічне обґрунтування впровадження удосконаленої системи охолодження та моніторингу температур обмоток полягає в тому, що додаткові одноразові витрати на її реалізацію компенсуються зменшенням експлуатаційних витрат у подальшій роботі. Зниження температури обмоток

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

покращує тепловий стан двигуна, підвищує його надійність і зменшує потребу в ремонтах. Саме це створює економічну основу для впровадження запропонованого технічного рішення.

5.2 Визначення одноразових витрат на впровадження

Для спрощеного економічного розрахунку одноразові витрати на впровадження удосконаленої системи охолодження та моніторингу температур обмоток приймаються за укрупненими показниками. До їх складу включаємо витрати на придбання основних елементів системи контролю температури, допоміжних матеріалів, монтаж і налагодження. У даному підрозділі використовуються орієнтовні розрахункові значення, достатні для техніко-економічного обґрунтування бакалаврського диплома

Таблиця 5.1 – Вихідні дані для визначення одноразових витрат

Найменування витрат	Кількість	Ціна за одиницю, грн	Сума, грн
Датчик температури Pt100	4	850	3400
Комплект РТС-термісторів	1	1200	1200
Модуль вимірювання / контролер RTD	1	6500	6500
Термісторне реле захисту	1	2800	2800
Кабелі, клеми, кріплення, допоміжні матеріали	1	2000	2000
Монтаж системи	1	3500	3500
Налагодження та перевірка	1	1500	1500

Вартість обладнання визначається за формулою:

$$K_{\text{(обл)}} = \sum(C_i \cdot n_i) \quad (5.1)$$

де C_i — ціна одиниці обладнання, грн; n_i — кількість одиниць.

Підставляємо числові значення:

$$K_{(\text{обл})} = 4 \cdot 850 + 1 \cdot 1200 + 1 \cdot 6500 + 1 \cdot 2800 + 1 \cdot 2000 = 15900$$

Отже, загальна вартість обладнання становить 15900 грн.

Загальні одноразові витрати на впровадження системи визначаються за формулою:

$$K_{(\text{вп})} = K_{(\text{обл})} + K_{(\text{мон})} + K_{(\text{нал})} \quad (5.2)$$

де $K_{(\text{мон})}$ — витрати на монтаж, грн; $K_{(\text{нал})}$ — витрати на налагодження, грн.

Підставляємо числові значення:

$$K_{(\text{вп})} = 15900 + 3500 + 1500 = 20900 \text{ грн}$$

Отже, загальні одноразові витрати на впровадження удосконаленої системи охолодження та моніторингу температур обмоток становлять 20900 грн.

Таким чином, для реалізації запропонованого технічного рішення необхідні відносно невеликі капітальні вкладення. У подальшому ці витрати мають бути порівняні зі зменшенням експлуатаційних витрат за рахунок рідшого ремонту тягового електродвигуна.

5.3 Розрахунок експлуатаційних витрат для базового і нового варіантів.

Експлуатаційні витрати для базового і нового варіантів визначаються з урахуванням того, що в базовому варіанті тяговий електродвигун працює з більшим нагріванням обмоток, тому потребує більш частого ремонту. У новому варіанті, після удосконалення охолодження та впровадження системи моніторингу температури, тепловий режим обмоток покращується, унаслідок чого міжремонтний період збільшується, а витрати на ремонт зменшуються.

Для спрощеного економічного розрахунку приймаємо, що річні експлуатаційні витрати складаються з витрат на поточний ремонт і технічне обслуговування.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

Таблиця 5.2 – Вихідні дані для розрахунку експлуатаційних витрат

Стаття витрат	Базовий варіант, грн/рік	Новий варіант, грн/рік
Витрати на ремонт двигуна	32000	18000
Витрати на технічне обслуговування	6000	7000
Разом	38000	25000

Річні експлуатаційні витрати визначаються за формулою:

$$C_{\text{(експ)}} = C_{\text{(рем)}} + C_{\text{(обсл)}} \quad (5.3)$$

де $C_{\text{(рем)}}$ — річні витрати на ремонт, грн/рік; $C_{\text{(обсл)}}$ — річні витрати на технічне обслуговування, грн/рік.

Розрахунок для базового варіанта

$$C_{\text{(експ.б)}} = C_{\text{(рем.б)}} + C_{\text{(обсл.б)}} \quad (5.4)$$

Підставляємо числові значення:

$$C_{\text{(експ.б)}} = 32000 + 6000 = 38000 \text{ грн/рік}$$

Отже, річні експлуатаційні витрати для базового варіанта становлять 38000 грн/рік.

Розрахунок для нового варіанта

$$C_{\text{(експ.н)}} = C_{\text{(рем.н)}} + C_{\text{(обсл.н)}} = 18000 + 7000 = 25000 \text{ грн/рік}$$

Визначення зниження експлуатаційних витрат

Річне зменшення експлуатаційних витрат визначається за формулою:

$$\begin{aligned} \Delta C &= C_{\text{(експ.б)}} - C_{\text{(експ.н)}} = 38000 \text{ грн/рік} - 25000 \text{ грн/рік} \\ &= 13000 \text{ грн/рік} \end{aligned}$$

Отже, у результаті впровадження удосконаленої системи охолодження та моніторингу температур обмоток річне зниження експлуатаційних витрат становить 13000 грн/рік.

Таким чином, виконаний розрахунок показав, що новий варіант є економічно вигіднішим порівняно з базовим. Основний економічний ефект

досягається за рахунок зменшення витрат на ремонт тягового електродвигуна, оскільки зниження температури обмоток зменшує інтенсивність старіння ізоляції та дозволяє рідше виконувати ремонтні роботи.

5.4 Розрахунок економічної ефективності та строку окупності

Після визначення одноразових витрат на впровадження та річних експлуатаційних витрат для базового і нового варіантів виконується розрахунок економічної ефективності запропонованого технічного рішення. У даному випадку економічний ефект досягається за рахунок зменшення витрат на ремонт і обслуговування тягового електродвигуна, оскільки після удосконалення охолодження обмотки нагріваються менше, а отже, ізоляція старіє повільніше і двигун потребує ремонту рідше.

Таблиця 5.3 – Вихідні дані для розрахунку економічної ефективності

Найменування показника	Позначення	Значення	Одиниця
Одноразові витрати на впровадження	$K_{(вп)}$	20900	грн
Річні експлуатаційні витрати базового варіанта	$C_{(експ.б)}$	38000	грн/рік
Річні експлуатаційні витрати нового варіанта	$C_{(експ.н)}$	25000	грн/рік
Річне зниження експлуатаційних витрат	ΔC	13000	грн/рік

Річний економічний ефект визначається за формулою:

$$E_{(річ)} = C_{(експ.б)} - C_{(експ.н)} = 38000 - 25000 = 13000 \text{ грн/рік}$$

Отже, річний економічний ефект від упровадження удосконаленої системи охолодження та моніторингу температур обмоток становить 13000 грн/рік.

Коефіцієнт економічної ефективності визначається за формулою:

$$E = \frac{n}{(E_{(річ)})(K_{(вп)})} \quad (5.5)$$

Підставляємо числові значення:

$$E = \frac{12}{(13000)(20900)} = 0,62 \text{ 1/рік}$$

Отже, коефіцієнт економічної ефективності становить 0,62 1/рік.

Строк окупності визначається за формулою:

$$T_{(ок)} = \frac{1}{(K_{(вп)})(E_{(річ)})} \quad (5.6)$$

Підставляємо числові значення:

$$T_{(ок)} = \frac{1}{(20900)(13000)} = 1,61 \text{ року}$$

Отже, строк окупності впровадження запропонованого технічного рішення становить 1,61 року.

Таким чином, виконаний розрахунок показав, що впровадження удосконаленої системи охолодження та моніторингу температур обмоток є економічно доцільним. Незважаючи на наявність одноразових витрат на встановлення системи, вони компенсуються за рахунок зниження експлуатаційних витрат протягом порівняно короткого часу. Основний економічний ефект досягається внаслідок зменшення частоти ремонтів тягового електродвигуна, оскільки зниження температури обмоток покращує тепловий стан ізоляції та підвищує надійність роботи двигуна.

Висновок. Розрахунок показав, що зменшення нагрівання обмоток дозволяє знизити витрати на ремонт і технічне обслуговування двигуна. У результаті впровадження запропонованого рішення забезпечується річний економічний ефект, а строк окупності є прийнятним. Отже, впровадження удосконаленої системи охолодження та контролю температури обмоток є економічно доцільним.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

6. РОЗДІЛ ОХОРОНИ ПРАЦІ

Охорона праці – це система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів і засобів, які спрямовані на збереження життя, здоров'я та працездатності співробітника в процесі трудової діяльності.

6.1 Організація та управління охороною праці

У фірмі створена та функціонує система управління охороною праці (СУОП). СУОП – це підсистема єдиної системи управління виробництвом, яка контролює показники безпеки, аналізує стан охорони праці та забезпечує підготовку, прийняття та реалізацію рішень, що направлені на збереження життя та здоров'я.

Створення системи управління охороною праці здійснюється шляхом послідовного визначення мети, об'єкта та суб'єкта управління, задач та заходів керування охорони праці, функцій та методів охорони праці, організації структури управління та нормативно-методичної документації.

Роботодавець з урахуванням специфіки виробництва, видів діяльності, чисельності працівників, умов праці тощо розробляє та затверджує Положення про службу охорони праці відповідного підприємства, визначає структуру служби охорони праці, її чисельність, основні завдання, функції та права її працівників відповідно до законодавства. Служба охорони праці підпорядковується безпосередньо роботодавцю.

Навчання та систематичне підвищення рівня знань працівників, населення України з питань охорони праці - один з основних принципів державної політики в галузі охорони праці, фундаментальна основа безпеки праці та необхідна умова вдосконалення управління охороною праці та забезпечення ефективної профілактичної роботи щодо запобігання аварій і травматизму на виробництві.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		74

Основним нормативним актом, що регламентує порядок та види навчання, а також форми перевірки знань з охорони праці є НПАОП 0.00-4.12-05 "Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці".

Організація навчання і перевірки знань з питань охорони праці працівників, у тому числі під час професійної підготовки, перепідготовки і підвищення кваліфікації на підприємстві, здійснюють працівники служби кадрів або інші спеціалісти, яким роботодавець доручає організацію цієї роботи.

Згідно ст. 17 Закону України «Про охорону праці» від 14.10.1992 № 2694-ХІІ роботодавець або уповноважений ним орган повинен забезпечити фінансування та організацію попереднього медогляду та періодичного медичного огляду працівників, зайнятих на важких роботах, роботах із шкідливими та небезпечними умовами праці, або таких, де є потреба в професійному доборі. Медичні огляди певних категорій працівників проводять у порядку, затвердженому наказом МОЗ України від 21.05.2007 № 246.

Розслідування нещасного випадку проводиться у разі раптового погіршення стану здоров'я працівника, одержання ним поранення, травми, у тому числі внаслідок тілесних ушкоджень, заподіяних іншою особою, гострого професійного захворювання і гострого професійного та інших отруєнь, теплового удару, опіку, обмороження, у разі утоплення, ураження електричним струмом, блискавкою та іонізуючим випромінюванням, одержання інших ушкоджень унаслідок аварії, пожежі, стихійного лиха, контакту з представниками тваринного і рослинного світу, що призвели до втрати працівником працездатності на один робочий день чи більше або до необхідності переведення його на іншу (легшу) роботу терміном не менш як на один робочий день, у разі зникнення працівника під час виконання ним трудових обов'язків, а також у разі смерті працівника на підприємстві.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

До складу комісії з розслідування входять: керівник служби охорони праці або посадова особа, на яку роботодавцем покладено виконання функцій спеціаліста з питань охорони праці, керівник структурного підрозділу підприємства, на якому стався нещасний випадок, представник профспілкової організації, членом якої є потерпілий, або уповноважена найманими працівниками особа з питань охорони праці, якщо потерпілий не є членом профспілки, інші особи.

6.2 Пожежна безпека

Ступінь вогнестійкості будинків приймається в залежності від їхнього призначення, категорії по вибухопожежній і пожежній небезпеці, по поверховості, площі поверху в межах пожежного відсіку згідно НАПБ Б.03.002-2007.

Будинок, у якому знаходиться приміщення де працюють робітники, по пожежній небезпеці будівельних конструкцій відноситься до категорії Д (малопожежонебезпечні), оскільки тут присутні займисті (книги, документи, меблі, оргтехніка і т.д.) і легкогорючі речовини (сейфи, різне устаткування і т.д.), що при взаємодії з вогнем не горять взагалі.

У приміщенні, де знаходиться робоча зона, для забезпечення електробезпеки встановлено занулення та заземлення. Ці захисні міри дозволяють убезпечити працівників від різних електротравм.

Ступінь пожежної безпеки та вогнестійкості будівель визначається згідно НАПБ Б.03.002-2007 «Норми визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою». Будівля в якій знаходиться робоче місце програміста відноситься до категорії В, так як тут знаходяться займисті (меблі, документи) та горючі речовини, що при взаємодії з вогнем можуть горіти без вибуху.

За ступенем вогнестійкості будівлю можна віднести до IIIa ступеню, так як це будинок переважно з каркасною конструктивною схемою. Елементи каркаса – з металевих незахищених конструкцій. Огороджувальні конструкції

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		76

– з металевих профільованих листів або інших негорючих листових матеріалів з негорючим утеплювачем.

6.4 Індивідуальне завдання. Визначення категорії пожежонебезпечних приміщень

Характеристики категорій приміщень з вибухопожежної та пожежної ніяк безпеки по НПБ 105-2003 категорій В1 - В4 - приміщення, в яких зберігаються горючі і важкогорючі рідини, тверді горючі і важкогорючі речовини і матеріали (в тому числі пил і волокна), речовини і матеріали, здатні при взаємодії з водою, киснем повітря або один з одним тільки горіти.

До пожежонебезпечних категорій В1 - В4 відносяться приміщення дисплейних класів, лабораторні приміщення, приміщення офісів і ін., Де є горючі матеріали (меблі, папір, покриття підлоги, штори і т.д.). Пожежонебезпечна категорія приміщення визначається порівнянням максимального значення питомого тимчасового навантаження на будь-який з ділянок з розміром питомого пожежного навантаження, наведеного в таблиці 6.3.

Таблиця 6.3 - Категорії пожежонебезпечних приміщень В1 - В4

Категорія приміщення	Питоме пожежне навантаження, МДж/м ²
В1	більше 2200
В2	1401 – 2200
В3	181 – 1400
В4	1 – 180

Розрахуємо категорію пожежонебезпечних приміщень, згідно даних, наданих за варіантом, наведених у таблиці 6.3.

Таблиця 6.4 - Дані для визначення категорії пожежонебезпечних приміщень

Офісне приміщення	№ п/п <i>i</i> -го матеріалу	Найменування предметів і матеріалів	Вага G_i , кг, приблизно	Площа розміщення пожежного навантаження, S , м ²
Приміщення планово-фінансового відділу фірми	1	Столи, ДСП	24	48
	2	Стільці, пластик	16	
	3	ПЕОМ, склопластик	6	
	4	Шафа, ДСП	8	
	5	Папір	16	
	6	Паркет, дерево	72	
	7	Штори, віскоза	8	

Наведемо дані нижчої теплоти згорання пожежонебезпечних матеріалів відповідно до варіанта в таблиці 6.5.

Таблиця 6.5 - теплота згорання пожежонебезпечних матеріалів¹ ДСП

№ п/п <i>i</i> -го матеріалу	Найменування матеріалу	Нижча теплота згорання матеріалів, кДж / кг
1	ДСП	19000
2	Пластик	28000
3	Склопластик	25100
4	ДСП	19000
5	Папір	20000
6	Дерево	19000
7	Віскоза, волокно	14904

Визначимо пожежне навантаження по формулі:

$$Q = \sum_{i=1}^n (G_i * Q_{Hi}^p) = 24 \times 19000 + 16 \times 28000 + 6 \times 25100 + 8 \times 19000 + 16 \times 20000 + 72 \times 19000 + 8 \times 14904 = 3013832 \text{ кДж} = 3014 \text{ МДж}$$

Визначимо питому пожежну навантаження по формулі

$$q = \frac{Q}{S} = 3014/48 = 62,8 \text{ МДж/м}^2 \text{ } S 48$$

Отримане питомий пожежне навантаження знаходиться в діапазоні $1 \leq 62,8 \leq 180$ тому пожежонебезпечна приміщення можна віднести до категорії В4.

6.5 Заходи з охорони праці

Оскільки індивідуальний розрахунок був спрямований на систему освітлення, то заходи з охорони праці також будуть спрямовані на дотримання умов освітлення. А саме:

- зміна непрацюючих ламп;
- очищення від пилу вікон та плафонів ламп;
- зменшенням яскравості світильників шляхом закриття джерел світла світлорозсіювальним склом;
- використанням світильників з відбивачами, ґратами в подовжній і поперечній площинах.

Висновки розділу. В цьому розділі було розглянуто організацію та управління охороною праці. Проведено аналіз умов праці на робочому місці програміста, а саме освітлення робочого місця, повітря робочої зони, мікрокліматичні умови, іонізуюче випромінювання, електробезпека та пожежна безпека.

Було розраховано система освітлення робочого місця інженера-програміста, визначено дози опромінення та часу перебування людей на радіоактивно зараженій місцевості при встановленій дозі опромінення та запропоновано наступні заходи з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях:

- Збільшення контрастності між фоном та об'єктом розрізнення,
- Збільшення розміру об'єкта розрізнення,
- Розробка заходів з евакуації персоналу у разі виникнення загрози радіоактивного характеру.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		79

Висновки

У кваліфікаційній роботі розглянуто питання проектування системи частотного керування тяговим асинхронним двигуном електропоїзда з обмеженням струмів пуску. У процесі виконання роботи проаналізовано особливості роботи електропоїзда як об'єкта тягового електроприводу, умови експлуатації тягових асинхронних двигунів та основні вимоги до системи їх керування. Показано, що для сучасного тягового електроприводу важливими є плавність пуску, зменшення струмових перевантажень, підвищення енергоефективності та зниження навантажень на силове і механічне обладнання.

У роботі виконано аналіз існуючих систем керування тяговими двигунами та встановлено, що найбільш доцільним рішенням для сучасного електропоїзда є використання частотно-регульованого асинхронного електропривода. Така система забезпечує ширші можливості регулювання, кращі динамічні характеристики та вищу енергоефективність у порівнянні з реостатно-контакторними і тиристорно-імпульсними системами.

У розрахунково-конструкторській частині визначено основні параметри тягового асинхронного двигуна, розраховано параметри Т-подібної схеми заміщення та отримано необхідні дані для побудови математичної моделі електропривода. На основі виконаних розрахунків побудовано імітаційну модель електропривода локомотива в середовищі MATLAB Simulink, яка дозволила дослідити процеси пуску, розгону та зміни навантаження при різній масі рухомого складу.

За результатами моделювання встановлено, що плавне наростання завдання моменту забезпечує м'який розгін електропривода без надмірних струмових перевантажень. Порівняння досліджених стратегій керування показало, що стратегія «максимальний момент на ампер» забезпечує менший модуль струму при однаковому завданні на момент, ніж стратегія мінімізації

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		80

втрат у міді. Це дозволяє вважати її більш доцільною для режимів пуску та розгону тягового асинхронного електропривода електропоїзда.

У техніко-економічній частині встановлено, що впровадження системи частотного керування є економічно доцільним. Економічний ефект досягається за рахунок зниження витрат на електроенергію, технічне обслуговування і поточний ремонт. Додатковими перевагами запропонованого рішення є зменшення пускових перевантажень, підвищення ресурсу силового обладнання та покращення плавності роботи електропривода.

Отже, поставлена в роботі мета досягнута. Запропонована система частотного керування тяговим асинхронним двигуном електропоїзда з обмеженням струмів пуску забезпечує належні динамічні показники, знижує струмові перевантаження в пускових режимах та може бути рекомендована для використання в сучасних тягових асинхронних електроприводах електропоїздів.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		81

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу "Теорія електроприводу" спец. 141 / Є. П. Штепа, К. А. Шейда Голбад ; Каф. електромеханіки та мехатроніки. — Одеса : ОНТУ, 2023. — 43 с.

2. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра спец.141 П. І. Осадчук, В. Ф. Бабіч, А. А. Галіулін, Є. П. Штепа._ Одеса: ОНТУ, 2021. — 47 с.

3. Моделювання електромеханічних систем: Підручник / Чорний О.П.,Луговой А.В., Родькін Д.Й., Сисюк Г.Ю., Садовий О.В.— Кременчук, 2001.—410 с.

4. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу: навчальний посібник /О. І. Толочко. — Київ: НТУУ «КПІ», 2016. — 150 с.

5. 1 Осташевський М. О., Петренко О. М. , Юр'єва О. Ю. Теплові розрахунки електричних машин : навч. посібник / М. О. Осташевський, О. М. Петренко, О. Ю. Юр'єва – Харків : ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2020. – 450 с.

6. 2 Цуркан О. В. Основи теплотехніки і гідравліки. Навчальний посібник / О. В. Цуркан, Н. А. Прокопенко, Ю. А. Полєвода, О. В. Маньківський – Вінниця : ТОВ «Друк», 2021. – 132 с.

7. Осташевський М. О. Електричні машини і трансформатори : навч. посібник / М. О. Осташевський, О. Ю. Юр'єва; за ред. В. І. Мілих. – Харків : ФОП Панов А. М., 2017. – 452 с.

8. Черняк О.В. Основи теплотехніки і гідравліки / О.В. Черняк, Г.Б. Рибчинська. – Київ, 1982. – 221 с.

9. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів. Наказом Міністерства енергетики та вугільної промисловості [№ 905 від 16.11.2012](#)
Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1143-06#n20>

10. Суберляк О.В., Баштанник П.І. Технологія переробки полімерних та композиційних матеріалів. – Київ.: 2006. – 270с.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		82

11. Допустимі довготривалі струми для проводів, шнурів, кабелів з гумовою або пластмасовою ізоляцією. Витяг з нормативних актів України
Режим доступу:

http://norma.org.ua/document/legislation/PUE7/1_3_2.php#google_vignette

12. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів. Наказом Міністерства енергетики та вугільної промисловості № 905 від 16.11.2012 Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1143-06#n20>

13. Попович М. Г. Теорія електропривода: Підручник / За ред. Поповича М. Г. –К.:Вища школа, 1993. – 494с.

14. Тяговий асинхронний двигун СТА-1200 //[Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://em.fea.kpi.ua/index.php/nauka/rozrobky-kafedry/338-tyagovij-asinkhronnij-dvigun-sta-1200>

15. Пушков П.М., Андрейченко В.П., Кульбашный А.В. «Методичні вказівки до практичних і самостійних занять з тягових розрахунків з дисципліни “Основи електричної тяги”, Харьков, ХНАГХ, 2008. 86с.

16. Михальський В.М. Засоби підвищення якості електроенергії на вході і виході перетворювачів частоти та напруги з широтно-імпульсною модуляцією. – Київ, Інститут електродинаміки НАН України, 2013. – 340 с.

17. Комп’ютерні пристрої в системах автоматизації. Методичні вказівки до розрахунково-графічної роботи для студентів напрямку підготовки 6.050702 / Уклад: С. М. Ковбаса, С. С. Димко –К.: НТУУ “КПІ”, 2015 р. 25 с.

18. Пересада С.М, Ковбаса С.М. Методичні вказівки до виконання розрахунково-графічної роботи з дисципліни ТМС-1. К.: «НТУУ» «КПІ», 2011 40 с.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		83