Український державний університет залізничного транспорту

Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

СИСТЕМА ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЮ ТЕПЛОВОГО СТАНУ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ РУХОМОГО СКЛАДУ

Пояснювальна записка і розрахунки
до кваліфікаційної роботи

КРМ.273.42.12.25.01 ПЗ

Розробив студент групи 215-ЕЕ-Д22
спеціальності 273 Залізничний транспорт
«Електровози та електропоїзди»

_____Циганенко Т.Е.
(підпис)

Керівник: к.т.н., доцент, доцент кафедри

_____Плахтій О.А
(підпис)

Рецензент: к.т.н., доцент кафедри

_____Карпенко Н.П.
(підпис)

2025

Український державний університет залізничного транспорту

Факультет механіко-енергетичний
Кафедра електроенергетика, електротехніки та електромеханіки
Освітньо-кваліфікаційний рівень: магістр
Спеціальність: 273 «Залізничний транспорт»
Освітня програма: «Електровози та електропоїзди»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри,
професор, д-р техн. наук

_____М.М. Бабаєв
(підпис)
«___» _____2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
Циганенко Тарасу Едуардовичу

1 Тема: «Система теплового контролю теплового стану тягових двигунів рухомого складу», керівник Плахтій О.А, к.т.н., доц. Затверджена розпорядженням по механіко-енергетичному факультету від «30» вересня 2024 року №42.

2 Термін подання студентом закінченої роботи: «12» грудня 2024 року.

3 Вихідні дані: конструкція тягових двигунів постійного струму, режими навантаження тягових двигунів.

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки:

1) Аналіз методів контролю теплового стану асинхронного тягового електродвигуна при випробуваннях і в експлуатації;

2) Тепловий стан асинхронного тягового електродвигуна;

3) Математична модель теплових процесів асинхронного тягового двигуна для нестаціонарних режимів роботи;

4) Система моніторингу температурного режиму асинхронних тягових електричних двигунів у складі електровозів;

5 Перелік графічного матеріалу:

1) Статистика пошкоджень та відмов тягових двигунів – один слайд;

2) Оцінювання та моніторинг теплового стану тягових двигунів – один слайд;

3) Методи аналітичного визначення теплового стану електричних машин – один слайд;

4) Математична модель теплового стану АТЕД на основі методу еквівалентних теплових схем – один слайд;

5) Системи рівнянь, що описують тепловий стан – один слайд;

6) Вентиляційний розрахунок АТЕД – один слайд;

7) Результати розрахунку теплового стану – один слайд;

8) 3D моделювання теплового стану електричної машини – один слайд;

9) Оцінка результатів розробленої теплової математичної моделі – один слайд;

10 Зіставлення методів, оцінка точності визначення температури ТЕД – один слайд;

11) Алгоритм роботи системи моніторингу теплового стану тягових електродвигунів;

12) Висновки до кваліфікаційної роботи

6 Консультанти окремих розділів

Розділ	Прізвище, ініціали, посада та науковий ступінь консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Економічний розділ	Уткіна Ю.М.		

7 Дата видачі завдання «30» вересня 2024 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів	1.10 – 18.10	Виконано
1. Аналіз методів контролю теплового стану асинхронного тягового електродвигуна при випробуваннях і в експлуатації	19.10 – 5.11	Виконано
2. Тепловий стан асинхронного тягового електродвигуна	6.11 – 26.11	Виконано
3. Математична модель теплових процесів асинхронного тягового двигуна для нестаціонарних режимів роботи	27.11 – 10.12	Виконано
4. Система моніторингу температурного режиму асинхронних тягових електричних двигунів у складі електровозів	13.12 – 20.12	Виконано
5. Нормоконтроль. Виправлення помилок. Підготовка до захисту.	1.10 – 18.10	Виконано

Студент_____Т.Е. Циганенко
(підпис)

Керівник _____О.А. Плахтій
(підпис)

АНОТАЦІЯ

Дана кваліфікаційна робота включає в себе 12 слайдів презентації, 130 аркуши, пояснювальну записку формату А4, що включає 19 рисунків, 8 таблиць, 9 літературних джерел.

Ключові слова**:** АСИНХРОННИЙ ТЯГОВИЙ ДВИГУН, ТЕПЛОВИЙ СТАН, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, ЕЛЕКТРОРУХОМИЙ СКЛАД, ЛОКОМОТИВИ ТА ЕЛЕКТРОВОЗИ.

Об’єктом дослідження є теплові процеси в асинхронному тяговому електродвигуні.

Метою є розробка системи моніторингу теплового стану тягових асинхронних електродвигунів локомотивів при різних режимах роботи, яка дозволить безперервно контролювати тепловий стан АТЕД та своєчасно запобігати можливі аварійні ситуації.

У кваліфікаційній роботі запропонована система теплового моніторингу теплового стану тягових електричних двигунів.

На основі методу створення еквівалентних схем теплових процесів ТЕД, розроблені аналітичні математичні моделі, що дозволяють визначити температурних стан тягових двигунів. В програмі ELCUT розроблено комп’ютерну 3D модель тягового двигуна на якій визначено теплові параметри.

Визначено, що запропонована система моніторингу теплового стану ТЕД дозволить знизити число випадків перевищення температури ТЕД, і відповідно покращити показники надійності ізоляції ТЕД, що призведе до зниження числа виходу ТЕД з ладу.

ABSTRACT

This qualification work includes 12 presentation slides, 131 sheets, an explanatory note in A4 format, which includes 19 figures, 8 tables, 9 literary sources.

Keywords: ASYNCHRONOUS TRACTION MOTOR, THERMAL STATE, MATHEMATICAL MODEL, ELECTRIC ROLLING STOCK, LOCOMOTIVES AND ELECTRIC LOCOMOTIVES.

The object of the study is an asynchronous traction electric motor.

The goal is to develop a system for monitoring the thermal state of traction asynchronous electric motors of locomotives under different operating modes, which will allow continuous monitoring of the thermal state of the ATE and timely prevention of possible emergency situations.

The qualification work proposes a system for thermal monitoring of the thermal state of traction electric motors.

Based on the method of creating equivalent schemes of thermal processes of ATM, analytical mathematical models have been developed that allow determining the temperature state of traction motors. A computer 3D model of the traction motor has been developed in the ELCUT program, on which thermal parameters have been determined.

It has been determined that the proposed system for monitoring the thermal state of ATM will allow reducing the number of cases of exceeding the ATM temperature, and accordingly improving the reliability indicators of ATM insulation, which will lead to a reduction in the number of ATM failures..

ЗМІСТ

Вступ 8

1 Аналіз методів контролю теплового стану асинхронного тягового електродвигуна при випробуваннях і в експлуатації 9

1.1 Особливості конструкції тягових електричних машин електрорухомого складу, вимоги до них 9

1.2 Огляд тягових електричних машин, що застосовуються в електрорухомому складі, та їх характеристик 9

1.3 Технічне обслуговування та діагностика тягових електродвигунів при експлуатації 13

1.3.1 Надійність електрорухомого складу 13

1.3.2 Характеристика відмов тягових електродвигунів 15

1.3.3 Аналіз теплового стану ТЕД 19

1.3.4 Оцінювання та моніторинг теплового стану асинхронних тягових електродвигунів під час експлуатації електровозів 20

1.4 Постановка задачі розробки системи оцінки теплового стану 24

2. Тепловий стан асинхронного тягового електродвигуна 25

2.1 Огляд методів, що використовуються для обчислення температурного поля електричних машин 25

2.2 Математичний інструментарій для розробки теплової математичної моделі АТЕД 31

2.3 Математична модель встановленого теплового стану АТЕД (на прикладі двигуна НТА-1200) 32

2.4 Розрахунок нагрівання асинхронного тягового електродвигуна 41

2.5 Порівняльний аналіз результатів розробленої теплової математичної моделі 52

3 Математична модель теплових процесів асинхронного тягового двигуна для нестаціонарних режимів роботи 56

3.1 Розрахунок нестаціонарних температур вузлів асинхронного тягового електродвигуна через коефіцієнти впливу.....57
3.2 Розрахунок температур вузлів ТЕД через постійні нагрівання.....75
3.2.1 Визначення постійних нагріву елементів двигуна..... 76
3.2.2 Розрахунок нагрівання ТЕД із використанням постійних нагріву вузлів електродвигуна..... 77
3.3 Зіставлення методів, оцінка точності 78
4 Система моніторингу температурного режиму асинхронних тягових електричних двигунів у складі електровозів 81
4.1 Призначення системи моніторингу теплового стану тягових електродвигунів.....81
4.2 Принцип роботи системи моніторингу асинхронних тягових електродвигунів 82
4.2.1 Регулювання частоти обертання тягового електродвигу на 83
4.2.2 Розрахунок частоти обертання тягового двигуна для теплової системи моніторингу тягових електродвигунів 85
4.2.3 Алгоритм роботи системи моніторингу теплового стану тягових електродвигунів змінного струму..... 86
4.3 Апробація роботи системи моніторингу теплового стану асинхронних тягових електродвигунів 89
4.4 Аналіз отриманих результатів випробувань.....100
5 Розрахунок економічного ефекту від модернізації 101
5.1 Коротка характеристика запропонованого технічного рішення..... 101
5.2 Методики розрахунку економічного ефекту 102
5.3 Розрахунок вартісної оцінки витрат 103
5.4 Розрахунок показників використання 109
Висновки.....116
Список використаних джерел:.....118

Таким чином, оновлення електровозного парку є критично важливим для підвищення конкурентоспроможності української економіки і якості залізничного сполучення, що має забезпечити надійний транспорт як для пасажирських, так і вантажних перевезень у найближчі роки

Слід зазначити, що випускавані наразі електровози з асинхронними тяговими електродвигунами (АТЕД) оснащуються тепловими системами захисту. Так, для тягових електродвигунів локомотива передбачено встановлення блоку захисту, який являє собою термодатчик, встановлений в осердя статора, з блоком управління, який при перевищенні допустимого значення температури цього вузла виводить повідомлення на робочий монітор машиніста поїзда. У свою чергу, машиніст може ухвалити рішення і змінити параметри роботи електровоза і електродвигуна зокрема.

Слід зазначити, що ця система контролює значення температури лише одного елемента конструкції тягового двигуна, який не завжди є найбільш нагрітим. Тобто отримувана інформація не завжди дозволяє правильно оцінити теплове навантаження всієї машини. Для отримання достовірної інформації про тепловий стан всього об’єкта необхідно використовувати більшу кількість контрольних вузлів, а відповідно – встановлення більшої кількості термодатчиків. Це не завжди є можливим через обмеження простору всередині машини і ускладнення системи захисту. Таким чином, дослідження асинхронних тягових електродвигунів як теплових об’єктів і створення для них систем оптимального моніторингу теплового стану стають актуальними. Застосування таких систем необхідне як під час випробувань, так і в період експлуатації, щоб запобігти досягненню граничного температурного стану АТЕД.

1 Аналіз методів контролю теплового стану асинхронного тягового електродвигуна при випробуваннях і в експлуатації

1.1 Огляд характеристик тягових електричних двигунів, що застосовуються в електрорухомому складі України

Історично розвиток тягового привода в галузі залізничного транспорту розпочався з освоєння ТЕД постійного струму. Традиційно, як в Україні, так і за кордоном основне застосування мають машини постійного та пульсуючого струму. На даний час в українському парку локомотивів основними типами тягових електродвигунів є ТЛ-2К, ЕДП-810, ЕК-810, НБ-418, НБ-514 та інші. Широке застосування цих двигунів обумовлено їхньою високою перевантажувальною здатністю та хорошими регулювальними властивостями, які дозволяють досить просто змінювати швидкість руху ЕРС.

На даний час, одним із напрямів реформування залізничного транспорту відповідно до енергетичної стратегії холдингу «Укрзалізниці» на період до 2015 року і на перспективу до 2030 року» є оснащення парку електровозів локомотивами нового покоління, які повинні відповідати таким основним вимогам:

- покращення тягових властивостей на 15–20 %;
- економія енергоресурсів на 10–15 %;
- збільшення міжремонтних пробігів у 2 рази;
- підвищення коефіцієнта готовності машин за рахунок забезпечення їх високої надійності та ремонтопридатності;
- забезпечення ККД електровозів постійного струму до 90 %, ККД електровозів змінного струму до 88 %;
- термін служби магістральних локомотивів – 40–45 років;
- термін служби маневрових тепловозів – 50 років.

Досягти багатьох із представлених необхідних показників, використовуючи тільки тяговий електропривод постійного струму, не видається

можливим, оскільки ТЕД постійного та пульсуючого струму, окрім переваг, мають низку серйозних недоліків. Основними з них є:

- порівняно невисока надійність колекторного вузла і щіточного апарату;
- обмеження за умовами комутації та механічної міцності;
- високі витрати на технічне обслуговування в умовах експлуатації та ремонт;
- підвищена маса двигуна при порівняно низьких значеннях крутного моменту;
- підвищена витрата кольорових металів і активних матеріалів.

Варто зазначити, що на цей момент у галузі проєктування та виробництва тягових електричних машин постійного струму промисловість практично досягла граничних потужностей за умовами комутації електромеханічним комутатором.

Виходом із цієї ситуації, згідно зі стратегією АТ «Укрзалізниця», є оснащення залізничного парку країни електровозами нового покоління з асинхронними тяговими електродвигунами, які позбавлені вищезгаданих недоліків і дозволяють зняти обмеження за потужністю. Безколекторні електричні машини змінного струму мають широке застосування у всіх галузях техніки. Широке використання цих двигунів обумовлене їхньою підвищеною надійністю та простотою в обслуговуванні. Важливим фактором застосування асинхронних двигунів як тягових є те, що вони мають жорстку механічну характеристику, таку ж, як і двигун постійного струму паралельного збудження, внаслідок чого підвищується коефіцієнт зчеплення коліс із рейками.

Представлений у таблиці 1.1 порівняльний аналіз питомих показників конструкцій тягових електродвигунів різного типу і призначення [1] показує, що найменші питомі показники мають ТЕД електровозів колекторного типу. Як уже зазначалося, це обумовлено жорсткими обмеженнями зростання електромагнітних навантажень і частоти обертання в електродвигунах постійного та пульсуючого струму. Так, наприклад, для шестиполюсного ТЕД за

умов потенційної та комутаційної напруженості на колекторі, допустимої окружної швидкості колектора та теплової напруженості обмотки якоря максимальна частота обертання не може перевищувати 1700 об/хв [1].

Таблиця 1.1 – Питомі показники тягових електродвигунів

Марка двигуна	Тип двигуна	Потужність P, кВт	Крутний момент на валу M, Н·м	Маса, m, кг	Питома потужність, $P/(m \cdot n) \cdot 10^{-4}$, кВт/(кг·об/хв)	Питомий момент M/m, Н·м/кг
ТЛ-2К1	Колекторний	575	6953	5050	1,455	1,38
НБ-508А	Колекторний	560	6684	4383	1,652	1,52
НБ-514	Колекторний	795	8210	4070	2,108	2,02
НБ-418К	Колекторний	740	9549	4350	1,910	2,20
ЭК-810Ч	Колекторний	775	9355	5000	2,013	1,87
ДАТ-510	Колекторний	510	7500	2950	2,660	2,54
6FHA7067	Колекторний	1600	8984	2370	3,971	3,79
НТА-1200	Колекторний	1170	8630	2453	3,707	3,52

Порівняння тягових електродвигунів постійного та змінного струму [2] дозволяє зробити висновок, що експлуатовані нині ТЕД постійного та пульсуючого струму мають у 1,5–2 рази менші значення питомих показників потужності та моменту порівняно з асинхронними тяговими двигунами.

Першими вітчизняними макетними зразками ЕРС з асинхронними тяговими двигунами стали: у 1970 році електропоїзд ЕР9А і в 1971 році електровоз ВЛ80а з живленням від контактної мережі змінного струму напругою 25 кВ [1]. Незважаючи на поліпшені питомі показники АТЕД у порівнянні з тяговими двигунами постійного струму, їхнє широке застосування на локомотивах стало можливим лише з появою силової напівпровідникової техніки та засобів автоматики, розрахованих на великі струми. Розвиток ПНП і поява

IGBT-транзисторів дозволили створити надійні та економічні статичні перетворювачі частоти, які мають прийнятні розміри й масу для встановлення на локомотивах. Це дало змогу створити технічну базу для освоєння та впровадження асинхронного тягового приводу в ЕРС.

Активна робота у напрямку створення електропоїздів з тяговим електроприводом розпочалася з приходом XXI століття. У цей час були створені низка дослідних зразків. Так, у 2004 році було створено зразок чотиривісного маневрового тепловоза ТЕМ21 потужністю 1500 к.с.. З 2005 по 2007 роки здійснювався випуск серії електровозів подвійного живлення ЕП10.

Порівняння техніко-економічних показників першої дослідної експлуатації електровоза 2ЕС10 з показниками нині експлуатованих вантажних електровозів, оснащених тяговим електроприводом постійного струму, показало [3]:

- зниження витрат на обслуговування та ремонт АТЕД;
- підвищення надійності завдяки застосуванню мікропроцесорної системи управління, використанню керованих статичних перетворювачів та асинхронних тягових двигунів.

Подібні показники також були отримані для пасажирського поїзда ЕТ4А, оснащеного асинхронним тяговим електродвигуном. Його контрольована експлуатація проходила з червня 2012 до червня 2013 року в режимі прискореного приміського поїзда. Заявлені параметри та характеристики цього електропоїзда також були підтверджені. Витрати, пов'язані з проведенням регламентних робіт поїзда ЕТ4А, у порівнянні з електропоїздом ЕТ2М зменшені приблизно на 15 %.

Таким чином, застосування асинхронних двигунів як тягових у рухомому складі дозволяє досягти високих енергетичних показників завдяки:

- відсутності в конструкції двигуна колектора, що підвищує його надійність;
- меншій витраті міді двигунами змінного струму в порівнянні з двигунами постійного струму при однаковому моменті та частоті;
- меншій масі та габаритам тягових двигунів;

– формуванню сигналу системи управління АТЕД.

Представлений план закупівель тягового рухомого складу «Укрзалізницею» підтверджує збільшення рівня оснащення українських депо електровозами постійного струму з асинхронним тяговим приводом. Так, у планах закупівлі техніки частка локомотивів нових серій, оснащених АТЕД, у 2013 році становила понад 16 %, а у 2015 році – 25 %.

1.2 Технічне обслуговування та діагностика тягових електродвигунів при експлуатації

1.2.1 Надійність електрорухомого складу

Нові економічні умови, в яких функціонує залізничний транспорт, ставлять на перший план ефективне використання локомотивного парку та забезпечення прийнятного рівня його експлуатаційної надійності. Економічні показники залізниці, збереження вантажів і безпека пасажирів прямо залежать від надійності обладнання, зокрема локомотивів. Надійність електровоза, своєю чергою, визначається надійністю його окремих елементів, вузлів і механізмів. Отже, досягнення необхідного рівня надійності можливе завдяки підтримці надійності роботи вузлів рухомого складу.

Аналіз основних показників технічного стану локомотивного парку, що експлуатується на магістральних залізницях, свідчить, що щорічна частка несправних локомотивів становить близько 10-12%. Високими залишаються також показники простоїв для всіх видів ремонту, випадків відмов і випадків позапланового ремонту. Зокрема, станом на 2009 рік, найбільш частими є відмови електричної апаратури (44-55%) та тягових електродвигунів (17-21%).

Високий рівень виходу з ладу тягових електродвигунів зумовлений важкими умовами їх експлуатації, оскільки ТЕД є найбільш навантаженим обладнанням з точки зору впливу теплових, електричних, механічних і кліматичних факторів. Іншим фактором є перевантаженість ваги поїздів, яка

часто перевищує допустимі можливості локомотивів. Наприклад, середня вага поїздів зросла на 20-25% від норми, що збільшує кількість випадків виходу з ладу електричних машин. Це забезпечує економічну ефективність, але призводить до скорочення терміну служби вузлів електровозів, зокрема тягових електродвигунів, колісних пар і електроапаратури. Тяговий рухомий склад, маючи певний запас надійності, накопичує несправності, що в подальшому призводить до масових пошкоджень. У середньому 50% тягових електродвигунів потребують ремонту не за пробігом, а за станом, через пошкодження, пов'язані з міжвитковими замиканнями якоря та котушок полюсів, пробоєм ізоляції якоря і котушок полюсів, тріщинами валів якорів, зносом моторно-осьових горловин тощо.

Для зниження рівня пошкоджуваності електродвигунів проводяться конструктивно-технологічні заходи при виготовленні та ремонті локомотивів, однак дані про пошкодження тягових двигунів за перше півріччя 2011 року свідчать, що питома пошкоджуваність продовжує зростати. При цьому найбільша кількість відмов у роботі припадає на тягові електродвигуни вантажних електровозів постійного струму.

У період експлуатації для адекватної оцінки експлуатаційної придатності таких електродвигунів необхідний контроль їх технічного стану, через що набувають актуальності питання оцінки та забезпечення надійності на найраніших етапах експлуатації. Одним із шляхів підвищення надійності та зниження експлуатаційних витрат є впровадження діагностики та перехід від регламентованої системи технічного обслуговування (ТО) і технічного ремонту (ТР) до системи обслуговування за фактичним станом.

Звідси випливає висока актуальність ефективного планування термінів ТО і ТР на основі прогнозування ресурсу ТЕД за фактичним технічним станом у процесі експлуатації.

Відповідно до ГОСТ Р 27.002-2009, «ресурс» визначається як сумарна напрацювання ТЕД від початку його експлуатації або відновлення після ремонту до переходу в граничний стан. Граничний стан електродвигуна відповідає такому

стану, при якому його подальша експлуатація є недопустимою. Критерій граничного стану визначається сукупністю ознак, встановлених нормативною та технічною документацією. Вихід за допустимі значення будь-якої з ознак характеризує граничний стан, втрату працездатності, вичерпання ресурсу і створює загрозу безпеці.

Вся сукупність ознак, що характеризують граничний стан ТЕД, може бути представлена такими групами:

- геометричні розміри окремих зношуваних елементів і деталей машини, зміна яких у процесі експлуатації призводить до втрати працездатності;
- параметри електричної ізоляції ТЕД, значення яких мають бути в допустимих межах;
- електричні параметри, включаючи характеристики комутації, що передують круговому вогню, електромагнітні та електромеханічні перехідні характеристики тощо;
- вібромеханічні параметри, пов'язані з виникненням і розвитком дефектів підшипників кочення, зубчастого зачеплення та ін.

Ресурс двигуна може бути визначений лише після настання відмови або досягнення граничного стану. Поки ці події не настали, можна говорити лише про прогнозування цих величин з більшою або меншою достовірністю. ТР або ТО дозволяють частково або повністю відновлювати ресурс, повертаючи ТЕД у працездатний стан. Таким чином, для прогнозування ресурсу необхідно мати значення у часі параметрів, що визначають граничний стан тягового електродвигуна.

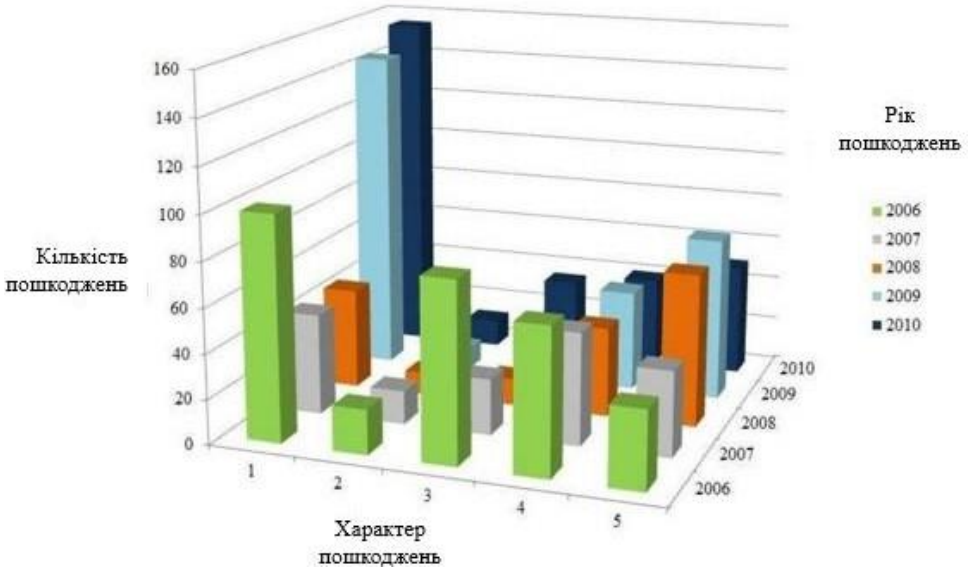
1.2.2 Характеристика відмов тягових електродвигунів

З огляду на значну кількість випадків виходу з ладу електровозів через пошкодження тягових електродвигунів, необхідно проаналізувати характерні відмови ТЕД, що експлуатуються наразі.

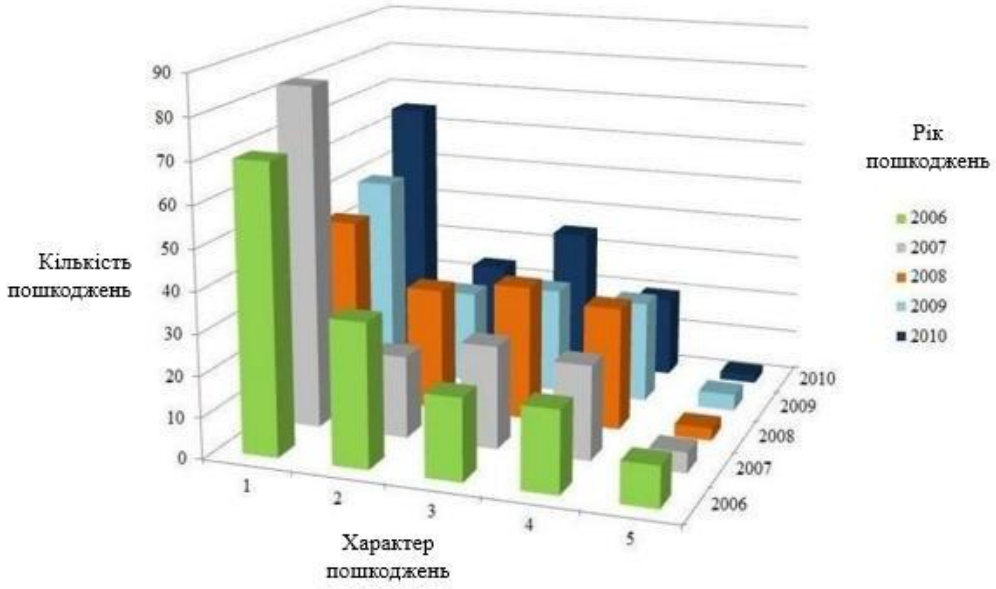
Надійна та безвідмовна робота електричної машини як складного пристрою залежить від надійності роботи її складових частин – магнітної системи, обмоток, для двигунів постійного струму – колектора і щіточного пристрою. Вихід з ладу будь-якої з цих частин призводить до відмови всієї машини.

Загалом по мережі українських залізниць на сьогодні найбільш масовими типами використовуваних тягових електродвигунів є типи НБ-418К6 та ТЛ-2К1 (36 % і 38 % від загальної кількості ТЕД). Аналіз статистичних даних щодо відмов тягових електродвигунів показав приблизно 50 % рівень пошкоджень та несправностей цих типів електродвигунів від їх загальної кількості. Так, для двигуна типу ТЛ-2К1 у 2014 році цей показник становив 46,9 %, а у 2015 році – 53,4 %.

На рис. 1.1 представлені діаграми розподілу характеру пошкоджень ТЕД за окремими вузлами та деталями двигуна ТЛ-2К1 за 2006–2010 роки у випадках планового (рис. 1.1 а) та позапланового ремонту (рис. 1.1 б). Дані про розподіл пошкоджень тягових електродвигунів марки ТЛ-2К1 наведено в таблиці 1.2.



а



б

Рис. 1.1 – Діаграми розподілу пошкоджень ТЕД за окремими вузлами та деталями двигуна ТЛ-2К1 за 2006 -2010 роки: а – плановий ремонт; б – позаплановий ремонт

Дані про розподіл пошкоджень тягових електродвигунів марки ТЛ-2К1 представлено в таблиці 1.2

Таблиця 1.2 – Дані про розподіл пошкоджень тягових електродвигунів марки ТЛ-2К1

Вид ушкодження електродвигуна	Відсоток пошкоджень від загальної кількості, %
Пробій ізоляції та міжвиткові замикання обмотки якоря	16 – 25
Пробій ізоляції та міжвиткові замикання головних та додаткових полюсів та компенсаційної обмотки	12 – 16
Порушення комутації (круговий вогонь)	8 – 16
Пошкодження якірних підшипників	14 – 16

Порушення розпаювання сполук обмотки якоря в петушках колектора	5 – 6

Дані показують, що найбільша частка відмов тягових двигунів електровозів припадає на пробої та низьку ізоляцію обмоток машини, а також на пошкодження з’єднань між полюсами та компенсаційною обмоткою. Це свідчить про наявність факторів, які негативно впливають на електричну міцність ізоляції обмоток.

Проведений аналіз інших типів тягових двигунів показує, що відсоткове співвідношення пошкоджень зберігається на тому ж рівні.

Активна експлуатація електрорухомого складу з асинхронним тяговим електроприводом тільки починається, у зв’язку з чим поки що немає достатньої кількості статистичних даних про види пошкоджень асинхронних тягових машин. Статистика відмов загальнопромислових асинхронних двигунів показує, що основні пошкодження припадають на обмотки двигуна – (85–95) %, і (2–5) % електродвигунів виходять з ладу через пошкодження підшипників. При цьому основні відмови обмоток обумовлені міжвитковими замиканнями обмотки статора (ОС) – 93 %, викликані зниженням електричної міцності ізоляції, а також порушенням цілісності обмотки ротора (ОР). Імовірно, ці співвідношення збережуться й для асинхронних тягових електродвигунів.

Найбільший відсоток відмов електродвигунів пов'язаний з виходом з ладу ізоляції через перевищення допустимих норм теплового стану, механічні дії (тиск, вібрація, удари), вологу, агресивні середовища тощо. Однією з головних причин цих пошкоджень є порушення теплового режиму двигунів (робота з недостатнім охолодженням або без нього). Враховуючи, що тягові електродвигуни як постійного, так і змінного струму працюють в однаково важких умовах, а системи їх охолодження подібні, можна зробити висновок, що ізоляція в АТЕД піддаватиметься передчасному старінню. Існує висока ймовірність того, що основними видами пошкоджень асинхронних тягових

двигунів локомотивів будуть також міжвиткові та міжфазні замикання обмотки статора.

Поступове руйнування ізоляції в умовах експлуатації або під час профілактичних випробувань зазвичай завершується пробоєм – явищем, що свідчить про значне зниження електричної міцності ізоляції.

Незворотні зміни структури та хімічного складу ізоляції, що виникають під дією зазначених факторів, загалом називаються її старінням. Процес погіршення властивостей ізоляції внаслідок старіння називається зносом. Таким чином, термін «старіння» стосується матеріалу, тоді як термін «знос» відноситься до ізоляційної конструкції. У деяких випадках знос може не бути наслідком старіння. Крім того, можливі пошкодження ізоляції, не пов’язані зі зносом: продавлювання, прорізання гострими краями металевих деталей, утворення тріщин через значні напруження при вигині тощо. Такі локальні дефекти часто розвиваються порівняно швидко та призводять до пробою ізоляції задовго до істотного погіршення її властивостей у всьому обсязі внаслідок електричного або термоокислювального руйнування.

Швидкість старіння ізоляції в основному визначається експлуатаційними умовами та властивостями використовуваних матеріалів. Серед різних факторів, що визначають ресурс ізоляції електричних машин, одним із основних є теплове старіння.

1.3.3 Аналіз теплового стану ТЕД

Термін служби будь-якого електромеханічного пристрою визначається передусім його робочою температурою та термостійкістю застосовуваних електроізоляційних матеріалів, а також електричною міцністю, вологостійкістю та механічною міцністю застосовуваної ізоляції.

Температура електродвигуна впливає на ізоляцію обмоток, роботу підшипників та інші активні елементи машини. Гранично допустимі температури активних частин є одним із найважливіших чинників, що обмежують потужність

ТЕД, і, таким чином, мають визначальний вплив на підвищення надійності та ресурсу, а також на величину граничної одиничної потужності.

Ізоляція, що використовується в електродвигунах, повинна відповідати двом властивостям: теплостійкості та термостійкості. Теплостійкість – це здатність електроізоляційного матеріалу зберігати свої властивості на певному рівні за відносно короткочасного нагрівання. Матеріал не повинен при цьому руйнуватися, розшаровуватися, змінювати свій хімічний склад, не повинно виникати значних пластичних деформацій матеріалу тощо.

Нагревостійкість характеризує здатність матеріалу без суттєвого погіршення характеристик витримувати вплив гранично допустимої для цього класу ізоляції температури протягом часу, відповідного ресурсу ТЕД, за умови впливу інших експлуатаційних факторів.

Нагрівання різних елементів ТЕД, особливо ізоляції, допустиме до певної температури, вище якої відбуваються незворотні зміни фізичних властивостей цих елементів (наприклад, електричний пробій ізоляції). Як уже зазначалося, експлуатація ЕРС відбувається в важких умовах, що призводить до регулярного порушення теплового режиму. Це, своєю чергою, призводить до прискореного старіння ізоляції, а як наслідок – до відмови тягового електродвигуна.

Таким чином, одним із основних факторів, поряд із електричним, що впливає на термін служби ізоляції обмоток ТЕД, є тепловий фактор. У зв'язку з цим необхідним є постійний контроль температури вузлів двигуна в процесі експлуатації.

1.3.4 Оцінювання та моніторинг теплового стану асинхронних тягових електродвигунів під час експлуатації електровозів

В сучасних тягових асинхронних двигунах для контролю теплового стану машини вбудовуються датчики температури, зокрема, в електродвигунах марки НТА-1200 у пакет статора інтегровані терморезистори типу РТ-100.

Використовуваний датчик температури (рис. 1.2) складається з двох терморезисторів у вигляді капсул 1, які встановлені в спеціальні гнізда в осерді статора 2. З’єднання датчика зі схемою керування електровоза здійснюється за допомогою спеціального кабелю 3 і штепсельного роз’єму 4.

Терморезистори з'єднані з вивідним кабелем шляхом пайки; місце з’єднання закрите спеціальною ущільнювальною кришкою 5.

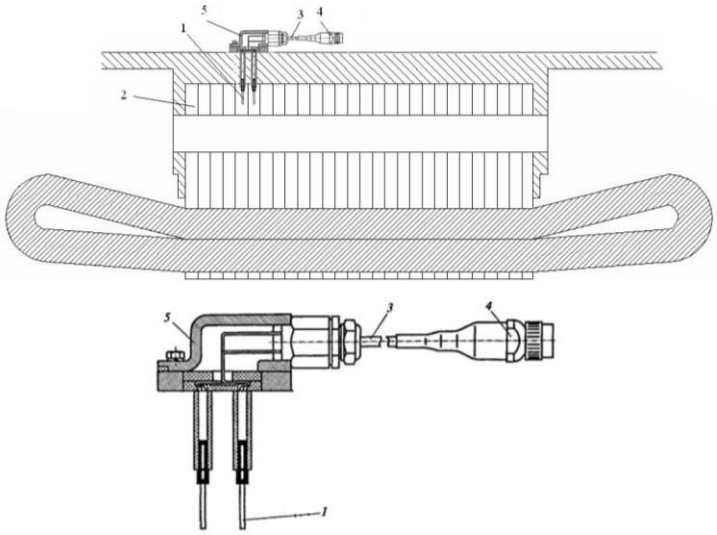


Рис. 1.2 – Установка термодатчиків тягового електродвигуна НТА-1200: 1 – капсула з терморезисторами; 2 – осердя статора; 3 – кабель; 4 – штепсельний роз'єм; 5 – ущільнювальна кришка

Електровози з такими типами електродвигунів, зокрема електровоз ЕП10, оснащені блоком управління, що контролює температуру кожного двигуна, встановленого на електровозі. Будь-яке перевищення температури осердя статора якогось електродвигуна понад допустимий рівень супроводжується відповідним повідомленням на дисплеї пульта машиніста. При цьому також виконується діагностичний запис у енергонезалежну пам’ять системи управління. Це дозволяє згодом проводити аналіз і є основою для визначення залишкового ресурсу електродвигуна.

Досвід експлуатації тягових електричних машин показує, що нагрівання вузлів конструкції відбувається нерівномірно, при різних режимах роботи та

умовах їхнього охолодження. Результати досліджень з розподілу температури вздовж осі електродвигуна, свідчать, що в крупних машинах з аксіальною системою охолодження недостатньо враховувати лише середню температуру охолоджувального потоку всередині машини. Різниця між температурами лобових частин обмоток машини зі сторін подачі та виходу охолоджувального повітря з електродвигуна може досягати 15-35 %. Такий температурний градієнт вузлів ТЕД обумовлений великими розмірами, герметизацією вузлів від зовнішнього середовища для захисту від агресивного впливу та застосуванням примусової вентиляції. Варто зазначити, що це характерно як для машин постійного, так і змінного струму. Наприклад, розподіл температури вздовж статора тягового електродвигуна ДАТ-470 показує, що різниця між температурами передньої та задньої лобових частин обмотки статора може досягати 12-32 % за різних умов охолодження електродвигуна.

З вищесказаного можна зробити висновок, що інформація про температуру осердя статора в одній точці не може використовуватися для коректної оцінки теплового стану всієї машини в період експлуатації, оскільки цей вузол може не бути найтеплонатуженішим за окремих умов роботи електродвигуна. Визначення залишкового ресурсу ізоляції електродвигуна за температурою одного вузла є некоректним.

Для отримання достовірної інформації про технічний стан і оцінку залишкового ресурсу електродвигуна під час експлуатації необхідно мати інформацію про повну картину температурного поля машини. Розробка для залізничного транспорту системи, яка дозволить відстежувати значення температур усіх вузлів тягового електродвигуна локомотива під час його роботи, стає актуальним завданням. Такий моніторинг дозволить знизити витрати, пов’язані з усуненням раптових відмов і позаплановими ремонтно-відновлювальними роботами. Визначення найнагрітіших частин АТЕД за різних режимів роботи надасть необхідну інформацію для оцінки залишкового ресурсу АТЕД за тепловим старінням ізоляції.

1.3.5 Огляд існуючих систем моніторингу тягових електродвигунів

На даний час випробування електричних тягових машин проводиться відповідно до Інструкції Міністерства транспорту України «Випробування електричних машин рухомого складу на залізничному транспорті» і згідно з ГОСТами:

- ГОСТ 25000-81. Машини електричні обертові. Загальні методи випробувань. Методи випробувань на нагрівання;
- ГОСТ 25941-83. Машини електричні обертові. Методи визначення втрат і коефіцієнта корисної дії;
- ГОСТ 11929-87. Машини електричні обертові. Загальні методи випробувань. Визначення рівня шуму.

Зазначена інструкція передбачає випробування електричної машини на надійність ізоляції методами визначення опору обмоток без відключення її від мережі. Ці випробування включають: вимірювання опору ізоляції обмоток відносно корпусу машини; вимірювання активного та реактивного опору обмоток; перевірку електричної міцності міжвиткової ізоляції обмоток. Варто зазначити, що для виконання цих випробувань електричну тягову машину необхідно знімати з рухомого складу для оцінки її технічного стану. Таким чином, ці методи випробувань можуть використовуватись лише як міжсервісні.

Отже, потрібна така система моніторингу, яка дозволить отримувати повну інформацію про температурний стан усіх вузлів електродвигуна, включаючи ті, що є недоступними для безпосереднього вимірювання в процесі експлуатації.

Проведені патентні дослідження дозволяють зробити висновок, що запропонована в роботі система не є першою у сфері моніторингу та контролю теплового стану електродвигунів. Існує низка патентних досліджень, що використовують непрямий розрахунок температур [4, 5, 6]. Температура визначається за аналоговою тепловою моделлю. Однак більшість моделей розраховують температуру обмоток електродвигуна у стаціонарних режимах роботи. З огляду на те, що температура цих вузлів електродвигуна в несталих

режимах може значно відрізнятися від температури теплової моделі, застосування запропонованих патентних рішень не дозволяє отримати повну картину теплового стану тягового електродвигуна для всіх елементів конструкції. Також важливо зазначити, що всі вони спрямовані на контроль теплового стану тягових електродвигунів постійного струму.

З огляду на сучасний розвиток електрорухомого складу в Україні та стратегію оснащення локомотивів тяговими електродвигунами змінного струму, виникає потреба в безперервному контролі та оцінці теплових навантажень, яким піддаються АТЕД, з метою своєчасного виявлення несправностей, пов'язаних із порушенням теплового стану. Для досягнення цієї мети необхідно вирішити завдання зі створення системи моніторингу теплового стану асинхронних тягових електродвигунів у реальних умовах експлуатації.

1.4 Постановка задачі розробки системи оцінки теплового стану

Виходячи з викладеного, завдання дослідження в цій роботі зводяться до наступного:

1. Розробити математичну модель теплового стану асинхронного тягового двигуна для сталого режиму роботи.
2. Розробити математичну модель теплового стану асинхронного тягового двигуна для несталих режимів роботи.
3. Визначити мінімальну кількість вихідних даних, які дозволяють оцінювати тепловий стан асинхронного тягового електродвигуна, необхідні для роботи теплової математичної моделі.
4. Дослідити вплив вхідних даних на тепловий стан асинхронного двигуна.
5. Розробити систему моніторингу теплового стану асинхронного тягового двигуна, що забезпечує безперервний контроль температур вузлів електродвигуна під час експлуатації.

2. Тепловий стан асинхронного тягового електродвигуна

Теплові процеси мають вирішальне значення під час експлуатації тягових електродвигунів. Нагрівання лежить в основі різних термохімічних, термофізичних і термомеханічних явищ, які можуть загрожувати цілісності конструкції. Поточні вимірювання температури в режимах експлуатації виконуються з метою запобігання аварійним ситуаціям, при цьому здійснюється порівняння досягнутих температур вузлів під час роботи машини з гранично допустимими. Важливо мати інформацію не тільки про величину досягнутої температури, але й про тривалість і частоту температурних впливів, швидкість нагрівання або охолодження тощо. Отримання такої інформації вимагає наявності в машині засобів для вимірювання температури. Як уже зазначалося, встановлення великої кількості термодатчиків є ускладненим. У зв'язку з цим оптимальним є отримання інформації про температурне поле машини розрахунковим методом.

Основним елементом системи прогнозування і контролю теплового стану електричної машини є її теплова математична модель, що дозволяє отримати картину температурного поля.

2.1 Огляд методів, що використовуються для обчислення температурного поля електричних машин

Наразі численні теоретичні розробки та застосовуваний математичний апарат дозволяють проводити тепловий розрахунок електричних машин з великою точністю. Завданням теплового розрахунку є визначення температури активних частин машини, точки з максимальною температурою, обчислення теплових потоків між суміжними елементами конструкції, тобто розрахунок температури в машині для усталеної роботи.

Серед аналітичних методів розрахунку теплового поля електродвигунів найбільше застосування мають такі методи:

- метод теплових параметрів;
- метод еквівалентних теплових схем;
- метод температурного поля.

Метод теплових параметрів (МТП) використовує принцип накладання, згідно з яким установлена перевищена температура міді обмотки, так само як і будь-якої іншої частини машини, представляється у вигляді суми часткових перевищень, обумовлених відповідними частковими втратами, що виділяються в інших частинах машин.

Положення МТП стали основою методу теплового розрахунку з використанням еквівалентних теплових схем, застосованих до машин постійного струму.

Другим методом є метод еквівалентних теплових схем (метод ЕТС). Розробка цього методу пов'язана зі спробою обійти труднощі розрахунку двовимірних і тривимірних температурних полів в активних частинах електричних машин. Рішення рівняння Пуассона для таких полів є досить складним. Теоретичне обґрунтування спрощення рішень двовимірних процесів теплопровідності в електричних машинах дав у 1931 році Зодерберг, який запропонував розглядати двовимірний потік тепла в пластині як результат взаємодії двох одномірних потоків, кожен з яких зазнає опору в розглядуваному напрямку. Результуючий тепловий потік у цьому випадку визначається як сума двох паралельних опорів по осях x і y. Сумування опорів здійснюється згідно з правилами складання опорів в електричних колах. При цьому припускається аналогія теплових і електричних потоків, що базується на єдиній формі рівнянь теплообміну (2.1) та електричного струму (закон Ома (2.2)).

$$P = \frac{\lambda S_{cp} \Delta}{\delta} = \frac{\Delta T}{R_\lambda} \tag{2.1}$$

$$I = \frac{k S_{cp} \Delta U}{l} = \frac{\Delta U}{R_e} \tag{2.2}$$

де $S_{ср}$ – середня площа теплопередавальної поверхні;

λ – коефіцієнт теплопровідності;

k – питома електрична провідність;

ΔU – різницю потенціалів на довжині l провідника з перетином S;

R_λ – тепловий опір даної ділянки шляху теплового потоку;

R_e – електричний опір.

У еквівалентних теплових схемах різниця температур відповідає різниці потенціалів U, теплові потоки – електричним струмам, а теплові опори – електричним опорам.

Друге рівняння методу еквівалентних теплових схем аналогічне рівнянню першого закону Кірхгофа і виражає факт, що при стаціонарних режимах у вузлах схеми не може відбуватися накопичення теплової енергії (2.3).

$$P = \sum_{i=1}^{n} q_i \tag{2.3}$$

де P – потужність теплового джерела;

q_i – тепловий потік в i-ї гілки, що відходить від теплового джерела.

Необхідно відзначити, що цей метод передбачає ряд припущень. При складанні схеми заміщення реальні розподілені джерела тепла та розподілені теплові опори замінюються невеликою кількістю зосереджених джерел і зосереджених еквівалентних теплових опорів, при цьому останні припускаються незалежними від величини теплового потоку. Це дозволяє застосувати в розрахунках добре розроблену теорію електричних ланцюгів, звести метод ЕТС до лінійних теплових ланцюгів і використовувати звичайні алгебраїчні методи. З урахуванням того, що теплові опори, визначені через параметри середовища (коефіцієнти теплопровідності та теплообміну, кінематичну в’язкість, теплоємність тощо), залежать від температури, при розрахунку за методом ЕТС

задаються заздалегідь орієнтовні температури, за якими визначають всі теплотехнічні параметри охолоджувальної середовища та матеріалів.

Особливістю методу є те, що в електричних ланцюгах зазвичай визначають струм, вважаючи напругу відомою. В методі ЕТС ставиться зворотна задача – за відомими величинами теплових джерел необхідно визначити їх температуру. На відміну від електричних ланцюгів, теплові ланцюги завжди зображуються розімкнутими.

При складанні еквівалентних теплових схем враховуються всі основні фактори, які впливають на температуру машини, але при цьому не повинно бути її надмірного ускладнення. Схема складається на основі аналізу експериментальних даних про розподіл теплових потоків і попередніх оцінок величин окремих теплових опорів. При складанні складних ЕТС, що складаються з кількох паралельних гілок, можливо вважати одну або кілька з гілок розірваними, і теплообмін у цьому напрямку можна не враховувати, якщо теплове опір однієї з гілок значно більше за інші.

Цей метод дозволяє розраховувати системи теплообміну будь-якої складності з досить малими похибками. Підвищення точності розрахунку можна досягти за рахунок збільшення кількості розглянутих елементів, на які розбивається електрична машина. При цьому є можливість знайти розподіл температури в елементах машини і визначити вузол, що має найвищу температуру. Точність теплових розрахунків залежить від таких факторів:

– точності визначення втрат джерел тепла;

– точності визначення коефіцієнта теплопередачі, який піддається значному коливанню, особливо з технологічних причин, під впливом появи повітряних проміжків, зміни якості пропитки і так далі;

– точності розрахунку коефіцієнта теплообміну, оскільки наявні емпіричні формули не можуть враховувати вплив усіх факторів і умов.

Застосування диференціальних рівнянь теплопровідності для ЕТС активних частин електричної машини на основі загальних законів теплообміну

стало основою методу температурного поля. Диференціальні рівняння дозволяють враховувати:

- граничні умови теплових зв'язків, встановлених за допомогою ЕТС;
- підігрів охолоджувальної середовища;
- асиметрію по довжині активних частин;
- конструктивні особливості в місцях переходу пазової частини обмотки в лобові.

Диференціальний підхід є гарною основою для проведення аналізу впливу параметрів на нагрів активних частин і дозволяє зробити ряд цінних практичних висновків. Використання цього методу дає можливість визначати температурні поля в елементах машини.

Слід зазначити, що розрахунок великих електричних машин за методом температурного поля має особливість, пов'язану з практичною відсутністю теплових потоків з однієї активної частини в іншу. Ця обставина дає можливість розділити активні частини великої електричної машини на елементи простішої геометричної форми, незалежні в тепловому відношенні одна від одної. В малих і середніх машинах, особливо в асинхронних двигунах, взаємний тепловий вплив, наприклад, ротора на статор, сердечника на обмотку і так далі, більш помітний. Тому в цих випадках спочатку розглядають ЕТС машини в цілому і визначають теплові потоки, а потім застосовують метод температурного поля для окремих елементів.

Другим підходом до розрахунку температурних полів електричних машин є застосування числових методів. До найбільш поширених серед них можна віднести метод кінцевих різниць (МКР), метод кінцевих елементів (МКЕ) та метод граничних елементів (МГЕ).

Останнім часом найбільше поширення отримали два числові методи розрахунку: МКЕ та МГЕ. У контексті задач електромеханіки МКЕ дозволяє розраховувати електричні, магнітні, температурні та інші поля. Суть методу кінцевих елементів полягає у представленні будь-якої неперервної функції, такої як векторний або скалярний магнітний потенціал, індукція, температура тощо,

апроксимованою дискретною моделлю, яка будується на множині кусочно-неперервних функцій, визначених на кінцевій кількості підобластей. Рішення рівнянь поля в МКЕ визначається з урахуванням умови мінімуму енергетичного функціонала або ортогональності нев'язки рівнянь поля та інтерполяційних функцій кінцевих елементів [7,8].

Сьогодні числові методи мають широке застосування. Визнання цих методів зумовлене значним прогресом швидкодіючих цифрових обчислювальних машин, які дозволили дослідникам вирішувати з високою точністю задачі визначення різних фізичних полів [7]. Без використання електронних обчислювальних машин (ЕОМ) такі розрахунки були б надзвичайно трудомісткими або взагалі неможливими.

Сьогодні на ринку CAE-систем існує ряд програмних пакетів, що дозволяють виконувати розрахунки температурних полів. Так, наприклад, можна навести програмний пакет, запропонований фірмою Integrated Engineering Software для розрахунку плоских і об'ємних електромагнітних і електростатичних полів.

Сьогодні реалізація розрахунків нестаціонарних теплових процесів стала можливою за допомогою програми Ansys Icepak, програмного комплексу ANSYS. Ansys Icepak є спеціалізованим програмним засобом для розробки електромеханічних і електронних пристроїв та елементів їх корпусів з метою оцінки теплових навантажень [9]. Однак для повноцінного використання вказаного програмного продукту необхідне наявність високопродуктивної та дорогої комп'ютерної техніки, а також часових ресурсів. Останні вимоги накладають суттєві обмеження і/або роблять неможливим реалізацію моніторингу теплового стану АТЕД за допомогою цього додатку.

Порівнюючи аналітичні та числові методи розрахунку, можна зробити висновок, що всі наведені методи мають як переваги, так і недоліки. Так, при використанні числових методів, які застосовуються у вищезазначених програмних комплексах, необхідно виконувати розрахунок для кожної

сукупності значень параметрів. Таким чином, загальну картину температурного поля часто можна отримати лише за допомогою великої кількості розрахунків.

В свою чергу, аналітичні методи розрахунку температурних полів дають змогу отримати загальне рішення, яке дозволяє скласти повне уявлення про вплив різних параметрів на поле машини без допомоги складної і достатньо дорогої обчислювальної техніки та програмного забезпечення, а також великої кількості часу.

Відповідно до поставленої задачі створення системи безперервного контролю теплового стану тягових асинхронних двигунів під час їх експлуатації оптимальним є застосування аналітичних методів розрахунку температурного поля. Використання методів МТП та ЕТС дозволить створити повне математичне описання теплових процесів, що відбуваються в електричній машині, і здійснювати їх розрахунок у реальному часі роботи електродвигуна на електровозі.

2.2 Математичний інструментарій для розробки теплової математичної моделі АТЕД

Використання методу еквівалентних теплових схем та методу температурного поля в сукупності дозволяє створити теплову математичну модель (ТММ) тягового асинхронного електродвигуна та врахувати особливості його роботи на електровозі [1], такі як:

- зміни навантаження на валу;
- коливання напруги живильної мережі;
- зміни частоти обертання ротора;
- параметри охолоджувального повітряного потоку примусового осьового охолодження;
- умови охолодження частин обмоток, пов'язані з використовуваними системами ізоляції;
- особливості конструкції тощо.

Оскільки втрати енергії відбуваються всередині елементів конструкції електричної машини, її температурне поле є полем з внутрішніми джерелами теплоти, яке можна описати рівнянням теплопровідності.

Для вирішення рівняння теплопровідності необхідно знати закон руху охолоджувальних середовищ у системі охолодження машини. Типова система будь-якої електричної машини являє собою складну сукупність каналів, причому не лише нерухомих, а й обертових. При цьому для визначення швидкостей руху охолоджувальних середовищ та витрат теплоносіїв необхідно скористатися методами теоретичної та прикладної гідродинаміки.

Велике значення має оцінка енергетичних характеристик процесу охолодження, або термодинамічний аналіз систем охолодження. При цьому в разі природного охолодження електричних машин, тобто з використанням природного навколишнього середовища, для аналізу достатньо враховувати лише перший закон термодинаміки.

Дослідження систем охолодження передбачає глибоке вивчення конструкцій електричних машин та основних законів електромеханіки, які визначають формування поля втрат енергії в об'ємі машини.

Для створення коректної ТММ, що забезпечує повну картину поля, необхідно мати надійні дані про розподіл втрат, властивості матеріалів, швидкість та напрямок переміщення охолоджувального повітря через двигун. Отримати необхідні дані можна з результатів вентиляційних та електромагнітних розрахунків АТЕД.

2.3 Математична модель встановленого теплового стану АТЕД (на прикладі двигуна НТА-1200)

Тягові двигуни електровозів згідно з ГОСТ 2582-2013 розраховують на два номінальних режими роботи: годинний і тривалий. При цьому в обох режимах температура обмоток ТЕД, що обмежують по нагріву, може досягати допустимого ліміту, але не перевищувати його. Теплова математична модель

повинна виконувати розрахунок температур усіх вузлів електродвигуна в режимі реального часу для будь-якого режиму роботи електродвигуна.

Суть запропонованої моделі полягає в наступному: ТММ виконує розрахунок встановлених температур усіх вузлів двигуна $\upsilon_1 \ldots \upsilon_N$ за вхідними параметрами. При роботі двигуна в неустановлених режимах, таких як пуск двигуна, гальмування, зміна навантаження та частоти обертання машин, математична модель повинна коригувати температури елементів конструкції за значеннями температур «опорних вузлів», знятих з електродвигуна за допомогою термодатчиків. В якості таких вузлів можуть бути прийняті температура сердечника статора $\upsilon_{СС}$ і/або температура вентилюючого повітря на виході з електродвигуна $\upsilon_{ВИХ}$. Вибір цих вузлів для розрахунку температур елементів конструкції електродвигуна в неустановлених режимах ґрунтується на конструктивних особливостях двигуна.

Схема теплової моделі асинхронного тягового двигуна представлена на рисунку 2.1.

Представлена схема включає наступні позначення:

$\upsilon_В$ – температура вентилюючого повітря на вході в двигун;

$\upsilon_{ВИХ}$ – температура вентилюючого повітря на виході;

$\upsilon_1 ... \upsilon_N$ – температури вузлів двигуна, розраховані за ТММ АТЕД;

$\upsilon_{СС}$ – температура сердечника статора, знімається з вбудованого датчика температури.

Для створення теплової математичної моделі необхідно виконати достовірний та повний опис електродвигуна як теплового об'єкта.

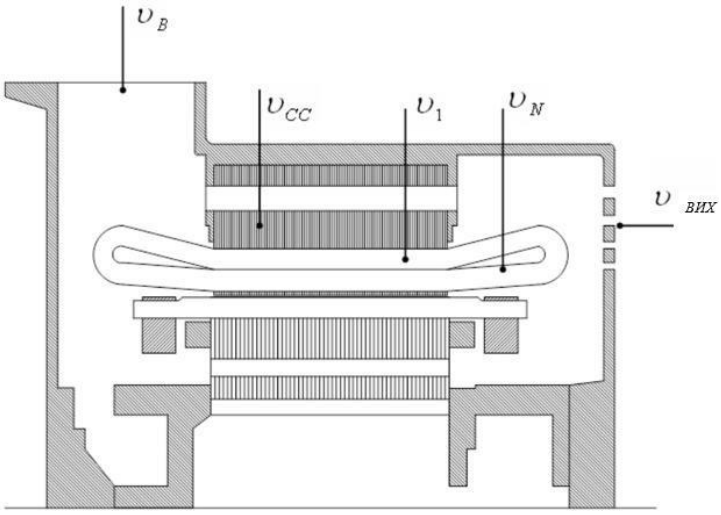


Рис. 2.1 – Структурна схема теплової моделі АТЕД

Експериментальні дослідження показали, що в великих електричних машинах нагрів ротора не впливає на температуру статора. Це зумовлено тим, що в машинах з аксіальною системою вентиляції охолоджуюче повітря рухається вздовж її осі по трьох паралельних гілках: через вентиляційні канали статора і ротора та через повітряний зазор. Тепло, що виділяється в обмотці статора та сердечнику статора, відводиться, головним чином, повітрям, що рухається в вентиляційних каналах статора, і тому не має помітного впливу на тепловий режим ротора. Відведення великої частини тепла з ротора також здійснюється через його вентиляційні канали.

Згідно з запропонованими схемами для розрахунку температур активних частин АТЕД типу НТА-1200 була складена теплова схема заміщення, що відображає фізичну картину теплових процесів, що протікають між окремими тепловідповідними елементами (рис. 2.2). При цьому електродвигун розглядався як схема з'єднання джерел тепла, теплових опорів і приймачів, об'єднаних в єдину мережу (схему) з загальними вузлами (точками) по внутрішньому повітрю двигуна.

До складу схеми входять основні нагріті частини АТЕД: статор і ротор з обмотками. Для визначення локального місця перегріву в тепловій схемі передбачена наступна деталізація: обмотки статора і ротора представлені трьома

частинами: активними частинами, розташованими в пазах статора і ротора машини, та двома лобовими частинами обмоток зі сторони подачі охолоджуючого повітря і з протилежної сторони – виходу підігрітого охолоджуючого повітря з електродвигуна. Така деталізація обмоток пов'язана з різними умовами їх охолодження. Окремо виділені сердечник статора, ротора і короткозамкнені кільця (КЗ).

Поступове підвищення температури охолоджуючого потоку повітря при проходженні різних ділянок машини враховано в тепловій схемі за допомогою лінії, яку можна розглядати як ряд базових точок з температурою, що зростає в напрямку руху потоку повітря. При цьому потік охолоджувальної середовища було розбито на елементи (області), що збігаються по довжині з відповідними охолоджуваними частинами машини. Для кожного елемента потоку приріст температури розраховується на основі теплового балансу.

На представленій схемі прийняті наступні позначення: P_{CC} – втрати в сердечнику статора; P_{C1} – втрати в лобовій частині обмотки статора зі сторони подачі повітря; P_{CP} – втрати в пазовій частині обмотки статора; P_{C2} – втрати в лобовій частині обмотки статора зі сторони протилежної подачі повітря; P_{CP} – втрати в сердечнику ротора; P_{P1} – втрати в лобовій частині обмотки ротора зі сторони подачі повітря; P_{PP} – втрати в пазовій частині обмотки ротора; P_{P2} – втрати в лобовій частині обмотки ротора зі сторони протилежної подачі повітря; P_{K1} – втрати в короткозамкнутому кільці зі сторони подачі повітря; P_{K2} – втрати в короткозамкнутому кільці зі сторони протилежної подачі повітря.

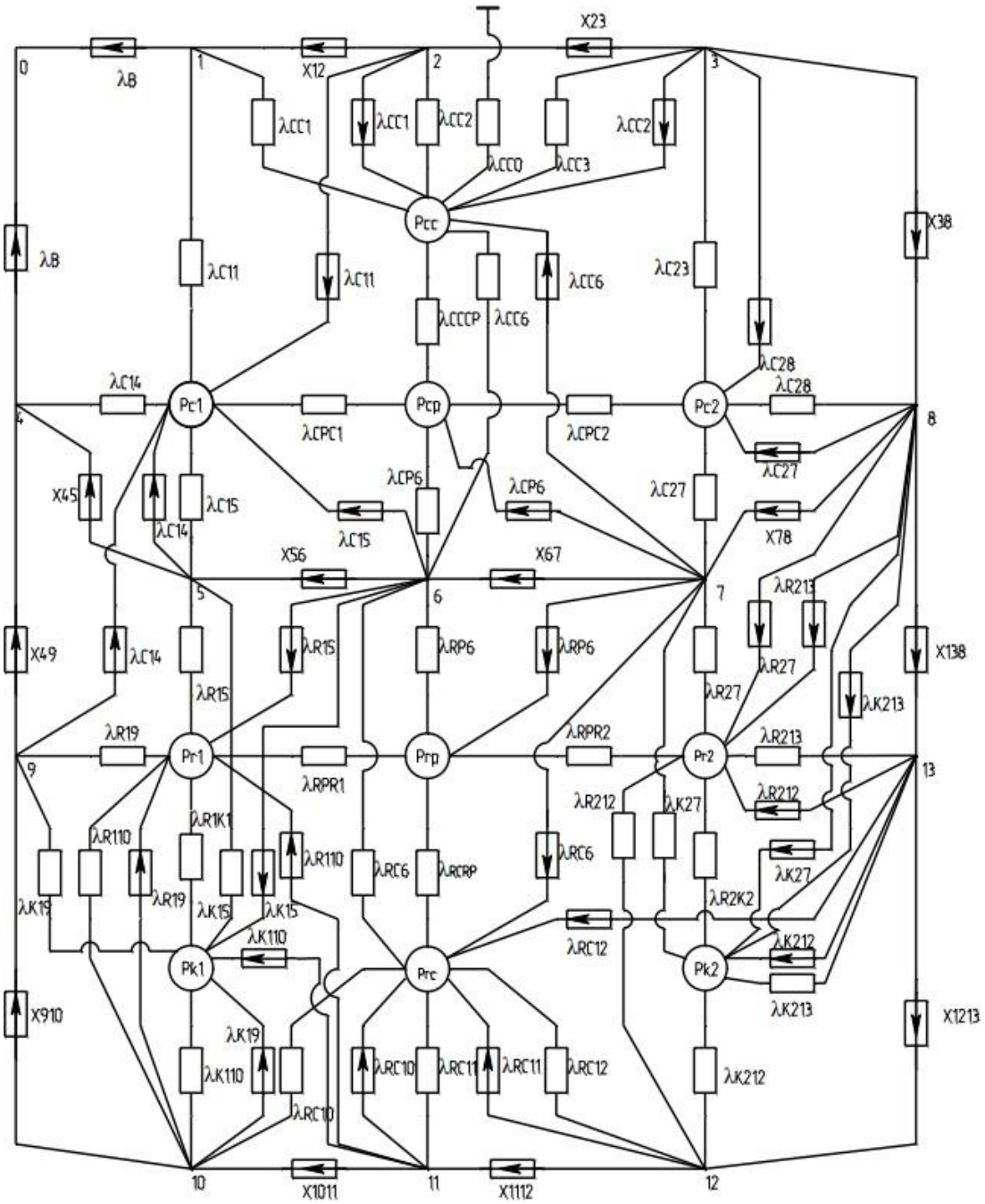


Рис. 2.2 – Теплова схема заміщення АТЕД типу НТА-1200

На розгорнутій схемі розглянуті наступні шляхи теплопередачі, представлені тепловими проводимостями λ (ТП):

1. Для статора: λ_{CPC1} – ТП між лобовою частиною зі сторони подачі повітря та середньою частиною обмотки статора; λ_{CPC2} – ТП між лобовою частиною зі сторони протилежної подачі повітря та середньою частиною обмотки статора; λ_{CCCP} – ТП між пазовою частиною обмотки статора та

сердечником статора; λ_{CC0} – ТП від сталі статора в навколишнє повітря через станину; λ_{C11} – ТП від лобової частини обмотки статора зі сторони подачі повітря в область над котушкою (1); λ_{C14} – ТП від лобової частини обмотки статора зі сторони подачі повітря в область переднього підшипникового щита (4); λ_{C15} – ТП від лобової частини обмотки статора зі сторони подачі повітря в область між котушкою та КЗ кільцем (5); λ_{C23} – ТП від лобової частини обмотки статора зі сторони протилежної подачі повітря в область над котушкою (3); λ_{C27} – ТП від лобової частини обмотки статора зі сторони протилежної подачі повітря в область між котушкою та КЗ кільцем (7); λ_{C28} – ТП від лобової частини обмотки статора зі сторони протилежної подачі повітря в область заднього підшипникового щита (8); λ_{CP6} – ТП від пазової частини обмотки статора в повітряний зазор (6); λ_{CC1} – ТП від сталі сердечника статора в область над котушкою обмотки статора зі сторони подачі повітря (1); λ_{CC2} – ТП від сердечника статора в вентиляційні канали статора (2); λ_{CC3} – ТП від сердечника статора в область над котушкою обмотки статора зі сторони протилежної подачі повітря (3); λ_{CC6} – ТП від сердечника статора в повітряний зазор (6).

2. Для ротора: λ_{RPR1} – ТП між лобовою частиною зі сторони подачі повітря та середньою частиною обмотки ротора; λ_{RPR2} – ТП між лобовою частиною зі сторони протилежної подачі повітря та середньою частиною обмотки ротора; λ_{RCRP} – ТП між пазовою частиною обмотки ротора та сталлю ротора; λ_{R15} – ТП від лобової частини обмотки ротора зі сторони подачі повітря в область між котушкою та КЗ кільцем (5); λ_{R19} – ТП від лобової частини обмотки ротора зі сторони подачі повітря в область переднього підшипникового щита (9); λ_{R110} – ТП від лобової частини обмотки ротора зі сторони подачі повітря в область під КЗ кільцем (10); λ_{R27} – ТП від лобової частини обмотки ротора зі сторони протилежної подачі повітря в область між котушкою та КЗ кільцем (7); λ_{R213} – ТП від лобової частини обмотки ротора зі сторони протилежної подачі повітря в область заднього підшипникового щита (13); λ_{R112} – ТП від лобової частини обмотки ротора зі сторони протилежної подачі повітря в область під КЗ кільцем (12); λ_{RP6} – ТП від пазової частини обмотки ротора в повітряний зазор (6); λ_{RC10} –

ТП від сталі сердечника ротора в область під КЗ кільцем зі сторони подачі повітря (10); λ_{RC11} – ТП від сталі сердечника ротора в вентиляційні канали ротора (11); λ_{RC12} – ТП від сталі сердечника ротора в область під КЗ кільцем зі сторони протилежної подачі повітря (12); λ_{RC6} – ТП від сталі сердечника ротора в повітряний зазор (6).

3. Для короткозамкнених кілець: λ_{R1K1} – ТП між лобовою частиною обмотки ротора та короткозамкнутим кільцем зі сторони подачі повітря; λ_{R2K2} – ТП між лобовою частиною обмотки ротора та короткозамкнутим кільцем зі сторони протилежної подачі повітря; λ_{K15} – ТП від КЗ кільця зі сторони подачі повітря в область між котушкою та КЗ кільцем (5); λ_{K19} – ТП від КЗ кільця зі сторони подачі повітря в область переднього підшипникового щита (9); λ_{K110} – ТП від КЗ кільця зі сторони подачі повітря в область під КЗ кільцем (10); λ_{K27} – ТП від КЗ кільця зі сторони протилежної подачі повітря в область між котушкою та КЗ кільцем (7); λ_{K213} – ТП від КЗ кільця зі сторони протилежної подачі повітря в область заднього підшипникового щита (13); λ_{K212} – ТП від КЗ кільця зі сторони протилежної подачі повітря в область під КЗ кільцем (12).

Система рівнянь, що описують процес передачі тепла в двигуні відповідно до еквівалентної теплової схеми, має вигляд:

$$P_{CC}=\upsilon_{CC}(\lambda_{CC1}+\lambda_{CC2}+\lambda_{CCO}+\lambda_{CC3}+\lambda_{CC6}+\lambda_{CCCP})-\upsilon_1\cdot\lambda_{CC1}-\upsilon_2\cdot\lambda_{CC2}-\upsilon_{ост}\cdot\lambda_{CC0}-$$

$$-\upsilon_3\cdot\lambda_{CC3}-\upsilon_6\cdot\lambda_{CCP}-\upsilon_{CP}\cdot\lambda_{CCCP};$$

$$P_{C1}=\upsilon_{C1}(\lambda_{C14}+\lambda_{C11}+\lambda_{CPC1}+\lambda_{C15})-\upsilon_1\cdot\lambda_{C11}-\upsilon_{CP}\cdot\lambda_{CPC1}-\upsilon_5\cdot\lambda_{C15}-\upsilon_4\cdot\lambda_{C14};$$

$$P_{CP}=\upsilon_{CP}(\lambda_{CCCP}+\lambda_{CPC2}+\lambda_{CPC1}+\lambda_{CP6})-\upsilon_{C1}\cdot\lambda_{CPC1}-\upsilon_{CC}\cdot\lambda_{CCCP}-\upsilon_{C2}\cdot\lambda_{CPC2}-\upsilon_6\cdot\lambda_{CP6};$$

$$P_{C2}=\upsilon_{C2}(\lambda_{C23}+\lambda_{C28}+\lambda_{CPC2}+\lambda_{C27})-\upsilon_3\cdot\lambda_{C23}-\upsilon_{CP}\cdot\lambda_{CPC2}-\upsilon_8\cdot\lambda_{C28}-\upsilon_7\cdot\lambda_{C27};$$

$$P_{RC}=\upsilon_{RC}(\lambda_{RC6}+\lambda_{RCRP}+\lambda_{RC12}+\lambda_{RC11}+\lambda_{RC10})-\upsilon_6\cdot\lambda_{RC6}-\upsilon_{RP}\cdot\lambda_{RCRP}-\upsilon_{12}\cdot\lambda_{RC12}-$$

$$\upsilon_{11}\cdot\lambda_{RC11}-\upsilon_{10}\cdot\lambda_{RC10};$$

$$P_{R1}=\upsilon_{R1}(\lambda_{R19}+\lambda_{R15}+\lambda_{RPR1}+\lambda_{R110}+\lambda_{R1K1})-\upsilon_9\cdot\lambda_{R19}-\upsilon_5\cdot\lambda_{R15}-\upsilon_{RP}\cdot\lambda_{RPR1}-$$

$$-\upsilon_{10}\cdot\lambda_{R1K1}-\upsilon_{K1}\cdot\lambda_{RC10}$$

$$P_{RP}=\upsilon_{RP}(\lambda_{RPR1}+\lambda_{RP6}+\lambda_{RPR2}+\lambda_{RCRP})-\upsilon_{R1}\cdot\lambda_{RPR1}-\upsilon_{6}\cdot\lambda_{RP6}-\upsilon_{R2}\cdot\lambda_{RPR2}-\upsilon_{RC}\cdot\lambda_{RCRP};$$

$$P_{R2}=\upsilon_{R2}(\lambda_{R27}+\lambda_{R213}+\lambda_{RPR2}+\lambda_{R212}+\lambda_{R2K2})-\upsilon_{7}\cdot\lambda_{R27}-\upsilon_{13}\cdot\lambda_{R213}-$$

$$-\upsilon_{RP}\cdot\lambda_{RPR2}-\upsilon_{12}\cdot\lambda_{R212}-\upsilon_{K2}\cdot\lambda_{R2K2};$$

$$P_{K1}=\upsilon_{K1}(\lambda_{K19}+\lambda_{K15}+\lambda_{R1K1}+\lambda_{K110})-\upsilon_{9}\cdot\lambda_{K19}-\upsilon_{5}\cdot\lambda_{K15}-U_{R1}\cdot\lambda_{R1K1}-\upsilon_{10}\cdot\lambda_{K110};$$

$$P_{K2}=\upsilon_{K2}(\lambda_{K27}+\lambda_{K213}+\lambda_{R2K2}+\lambda_{K212})-\upsilon_{7}\cdot\lambda_{K27}-\upsilon_{13}\cdot\lambda_{K213}-$$

$$-\upsilon_{R2}\cdot\lambda_{R2K2}-\upsilon_{12}\cdot\lambda_{K212}. \qquad (2.4)$$

де X_{ij} – провідності, які враховують підігрів повітря. Ці провідності показують погіршення теплопровідності повітря в кожній повітряній області всередині машини.

Щодо складеної схеми електродвигуна НТА-1200, провідності X_{ij} для кожного вузла визначаються за виразами:

$$X_{12}=\lambda_{B}-\lambda_{C11}-\lambda_{CC1};\qquad X_{910}=\lambda_{B}-\lambda_{K19}-\lambda_{R19};$$

$$X_{23}=\lambda_{B}-\lambda_{CC2};\qquad X_{1011}=\lambda_{B}-\lambda_{K110}-\lambda_{RC10}-\lambda_{R110};$$

$$X_{45}=\lambda_{B}-\lambda_{C14};\qquad X_{1112}=\lambda_{B}-\lambda_{RC11};$$

$$X_{49}=\lambda_{B}-\lambda_{C14};\qquad X_{1213}=\lambda_{B}-\lambda_{RC12}-\lambda_{K212}-\lambda_{R212};$$

$$X_{56}=\lambda_{B}-\lambda_{C15}-\lambda_{K15}-\lambda_{R15};\qquad X_{138}=\lambda_{B}-\lambda_{K213}-\lambda_{R213};$$

$$X_{67}=\lambda_{B}-\lambda_{RP6}-\lambda_{CP6}-\lambda_{CC6}-\lambda_{RC6};\qquad X_{38}=\lambda_{B}-\lambda_{C28}.$$

$$X_{78}=\lambda_{B}-\lambda_{K27}-\lambda_{C27}-\lambda_{R27}; \qquad (2.5)$$

Система також містить рівняння, що визначають підігрів повітря в різних частинах електродвигуна при його русі вздовж осі машини:

$$P_{1}=\upsilon_{1}\cdot(\lambda_{B}+\lambda_{C11}+\lambda_{CC1})-\upsilon_{C1}\cdot\lambda_{C11}-\upsilon_{CC}\cdot\lambda_{CC1}=\upsilon_{B}\cdot\lambda_{B};$$

$$P_{2}=\upsilon_{2}\cdot(\lambda_{B}+\lambda_{CC2})-\upsilon_{C1}\cdot\lambda_{CC1}-\upsilon_{1}\cdot X_{12}-\upsilon_{CC}\cdot(\lambda_{CC1}+\lambda_{CC2});$$

$$P_{3}=\upsilon_{3}\cdot(2\cdot\lambda_{B}+\lambda_{CC3}+\lambda_{C23})-\upsilon_{2}X_{23}-\upsilon_{CC}(\lambda_{CC3}+\lambda_{CC2})-\upsilon_{C2}\cdot(\lambda_{C23}+\lambda_{C28})-\upsilon_{8}X_{38};$$

$$P_{4}=\upsilon_{4}\cdot(\lambda_{B}+\lambda_{C14})-\upsilon_{C1}\lambda_{C14}=\upsilon_{B}\lambda_{B};$$

$$P_5=\upsilon_5\cdot(\lambda_B+\lambda_{C15}+\lambda_{K15}+\lambda_{R15})-\upsilon_4\cdot X_{45}-\upsilon_{C1}\cdot(\lambda_{C14}+\lambda_{C15})-\upsilon_{K1}\cdot\lambda_{K15}-\upsilon_{R1}\cdot\lambda_{R15};$$

$$P_6=\upsilon_6\cdot(\lambda_B+\lambda_{CP6}+\lambda_{RP6}+\lambda_{RC6}+\lambda_{CC6})-\upsilon_{RP}\cdot\lambda_{RP6}-\upsilon_{RC}\cdot\lambda_{RC6}-\upsilon_{K1}\cdot\lambda_{K15}-\upsilon_5\cdot X_{56}-$$

$$-\upsilon_{C1}\cdot\lambda_{C15}-\upsilon_{CP}\cdot\lambda_{CP6}-\upsilon_{CC}\cdot\lambda_{CC6}-\upsilon_{R1}\cdot\lambda_{R15};$$

$$P_7=\upsilon_7\cdot(\lambda_B+\lambda_{K27}+\lambda_{C27}+\lambda_{R27})-\upsilon_{K2}\cdot\lambda_{K27}-\upsilon_{RC}\cdot\lambda_{RC6}-\upsilon_{RP}\cdot\lambda_{RP6}-\upsilon_6\cdot X_{67}-$$

$$-\upsilon_{CP}\cdot\lambda_{CP6}-\upsilon_{CC}\cdot\lambda_{CC6}-\upsilon_{C2}\cdot\lambda_{C27}-\upsilon_{R2}\cdot\lambda_{R27};$$

$$P_8=\upsilon_8\cdot(2\cdot\lambda_B+\lambda_{C28})-\upsilon_7\cdot X_{78}-\upsilon_{C2}\cdot(\lambda_{C28}+\lambda_{C27})-\upsilon_{K2}\cdot(\lambda_{K27}+\lambda_{K213})-\upsilon_{13}\cdot X_{138}-$$

$$-\upsilon_{R2}\cdot(\lambda_{R27}+\lambda_{R213});$$

$$P_9=\upsilon_9\cdot(\lambda_B+\lambda_{K19}+\lambda_{R19})-\upsilon_4\cdot X_{49}-\upsilon_{C1}\cdot\lambda_{C14}-\upsilon_{K1}\cdot\lambda_{K19}-\upsilon_{R1}\cdot\lambda_{R19};$$

$$P_{10}=\upsilon_{10}\cdot(\lambda_B+\lambda_{K110}+\lambda_{RC10}+\lambda_{R110})-\upsilon_9\cdot X_{910}-\upsilon_{K1}\cdot(\lambda_{K19}+\lambda_{K110})-\upsilon_{RC}\cdot\lambda_{RC10}-$$

$$-\upsilon_{R1}\cdot(\lambda_{R19}+\lambda_{R110});$$

$$P_{11}=\upsilon_{11}\cdot(\lambda_B+\lambda_{RC11})-\upsilon_{10}\cdot X_{1011}-\upsilon_{K1}\cdot\lambda_{K110}-\upsilon_{RC}\cdot(\lambda_{RC10}+\lambda_{RC11})-\upsilon_{R1}\cdot\lambda_{R110};$$

$$P_{12}=\upsilon_{12}\cdot(\lambda_B+\lambda_{RC12}+\lambda_{K212}+\lambda_{R212})-\upsilon_{11}\cdot X_{1112}-\upsilon_{RC}\cdot(\lambda_{RC11}+\lambda_{RC12})-\upsilon_{K2}\cdot\lambda_{K212}-$$

$$-\upsilon_{R212}\cdot\lambda_{R212};$$

$$P_{13}=\upsilon_{13}\cdot(\lambda_B+\lambda_{K213}+\lambda_{R213})-\upsilon_{12}\cdot X_{1213}-\upsilon_{RC}\cdot\lambda_{RC12}-\upsilon_{K2}\cdot(\lambda_{K212}+\lambda_{K213})-$$

$$-\upsilon_{R2}\cdot(\lambda_{R212}-\lambda_{R213}). \qquad (2.6)$$

Для зручності розрахунку температур система рівняння теплової схеми заміщення подається в матричній формі виду:

$$\langle\Lambda\rangle\times\langle\upsilon\rangle+\langle P\rangle=0 \qquad (2.7)$$

де $\langle\Lambda\rangle$– квадратна симетрична матриця взаємних власних провідностей схеми розміром 23х23;

$\langle\upsilon\rangle$ – матриця-стовпець невідомих температур розміром 23х1;

$\langle P\rangle$– вектор зведених джерел тепла розміром 23х1.

Реалізація цієї моделі здійснюється в середовищі MATLAB у матричній формі. Розв’язок цього рівняння має вигляд:

$$\langle \upsilon \rangle = -\langle \Lambda \rangle^{-1} \times \langle P \rangle \qquad (2.8)$$

де $\langle \Lambda \rangle^{-1}$ – обернена матриця провідностей.

Реалізована теплова математична модель в середовищі MATLAB дозволяє виконувати обчислення усталених температур різних вузлів ТЕД змінного струму, враховуючи температуру навколишнього середовища та продуктивність вентилятора повітряного примусового охолодження.

Розроблена теплова модель може застосовуватися для інших типів АТЕД і дозволяє в реальному часі розрахувати усталене теплове поле будь-якої машини при введенні відповідних параметрів.

2.4 Розрахунок нагрівання асинхронного тягового електродвигуна

Для правильного визначення величин теплопровідностей теплової математичної моделі необхідно мати уявлення про розподіл швидкостей руху повітря через елементи машини в кожному конкретному режимі її роботи, оскільки тепловий стан електродвигуна суттєво залежить від кількості охолоджувального повітря. З огляду на те, що двигун є складною сукупністю нерухомих і обертових каналів, для визначення швидкостей і витрат теплоносіїв необхідно скористатися методами теоретичної та прикладної гідродинаміки.

2.4.1 Вентиляційний розрахунок АТЕД

Згідно з класичними методами, вентиляційний розрахунок електричної машини зводиться до визначення гідравлічного опору системи охолодження *z*, втрат тиску Δp по тракту від входу охолоджувача в машину при тиску p_1 до виходу з неї при тиску p_2, а також швидкостей руху охолоджувача в каналах.

Як відомо, будь-яка ділянка вентиляційного тракту, так само як і будь-яка ділянка окремого вентиляційного каналу, має опір, у зв'язку з чим повний тиск повітря в кінці ділянки завжди менший, ніж на його початку, на величину необоротних втрат тиску. Незалежно від форми руху повітря (і для ламінарного, і для турбулентного рухів) втрати тиску обчислюються за формулою:

$$\Delta p = zQ^2 \tag{2.9}$$

Ця залежність встановлює зв'язок між падінням тиску Δp на гідравлічному опорі z та витратою Q в еквівалентній гідравлічній схемі аналогічно закону Ома в електричному колі. Еквівалентну гідравлічну схему можна розглядати як нелінійне електричне коло та застосовувати для її розрахунку методи, розроблені для електричних кіл, зокрема закони Кірхгофа.

У тих випадках, коли втрати тиску пропорційні квадрату витрати, коефіцієнт пропорційності z є постійною величиною. Якщо ж ця пропорційність насправді не дотримується, коефіцієнт потрібно брати таким, щоб формула залишалася правильною.

Коефіцієнт пропорційності z, який називають аеродинамічним опором, визначають за виразом:

$$z = \xi \frac{\rho}{2S^2} \tag{2.10}$$

де ξ – коефіцієнт місцевого гідравлічного опору;

ρ – щільність газу;

S – площа меншого із перерізів каналів.

Коефіцієнт z для кожного виду аеродинамічного опору визначається не тільки розмірами каналу та властивостями середовища, але й коефіцієнтом місцевого опору ξ. Визначення більшості коефіцієнтів місцевого опору можливе

лише за результатами обробки експериментальних досліджень, і їх значення наведені у спеціальній та довідковій літературі [7].

Вентиляційний тракт електричної машини в основному являє собою звуження, розширення та поворот повітряного потоку. Однак при проведенні вентиляційних розрахунків необхідно також враховувати, що для машин з охолоджувальними вентиляційними каналами існує втрата тиску при русі охолоджувальних речовин через них. Цей факт враховується введенням додаткового опору тертя в каналах.

Величини, що найчастіше використовуються при розрахунку аеродинамічних характеристик електричної машини, представлені далі.

Так, коефіцієнт опору тертя на ділянці каналу з незмінним перетином *S* пропорційний довжині ділянки l і обернено пропорційний гідравлічному діаметру каналу *d*:

$$\xi = \lambda \frac{l}{d} \tag{2.11}$$

Коефіцієнт місцевого опору повороту залежить від кута повороту струменя повітря і визначається за графічними залежностями.

Коефіцієнти місцевого опору звуження (2.12) та розширення струменя (2.13) охолоджувального потоку визначаються за залежностями відповідно:

$$\xi_{звуж} = 0,5\left(1 - \frac{S_2}{S_1}\right) \tag{2.12}$$

$$\xi_{роз} = \left(\frac{S_2}{S_1} - 1\right)^2 \tag{2.13}$$

При цьому в дужках завжди береться відношення меншої площі до більшої, тобто при визначенні коефіцієнта місцевого опору розширення береться

відношення площі, з якої виходить потік, до величини площі, в яку охолоджувальний потік потрапляє. Для коефіцієнта місцевого опору звуження береться зворотна залежність – відношення величини площі, в яку потрапляє потік, до величини площі, з якої потік виходить.

Розрахунок аеродинамічних опорів електричної машини *z* і рівняння рівноваги дозволяють визначити розподіл витрат по окремих гілках схеми. Таким чином, маючи інформацію про значення витрати на кожній з ділянок, величин гідравлічних опорів кожної ділянки та його геометричні розміри, можна виконати розрахунок швидкості руху газу в каналі, що дорівнює частці від ділення витрати на живе січення каналу.

$$\upsilon = \frac{Q}{S} \tag{2.14}$$

де Q – витрата охолоджувального газу;

S – площа перерізу каналу.

Величини швидкостей руху охолоджувального повітря в каналах електричної машини є допоміжною величиною для розрахунку теплопровідностей теплової схеми заміщення.

Тягові асинхронні електродвигуни мають незалежну систему вентиляції. Така система вентиляції характеризується інтенсивністю подачі охолоджувального газу або об'ємною витратою вентилятора. Об'ємна витрата охолоджувального газу – це необхідна кількість подаваємого газу, при якій не відбувається перегрів елементів конструкції електродвигуна.

Відповідно до розглянутого типу тягового асинхронного електродвигуна марки НТА-1200, який також має незалежну аксіальну систему вентиляції з подачею вентилюючого повітря зверху з боку, протилежного редуктору електродвигуна, і викидом через підшипниковий щит зі сторони редуктора (рис. 2.3), була розроблена вентиляційна схема заміщення.

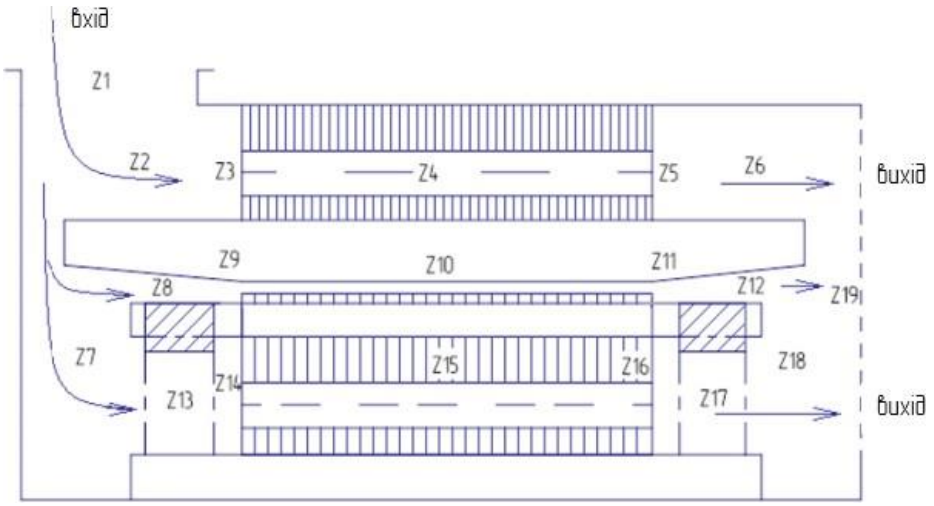


Рис. 2.3 – Напрямок руху вентиляційного повітря в електродвигуні НТА-1200

Схема заміщення (рис. 2.4) включає в себе всі шляхи та зміни перерізів або напрямку руху охолоджувального повітря всередині електродвигуна. Також на рисунку 2.5 наведені спрощена та перетворена гідравлічні схеми заміщення електродвигуна відповідно до послідовності вентиляційного розрахунку.

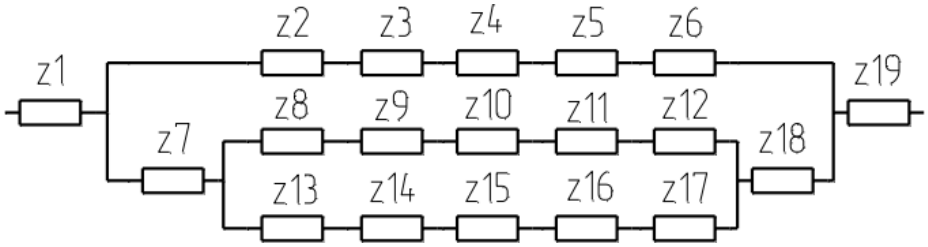


Рис. 2.4. – Еквівалентна гідравлічна схема системи охолодження АТЕД НТА-1200

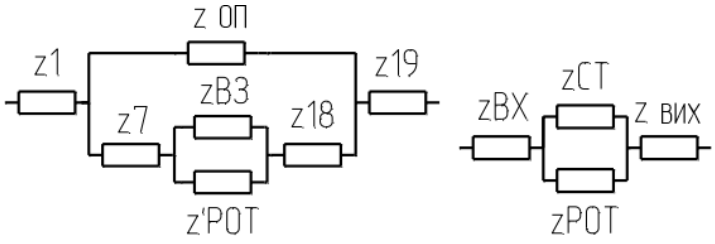


Рис. 2.5 – Перетворена еквівалентна гідравлічна схема

На представлених схемах використовуються такі позначення гідравлічних опорів, $Н \cdot с^2/м^8$:

*z*1 – вхід повітря через вентиляційний люк;

*z*2 – вхід у зону над лобовими частинами обмотки статора;

*z*3 – вхід повітря у вентиляційні канали статора;

*z*4 – тертя повітря у вентиляційних каналах статора;

*z*5 – вихід з вентиляційних каналів статора у зону над лобовими частинами обмотки статора;

*z*6 – вихід повітря із зони над обмотками статора;

*z*7 – вхід повітря у зону під лобовими частинами обмотки статора;

*z*8 – вхід у зону між лобовою частиною обмотки статора і КЗ кільцем;

*z*9 – вхід повітря у зону повітряного зазору;

*z*10 – тертя повітря в повітряному зазорі;

*z*11 – вихід повітря з повітряного зазору у зону між КЗ кільцем і обмоткою статора;

*z*12 – вихід повітря у зону за КЗ кільцем;

*z*13 – вхід у зону під КЗ кільцем ротора;

*z*14 – вхід повітря у вентиляційні канали ротора;

*z*15 – тертя у вентиляційних каналах ротора;

*z*16 – вихід повітря з вентиляційних каналів ротора;

*z*17 – вихід повітря у зону під лобовими частинами обмотки статора;

*z*18 – вихід із каналів повітря у зону підшипникового щита з області під обмоткою статора;

*z*19 – вихід повітря з підшипникового щита;

zCT – опір статора;

zВЗ – опір повітряного зазору;

z/РОТ – опір у каналах ротора;

zРОТ – опір ротора;

zВХ = z1 – вхідний опір;

zВИХ = z19 – вихідний опір.

Розрахунок еквівалентної гідравлічної схеми дозволив визначити швидкості охолоджувального повітря в різних гілках схеми. Результати розрахунку для номінального режиму роботи двигуна НТА-1200 наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Результати вентиляційного розрахунку АТЕД типу НТА-1200 для номінального режиму роботи

Канал уху повітря	Швидкість повітря, м/сек
Вентиляційні канали статора	26,73
Відносно лобових частин обмотки статора	3, 63
Між лобовими частинами обмотки статора та КЗ кільцями	1, 38
Повітряний зазор	15, 66
Під КЗ кільцем з боку подачі повітря	6, 88
Під КЗ кільцем з протилежної сторони подачі повітря	9, 53
Вентиляційні канали ротора	25, 00

Результати показують, що найбільш складні умови вентиляції мають області лобових частин обмотки статора та короткозамкнені кільця, розташовані в зоні повітряного зазору. Підвищення відведення тепла з цих поверхонь можна досягти, збільшивши потік охолоджувального повітря, що, в свою чергу, підвищить швидкість повітря в цих зонах, або шляхом збільшення частоти обертання ротора самого двигуна, що забезпечить кращу тепловіддачу завдяки більшому перемішуванню охолоджувального потоку.

2.4.2 Розрахунок тепловиділень у вузлах двигуна

Під час роботи АТЕД виділена теплота є втратами енергії, що виникають при взаємному перетворенні механічної та електричної енергії. Зазвичай ці втрати поділяють на чотири групи:

1. Механічні втрати: тертя в підшипниках і вентиляційні втрати (на переміщення охолоджувального середовища).
2. Електричні втрати в обмотках ротора і статора.
3. Магнітні втрати: гістерезисні та вихрові в сталі осердя статора, пов'язані з основним магнітним потоком.
4. Додаткові втрати: у сталі та в обмотках.

Втрати перших трьох груп прийнято називати основними. Додаткові втрати пов'язані з вищими гармоніками магнітного потоку, з витісненням його в пази та розсіюванням у зоні кінцевих частин. Розподіл цих втрат нерівномірний, що в окремих випадках може призвести до локальних перегрівів. Як зазначається в різних джерелах літератури, більша частина додаткових втрат зосереджена в поверхневому шарі товщиною кілька міліметрів, і їх питома величина може перевищувати питому величину основних втрат. Однак у процентному співвідношенні додаткові втрати асинхронного електродвигуна, живленого від перетворювача, відповідно до ГОСТ 25941-83 «Машини електричні обертові. Методи визначення втрат і коефіцієнта корисної дії», приймають рівними 1% від підведеної до двигуна потужності.

Загалом втрати є функцією координат, часу та струму навантаження. Однак у більшості практичних задач достатньо знати сумарні розподілені втрати в окремих елементах машини при тепловому режимі. Розрахунок тепловиділень у вузлах електродвигуна проводився відповідно до методик проєктування двигунів.

Відповідно до умовного поділу обмоток статора і ротора на елементарні вузли та з урахуванням постійного перерізу витків обмотки по її довжині, електричні втрати в них визначалися у пропорційному співвідношенні від повного опору котушки.

Електричні втрати у вузлах обмотки статора (2.15):

$$P_{Ci} = I_C^2 \cdot m_c \cdot \frac{L_i}{L_{OC}} \cdot R^{(20)} \cdot (1+\alpha(\upsilon_{yi} - 20)) \quad (2.15)$$

де P_{Ci} – електричні втрати в і-му вузлі обмотки статора;

I_C – фазний струм статора;

m_C – кількість фаз;

L_i – довжина обмотки і-го вузла;

L_{OC} – довжина обмотки статора;

$R^{(20)}$ – опір провідника в межах і-го вузла при температурі 20 °С;

α – температурний коефіцієнт опору матеріалу обмотки;

υ_{yi} – усталена температура і-го вузла.

Електричні втрати в обмотці ротора і короткозамкнених кільцях розраховані через приведені значення струмів до струму статора. Таким чином, електричні втрати для вузлів обмотки ротора розраховували за залежністю (2.16).

$$P_{Pi} = I_P^2 \cdot m_P \cdot \frac{L_i}{L_P} \cdot R^{(20)} \cdot (1+\alpha(\upsilon_{yi} - 20)) \quad (2.16)$$

де P_{Pi} – електричні втрати в і-му вузлі стрижня ротора;

I_P – струм у стрижні ротора;

m_P – кількість фаз ротора (кількість стрижнів);

L_P – довжина стрижня статора.

Електричні втрати в короткозамкненому кільці визначалися за аналогічною функцією:

$$P_{Ki} = I_P^2 \cdot m_P \cdot R^{(20)} \cdot (1+\alpha(\upsilon_{yi} - 20)) \quad (2.17)$$

Основні втрати в осерді статора розраховувалися на підставі [1] як сума втрат у ярмі та зубцевому шарі:

$$P_{Пі} = C_{П} \cdot \left(\frac{f_1}{50} \right)^{1,5} \cdot p_{10/50} \cdot \left(m_{ЗШ} \cdot B^2_{ЗШ} + m_{ЯС} \cdot B^2_{ЯС} \right) \quad (2.18)$$

де $C_П$ – коефіцієнт пульсацій, що враховує додаткові втрати від зубцевих гармонійних індукцій, тобто додаткові втрати холостого ходу;

$p_{10/50}$ – питомі втрати в осерді статора при частоті перемагнічування 50 Гц;

$m_{ЗШ}$ – маса сталі зубцевого шару осердя статора;

$m_{ЯС}$ – маса сталі ярма осердя статора;

$B_{ЗС}$ – індукція в зубцевому шарі осердя статора;

$B_{ЯС}$ – індукція в ярмі осердя статора.

При цьому розрахунок індукцій у статорі здійснювався через обчислення магнітного потоку в повітряному зазорі за методикою:

$$Ф_1 = \frac{E_{Ф1}}{1{,}11 \cdot k_ф \cdot f_1 \cdot w_1 \cdot k_{об}} \quad (2.19)$$

де $k_ф$ – коефіцієнт форми поля;

w_1, $k_{об}$ – кількість витків у фазі обмотки статора та обмотувальний коефіцієнт обмотки, що визначаються конструкцією електродвигуна.

Маючи значення потоку та знаючи геометрію електричної машини, значення індукції в ярмі осердя (2.20) та зубцевому шарі статора (2.21) визначаються за виразами:

$$B_{ЯС} = \frac{Ф_1}{2S_{a1}} \quad (2.20)$$

$$B_{ЗШ} = \frac{Ф_1}{S_{z1}} \quad (2.21)$$

де S_{a1} – розрахункове значення перерізу спинки статора;

S_{z1} – розрахункове значення перерізу зубцевого шару статора.

2.4.3 Розрахунок провідностей теплової схеми

Виникаючі в машині втрати виділяються у вигляді теплоти та передаються охолоджуючій середовищі через поверхню окремих частин безпосередньо або через інші, що межують з ними частини машини. При цьому джерела втрат, що контактують між собою або з неактивними деталями конструкції, розглядаються при граничних умовах 4-го роду. Усі нагріті елементи машин, контактуючи з охолоджуючою середовищем, віддають теплоту з поверхні при граничних умовах 3-го роду.

З урахуванням розгляду теплових потоків у елементах двигуна як взаємодії двох одновимірних потоків, провідності в кожному напрямку розглядаються як сума послідовних опорів від джерела теплоти до навколишнього середовища або іншого контактного вузла машини.

Теплові провідності теплової схеми заміщення розраховувалися з урахуванням довжини шляху теплового потоку, площі перерізу та питомого опору теплопровідності λ матеріалу (коефіцієнт теплопровідності) та опору теплоотдачі α (коефіцієнт теплоотдачі) з кожної поверхні тепловиділяючого вузла електродвигуна (в кожному напрямку теплового потоку):

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{l}{\lambda S} + \frac{1}{\alpha S}} \qquad (2.22)$$

У випадку складної ізоляції, що складається з кількох матеріалів, розрахунок проводився з урахуванням усіх шарів, їх товщин, наявності повітряних проміжків.

Розрахунок провідностей здійснювався згідно з рекомендаціями, щодо визначення коефіцієнтів теплоотдачі та теплопровідності. Для зручності теплового розрахунку при різних початкових умовах теплові провідності були представлені як функції від швидкості обертання двигуна та продуктивності вентилятора повітряного примусового охолодження (2.23).

$$\lambda_i = f\left(n,\ Q\right) \tag{2.23}$$

де n, Q – значення провідностей при номінальному режимі роботи АТЕД.

2.5 Порівняльний аналіз результатів розробленої теплової математичної моделі

Порівняння результатів розрахунку температурного поля асинхронного тягового електродвигуна за розробленою математичною моделлю було виконано за допомогою моделювання в додатку для розрахунку встановлених температурних полів програмного продукту ELCUT. Це додаток дозволяє змоделювати двовимірне встановлене температурне поле електродвигуна методом скінчених елементів.

У таблиці 2.2 наведені значення температур, отримані за допомогою розробленої теплової математичної моделі для параметрів експлуатації електродвигуна, близьких до номінальних за значенням струму статора I_f=336А та при збільшенні струму статора (I_f=600А) при збереженні інших параметрів.

Результати моделювання у випадку номінального струму статора показують класичний розподіл температури в електродвигуні.

Встановлене температурне поле при тих самих вихідних даних було отримано в середовищі ELCUT (рис. 2.6).

Розбіжності між результатами, отриманими за допомогою теплової математичної моделі, і моделюванням в середовищі ELCUT не перевищують 10 %. Найбільше відхилення між результатами моделювань було отримано для

вузлів електродвигуна, розташованих з протилежного боку від подачі охолоджувального повітря. Це можна пояснити тим, що моделювання в програмному комплексі ELCUT не дозволяє врахувати систему вентиляції. Аксіальна незалежна вентиляція, що застосовується в таких електродвигунах, сприяє кращій тепловіддачі з лобових частин машини зі сторони подачі охолоджувального потоку. У той час як великі габарити АТЕД сприяють підігріву охолоджувального повітря, що проходить вздовж осі машини, за рахунок теплоотдачі вузлів, розташованих по напрямку його руху, і погіршення теплоотдачі від лобових частин обмоток електродвигуна зі сторони виходу охолоджувального повітря.

Таблиця 2.2. Результати моделювання встановленого теплового стану асинхронного тягового двигуна за допомогою ТММ

Найменування вузла електродвигуна	Температура вузлів електродвигуна, °С	
	U=3320 В I_f=336 А t=20°С n=796 об/хв	U=3000 В I_f=600 А t=20°С n=1306 об/хв
Лобова частина ОС із боку подачі повітря	91, 4	121, 7
Пазова частина статора обмотки	106, 0	121, 3
Лобова частина ОС з боку протилежної подачі повітря	97, 3	128, 8
Сердечник статора	104, 8	104, 8
Лобова частина ОР з боку подачі повітря	84, 5	105, 2
Пазова частина обмотки ротора	88, 0	90, 1

Лобова частина ОР з боку протилежної подачі повітря	88, 8	113, 7
Сердечник ротора	84, 0	87, 7
Короткозамкнене кільце з боку подачі повітря	84, 5	105, 1
КЗ кільце з боку протилежної подачі повітря	88, 8	113, 6
Підігрів повітря в області 3, вихідна температура повітря	41, 2	56, 4

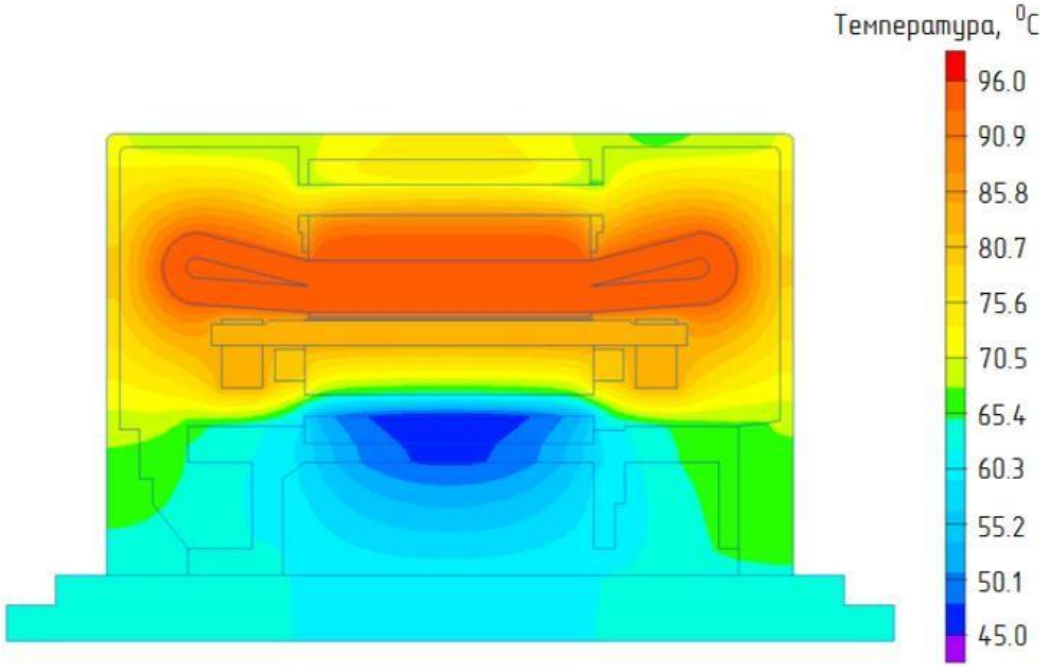


Рис. 2.6 – Моделювання теплового стану АТЕД при U=3320, I_f=336 А, t=20°С, n=796 об/хв

Моделювання температурного поля при збільшеному значенні струму статора (I_f=600 А) при збереженні інших параметрів за допомогою теплової математичної моделі (табл. 2.2) та програмування в середовищі ELCUT (рис. 2.7) також дає розбіжність не більше 10 %. Так само, як і при моделюванні теплового поля машини за номінальними параметрами, найбільша похибка отримана для

вузлів електродвигуна, розташованих з протилежного боку від подачі охолоджувального повітря.

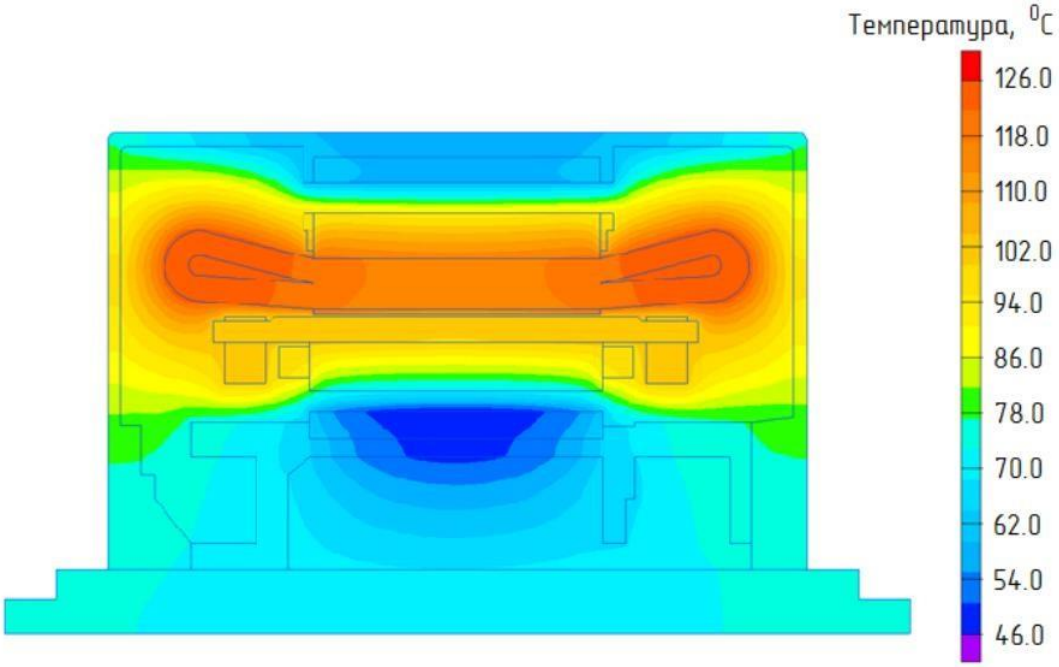


Рис. 2.7 – Моделювання теплового стану АТЕД при U=3000, I_f=600 А, t=20°С, n=1306 об/хв

Моделювання цього режиму роботи електродвигуна показує, що режими перевантаження сприяють перегріву лобових обмоток частин електродвигуна порівняно з пазовими частинами. Це є наслідком того, що тепловідведення з лобових частин при збереженні всіх інших вхідних параметрів електродвигуна залишається практично незмінним, при збільшенні електричних втрат в обмотці приблизно в 4 рази.

3 Математична модель теплових процесів асинхронного тягового двигуна для нестаціонарних режимів роботи

Практика експлуатації тягових електричних машин показує, що значний час вони працюють у нестаціонарних режимах. Умови експлуатації тягових електродвигунів пов’язані з постійними змінами навантаження і, як наслідок, змінами частоти обертання. Такі режими виникають під час запуску, відключення, гальмування електродвигунів. Вони супроводжуються швидким і небезпечним підвищенням температури окремих вузлів двигунів. У зв’язку з цим контроль температури ТЕД при нестаціонарних режимах є вкрай актуальним.

Розглянута у попередньому розділі теплова математична модель застосовна для визначення усталених температур вузлів АТЕД. Для визначення температур окремих вузлів електродвигуна за змінних умов роботи в цій моделі необхідно враховувати динаміку зміни температур. З цією метою слід створити математичну модель, яка розраховуватиме температури в нестаціонарних режимах АТЕД. При цьому пропонується використати дві методики:

- розрахунок температур вузлів АТЕД через коефіцієнти впливу;
- розрахунок нагріву АТЕД із використанням сталих нагріву конструктивних елементів.

Варто зазначити, що наведені методики по-різному враховують динаміку зміни температури. У першому випадку застосовується лінеаризація кривої зміни температури, а в другому враховується постійна часу нагріву.

Кожна з запропонованих методик передбачає наявність вузла електродвигуна – «опорного вузла», температура якого є відомою і за якою буде проводитися перерахунок температур інших вузлів. Таким вузлом може бути будь-який елемент АТЕД, безпосереднє вимірювання температури якого є найбільш зручним під час експлуатації електродвигуна. У даному випадку для досліджуваного асинхронного тягового електродвигуна як опорний вузол можуть використовуватися:

– температура повітря на виході з електродвигуна або різниця температур на виході та вході до електродвигуна – нагрів повітря в двигуні;

– температура осердя статора, корпусу електродвигуна або температура пазової частини обмотки статора АТЕД.

З огляду на те, що електродвигуни типу НТА-1200 оснащені датчиком температури, оптимальним є використання температури осердя статора тягового електродвигуна як опорного вузла.

3.1 Розрахунок нестаціонарних температур вузлів асинхронного тягового електродвигуна через коефіцієнти впливу

Розрахунок нестаціонарного температурного поля асинхронного тягового електродвигуна за допомогою коефіцієнтів впливу базується на використанні коефіцієнтів кореляції Пірсона. Відомо, що говорити про кореляційний зв’язок між окремими величинами можна тоді, коли кожному значенню однієї з них відповідає певний розподіл іншої величини. Коефіцієнти кореляції дозволяють встановити зв'язок між температурою опорного вузла та іншими розрахунковими температурами вузлів електродвигуна.

Таким чином, для розрахунку температур елементів конструкції АТЕД за розглянутим методом необхідно визначити коефіцієнти кореляції температур елементів конструкції машини відносно температури осердя статора. Розрахунок кореляційних залежностей температур можна здійснити за випадковою вибіркою з використанням теплової математичної моделі. Доцільно проводити цю вибірку за допомогою планування експерименту.

3.1.1 Планування експерименту для визначення кореляційних коефіцієнтів

Класична концепція планування експериментів плідно використовується для вирішення багатьох прикладних задач. Планування експерименту – це

процедура вибору кількості та умов проведення дослідів, необхідних і достатніх для вирішення поставленої задачі з потрібною точністю в обраній області.

Використання методу планування експерименту можливе для вирішення різноманітних завдань, таких як пошук оптимальних умов, побудова інтерполяційних формул, вибір суттєвих факторів, оцінка та уточнення констант теоретичних моделей (наприклад, кінетичних), вибір найбільш прийнятних з множини гіпотез щодо механізму явищ, дослідження діаграм склад – властивість.

Застосування планування експерименту підвищує ефективність використання експерименту в наукових дослідженнях.

Для створення випадкової вибірки теплової математичної моделі ефективним є її представлення як системи «чорна скринька», зображеної на рисунку 3.1.

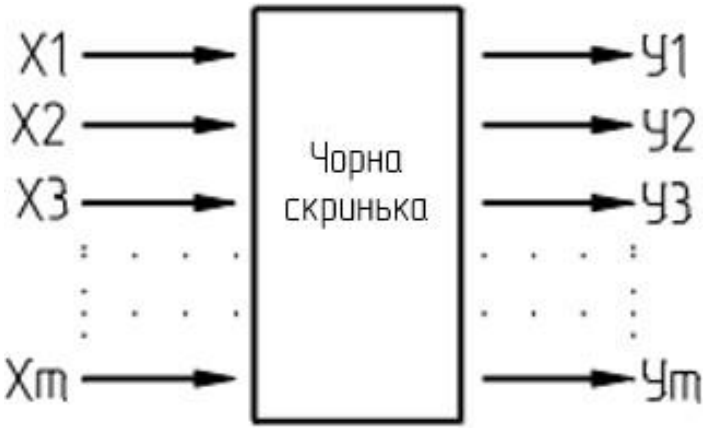


Рис. 3.1 – Схема «чорної скриньки»

Тут позначення *X1-Xm* представляють усі можливі способи впливу на поведінку «чорної скриньки» та називаються факторами експерименту. При проведенні розрахункового експерименту кожен із факторів може приймати кілька значень, які прийнято називати рівнями.

Стрілки справа, позначені буквами *У1-Уm*, показують вихідні характеристики цієї системи. Вони являють собою відгук «чорної скриньки» на зміну вхідних впливів і називаються параметрами або функціями відгуку.

Фіксований набір рівнів факторів (тобто встановлення кожного фактора на певний рівень) визначає один із можливих станів «чорної скриньки». Перебір усіх можливих станів дозволяє отримати множину різних станів даної «чорної скриньки», тобто необхідну вибірку шуканих температур.

Для отримання вибірки значень вихідних даних теплової математичної моделі необхідно визначити кількість незалежних вхідних параметрів (факторів експерименту).

Як зазначалося раніше, фактор експерименту – це параметр, який здатний впливати на об'єкт дослідження, тобто математичну теплову модель. При цьому виділені фактори повинні відповідати певним вимогам:

- бути керованими (значення зафіксовані на заданому рівні протягом усього експерименту);
- однозначними;
- сумісними (можливість здійснення всіх комбінацій факторів).

Як фактори експерименту для розробленої ТММ асинхронного тягового електродвигуна можна виділити 4 незалежних вхідних параметри (n=4), які впливають на значення втрат і теплопровідності електродвигуна:

I – струм статора;

f – частота мережі живлення;

$\upsilon_{вх}$ – температура вхідного повітря;

Q – витрата охолоджуючого повітря.

3.1.2 Вибір плану експерименту

Для створення необхідної вибірки потрібно здійснити перебір усіх можливих станів ТММ. При цьому важливим аспектом є вибір плану експерименту. На сьогодні найбільшого застосування в практичних дослідженнях мають поліноміальні регресійні моделі. Завдання підбору адекватної моделі зводиться до вибору порядку полінома. Основними

поліномами є поліноми першого та другого ступеня від n незалежних змінних. Відповідно, такі плани називаються планами першого та другого порядку.

Плани першого порядку використовуються в експериментах, що визначають оптимальні умови протікання процесу та локального відгуку. За допомогою планів першого порядку можна отримати досить точну апроксимацію механізму явищ. Існує кілька різновидів планів першого порядку: однофакторний (класичний) експеримент, повний факторний експеримент, дробовий факторний експеримент, насичений план (симплекс-план).

Варто зазначити, що плани першого порядку є досить простими в реалізації, але мають свої недоліки й не завжди дозволяють отримати адекватну регресійну модель. Наприклад, однофакторний експеримент, що зводиться до почергового варіювання кожного з факторів при стабілізації всіх інших факторів на певному рівні, володіє властивістю ротатабельності. Проте з погляду критеріїв оптимальності, пов’язаних із точнісними характеристиками регресійної моделі, такий експеримент є явно незадовільним. Саме тому він не знаходить широкого застосування в наш час.

У свою чергу, повний факторний експеримент типу 2^n, який задовольняє критерій ротатабельності планування та володіє хорошими властивостями, відповідаючи одразу декільком різним критеріям оптимальності, з практичної точки зору має суттєвий недолік, пов'язаний зі швидким зростанням кількості дослідів при збільшенні кількості факторів.

Дробовий факторний експеримент (ДФЕ) 2^{n-p} дозволяє отримувати лінійні регресійні моделі, а також моделі, що містять деякі взаємодії факторів при меншій кількості спостережень у порівнянні з ПФЕ. Цей ефект досягається завдяки певній додатковій апріорній інформації про властивості досліджуваного об'єкта. Ця інформація повинна бути сформульована у вигляді списку змінних – факторів та їх взаємодій, що становлять інтерес для подальшого дослідження, у вигляді списку суттєвих змінних. Список суттєвих змінних, або вигляд початкової регресійної моделі, може бути отриманий у результаті якісного вивчення фізичної суті досліджуваного явища, шляхом опитування фахівців,

аналізу літературних даних, коли з розгляду виключаються різного роду взаємодії, що явно не впливають на вихідну величину *У*.

Наразі найбільшого поширення набули регулярні плани ДФЕ типу 2^{n-p}. Такий тип експерименту дозволяє створити досить економний план, що забезпечує оцінку впливу суттєвих змінних, і не враховувати можливий вплив інших змінних.

Ще одним типом планів першого порядку є симплекс-плани. Вони використовуються, як правило, на етапі попереднього дослідження об'єкта, коли бажано застосовувати найбільш економні насичені плани, а також при побудові процедур пошуку екстремальних значень цільової функції.

У випадках, коли є необхідність ускладнення і підвищення точності моделі, або якщо заздалегідь відомо, що об'єкт дослідження має суттєво нелінійні властивості, найбільш оптимальним є використання плану другого порядку. Вони дозволяють отримувати регресійні моделі у вигляді повного квадратичного полінома (полінома другого ступеня).

Порівняно з планами першого порядку, плани другого порядку є більш складними за структурою, мають більше точок у спектрі плану і рівнів варіації для кожного фактора, потребують при реалізації збільшеної кількості дослідів. Для отримання квадратичної залежності кожен з факторів повинен змінюватися, щонайменше, на трьох рівнях.

Наразі відомо багато різновидів планів другого порядку, які відрізняються властивостями критеріїв оптимальності регресійних експериментів, а також простотою і наочністю їх отримання. Існує дві великі групи планів другого порядку: симетричні та несиметричні.

З практичної точки зору симетричні плани відрізняються більшою упорядкованістю в розташуванні точок, ніж несиметричні. Для них характерна подібність у програмі зміни кожного з факторів, а в деяких випадках і повна симетрія. Для симетричних планів справедливі досить прості співвідношення для оцінок коефіцієнтів регресії, їх вибіркових дисперсій.

Основним різновидом симетричних планів другого порядку є центрально-композиційні плани (ЦКП). Вони є історично найранішими і мають широке практичне застосування і в наш час.

Центрально-композиційні плани будь-якої модифікації складаються з трьох частин. Перша частина – основа або ядро плану – це ПФЕ 2^n або ДФЕ 2^{n-p}. Друга частина ЦКП – так звані «зіркові» точки, розташовані на координатних осях на відстані $\pm\alpha$ від центру експерименту. Загальна кількість таких точок дорівнює 2n. Третя частина ЦКП – досліди в центрі плану; кількість таких дослідів $N_0 \geq 1$. Існують ортогональні (ОЦКП) та ротатабельні (РЦКП) центрально-композиційні плани.

Ортогональність дозволяє рухатися по градієнту пропорційно коефіцієнтам лінійної моделі і незалежно інтерпретувати ефекти. Ротатабельність забезпечує гарантовану рівність дисперсій прогнозування при русі в будь-якому напрямку від центру експерименту.

Представлений огляд планів експериментів першого та другого порядку показав, що для створення більш повної вибірки температур найбільш прийнятним є застосування ортогонального центрально-композиційного плану другого порядку. З урахуванням того, що, як вже зазначалося, об'єкт дослідження має суттєво нелінійні властивості, застосування цього типу експерименту дозволить збільшити точність визначення коефіцієнтів кореляції температур.

3.1.3 Реалізація плану експерименту

З урахуванням вибраних факторів експерименту для здійснення планування експерименту та отримання вибірки значень вихідних даних теплової математичної моделі необхідно вибрати локальну область факторного простору, тобто визначитися з центром плану, областю планування, кількістю паралельних дослідів в кожній точці плану та порядком реалізації дослідів. При цьому повинні бути враховані такі обмеження:

– принципові обмеження для значень факторів, які не можуть бути порушені за жодних обставин;

– обмеження, пов'язані з техніко-економічними показниками;

– обмеження, пов'язані з конкретними умовами проведення процесу.

Вибір основного рівня. Основним рівнем плану експерименту можна назвати сукупність значень факторів, що дають найкращі умови для проведення експерименту. Значення факторів основного рівня є вихідною точкою для побудови плану експерименту.

У різних випадках є різні відомості про область найкращих умов. Якщо є відомості про координати однієї найкращої точки фактора, то необхідно розглядати її як основний рівень. Таким чином, для факторів: струм статора, частота живильного напруги основним рівнем приймаємо номінальні значення цих параметрів: I_C = 375 А; f = 65 Гц. Для фактора температура вхідного повітря координати найкращої точки не визначені. Цей фактор може приймати значення в досить великій області. Приймаємо як основний рівень рекомендоване значення температури для більшості теплових розрахунків: $\upsilon_{вх}$ = 25°С. Координати найкращої точки для фактора витрат повітря знаходяться на межі області фактора. Оптимальним значенням величини витрати охолоджуючого повітря є 95 м^3/хв. Зміна цього фактора в більший бік неможлива з технологічних причин. У цьому випадку основний рівень вибирається з деяким зсувом від найкращих умов. Приймаємо: Q = 70 м^3/хв.

Визначення інтервалів варіювання. Інтервалом варіювання факторів називається певне число (своє для кожного фактора), додавання якого до основного рівня дає верхній, а віднімання – нижній рівень фактора.

На вибір інтервалів варіювання накладаються природні обмеження зверху і знизу. У разі натурних випробувань інтервал варіювання не повинен бути меншим за ту помилку, з якою експериментатор фіксує рівень фактора, інакше верхній і нижній рівні виявляться нерозрізнюваними. З іншого боку, інтервал не може бути настільки великим, щоб верхній або нижній рівні опинилися за межами області визначення.

Для інтервалів також є градація. Розглядаються широкий, середній і вузький інтервали варіювання. Розмір інтервалу варіювання складає певну частку від області визначення фактора. За умови, що інтервал складає не більше 10% від області визначення, вважають його вузьким, не більше 30% – середнім, а в інших випадках – широким. Варто відзначити, що це поділ є умовним. У кожній конкретній задачі необхідно спеціально визначати ці поняття, які залежать не лише від розміру області визначення, але й від характеру поверхні відгуку та від точності фіксування факторів.

При виборі рішень враховуються відомості про кривизну поверхні відгуку та про діапазон зміни параметра оптимізації. Типовим рішенням є середній інтервал варіювання факторів. Вибраний інтервал варіювання для факторів наведений у таблиці 3.1.

Для кількості факторів n=4 для ОЦКП, побудованого на ядрі повного факторного експерименту ПФЕ 2^4, значення α=1,414. Значення факторів у «зіркових точках» наведені в таблиці 3.1.

Кодування факторів експерименту. З урахуванням того, що всі фактори експерименту є розмірними величинами, причому розміри факторів різні, а числа, що виражають величини факторів, мають різні порядки, при реалізації плану експерименту прийнято працювати не з істинними значеннями факторів, а проводити попередню операцію кодування факторів, що представляє собою лінійне перетворення факторного простору. Кодування факторів в експерименті дозволяє спростити запис умов експерименту і обробку експериментальних даних.

Таблиця 3.1 – Значення факторів у «зіркових точках»

Фактори	x_j	Струм статора, I_C, А	Частота живильною мережі, f, Гц	Температура вхідного повітря, $\upsilon_{вх}$, °С	Витрата повітря, Q, м^3/сек

Умовне позначення	x_j	*X1*	*X2*	*X3*	*X4*
Основний рівень	x_{j0}	375	65	25	70
Інтервал	I_j	100	15	10	20
Верхній рівень	+1	475	80	35	90
Нижній рівень	-1	275	50	15	50
«Зіркові точки»	$+\alpha$	530	92	37	100
	$-\alpha$	265	46	12	40

Операції кодування здійснюється з урахуванням обраних раніше інтервалів варіювання факторів за формулою (3.1).

$$x_j = \frac{x_j - x_{j0}}{I_j} \qquad (3.1)$$

де x_j – кодоване значення фактора;

x_j – натуральне значення фактора;

x_{j0} – натуральне значення основного рівня;

I_j – інтервал варіювання;

j – номер фактора.

Кількість дослідів при реалізації експериментів на персональному комп'ютері можна визначити за (3.2)

$$N = 2^n + 2n + 1 = 2^4 + 2 \cdot 4 + 1 = 25 \qquad (3.2)$$

Матриця планування складена за правилами повного факторного експерименту і містить поєднання факторів *X1-X4*, їх квадрати значень, а також парні взаємодії цих факторів.

Проведення плану експерименту здійснюється для 23 вузлів теплової схеми заміщення. У результаті отримана вибірка значень температур вузлів двигуна при різних вхідних параметрах і їх поєднаннях, за якими можна провести розрахунки для визначення коефіцієнта кореляції Пірсона.

3.1.4 Перевірка відповідності отриманої вибірки

В результаті проведення обраного плану експерименту отримано необхідні дані (масив значень температур вузлів), які дозволяють здійснити перетворення теплової моделі матричного вигляду в функцію кількох змінних виду.

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + \ldots + b_n \cdot X_n + b_{12} X_1 X_2 + \ldots + b_{(n-1)} X_{(n-1)} X_n + b_{11} X_1^2 + \ldots + b_{nn} X_n^2 \quad (3.3)$$

Про придатність отриманого масиву температур для розрахунку коефіцієнтів кореляції можна говорити в тому випадку, якщо отримані функції температур вузлів електродвигуна описують математичну модель матричного вигляду в наведеному інтервалі з допустимою похибкою.

3.1.5 Розрахунок функції відгуку теплової математичної моделі

Розрахунок коефіцієнтів регресії b_i можна здійснити методом найменших квадратів (3.4). Завдяки ортогональності планування всі коефіцієнти регресії визначаються незалежно один від одного.

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^{N} X_{iu} Y_u}{\sum_{u=1}^{N} X_{iu}^2} \quad (3.4)$$

де i – порядковий номер стовпця в матриці планування;

X_{iu} – елементи відповідного стовпця.

Результати розрахунку коефіцієнтів регресії b_i для всіх вузлів теплової схеми дозволяють скласти рівняння регресії.

Однак слід зазначити, що значущість розрахованих коефіцієнтів не є однаковою. Виділення незначущих коефіцієнтів регресії можна здійснювати двома рівноцінними способами: перевіркою за *t*-критерієм Стьюдента або побудовою довірчого інтервалу. Перевірка значущості кожного коефіцієнта проводиться також незалежно. При використанні повного факторного експерименту або регулярних дробних реплік довірчі інтервали для всіх коефіцієнтів (в тому числі й ефектів взаємодії) рівні один одному.

Здійснюємо перевірку значущості коефіцієнтів регресії за *t*-критерієм Стьюдента. Суть цієї перевірки полягає в розрахунку величини *t*-критерію кожного коефіцієнта регресії за виразом (3.5).

$$t = \frac{|b_i|}{s(b_i)} \tag{3.5}$$

де $s(b_i)$ – квадратична помилка коефіцієнта регресії (3.6).

$$s(b_i) = + \sqrt{s^2(b_i)} \tag{3.6}$$

Після обчислення значень *t*-критерію їх порівнюють з табличними. Згідно з планом експерименту значення *t*-критерію при 5 % рівні значущості і 20 ступенях свободи t=2,0860. При цьому коефіцієнти, які мають рівень значущості менше 5 %, можна відкинути.

З урахуванням відкинутих коефіцієнтів рівняння регресії мають наступний вигляд:

$$\upsilon_{C1} = 93,69 + 14,83 \cdot X1 + 18,41 \cdot X3 - 8,61 \cdot X4 + 12,01 \cdot X1^2 + 8,29 \cdot X2^2 +$$

$$+7,73\cdot X3^2+9,72\cdot X4^2;$$

$$\upsilon_{CP}=102,41+12,12\cdot X1+18,22\cdot X3-12,82\cdot X4+12,32\cdot X1^2+9,38\cdot X2^2+$$

$$+8,80\cdot X3^2+7,76\cdot X4^2;$$

$$\upsilon_{C2}=96,74+15,75\cdot X1+18,37\cdot X3-9,82\cdot X4+12,38\cdot X1^2+8,53\cdot X2^2+$$

$$+7,89\cdot X3^2+10,30\cdot X4^2;$$

$$\upsilon_{CC}=97,83+7,90\cdot X1+18,35\cdot X3-13,55\cdot X4+11,15\cdot X1^2+9,31\cdot X2^2+$$

$$+8,75\cdot X3^2+11,93\cdot X4^2;$$

$$\upsilon_{P1}=62,81+7,24\cdot X1+7,24\cdot X2+19,48\cdot X3+7,51\cdot X1^2+7,26\cdot X2^2+$$

$$+5,29\cdot X3^2+6,00\cdot X4^2;$$

$$\upsilon_{PP}=61,87+6,70\cdot X1+6,59\cdot X2+19,50\cdot X3+7,33\cdot X1^2+7,09\cdot X2^2+$$

$$+5,25\cdot X3^2+6,14\cdot X4^2;$$

$$\upsilon_{P2}=66,22+8,63\cdot X1+8,41\cdot X2+19,47\cdot X3+7,96\cdot X1^2+7,61\cdot X2^2+$$

$$+5,43\cdot X3^2+6,60\cdot X4^2+4,43\cdot X1\cdot X2;$$

$$\upsilon_{CP}=61,35+6,44\cdot X1+6,34\cdot X2+19,50\cdot X3+7,23\cdot X1^2+7,01\cdot X2^2+$$

$$+5,23\cdot X3^2+6,12\cdot X4^2;$$

$$\upsilon_{K1}=62,77+7,23\cdot X1+7,22\cdot X2+19,48\cdot X3+7,50\cdot X1^2+7,26\cdot X2^2+$$

$$+5,29\cdot X3^2+6,00\cdot X4^2;$$

$$\upsilon_{K2}=66,20+8,62\cdot X1+8,40\cdot X2+19,47\cdot X3+7,95\cdot X1^2+7,61\cdot X2^2+$$

$$+5,42\cdot X3^2+6,60\cdot X4^2+4,43\cdot X1\cdot X2;$$

$$\upsilon_1=49,68+19,49\cdot X3+5,42\cdot X1^2+5,34\cdot X2^2+4,84\cdot X3^2+5,41\cdot X4^2;$$

$$\upsilon_2=55,66+19,35\cdot X3+6,12\cdot X1^2+5,81\cdot X2^2+5,30\cdot X3^2+6,29\cdot X4^2;$$

$$\upsilon_3=58,17+19,35\cdot X3-3,16\cdot X4+6,45\cdot X1^2+6,05\cdot X2^2+5,38\cdot X3^2+$$

$$+6,82\cdot X4^2;$$

$$\upsilon_4=48,01+19,53\cdot X3+5,21\cdot X1^2+5,21\cdot X2^2+4,71\cdot X3^2+5,21\cdot X4^2.$$

$$\upsilon_5 = 49,62 + 19,51 \cdot X3 + 5,42 \cdot X1^2 + 5,31 \cdot X2^2 + 4,78 \cdot X3^2 + 5,54 \cdot X4^2;$$

$$\upsilon_6 = 52,52 + 19,48 \cdot X3 + 5,77 \cdot X1^2 + 5,23 \cdot X2^2 + 4,93 \cdot X3^2 + 6,17 \cdot X4^2;$$

$$\upsilon_7 = 55,29 + 19,45 \cdot X3 + 6,11 \cdot X1^2 + 5,74 \cdot X2^2 + 5,07 \cdot X3^2 + 6,74 \cdot X4^2;$$

$$\upsilon_8 = 54,92 + 19,49 \cdot X3 + 6,11 \cdot X1^2 + 5,84 \cdot X2^2 + 5,01 \cdot X3^2 + 6,49 \cdot X4^2;$$

$$\upsilon_9 = 48,45 + 19,53 \cdot X3 + 5,28 \cdot X1^2 + 5,26 \cdot X2^2 + 4,72 \cdot X3^2 + 5,27 \cdot X4^2;$$

$$\upsilon_{10} = 48,94 + 19,53 \cdot X3 + 5,34 \cdot X1^2 + 5,32 \cdot X2^2 + 4,74 \cdot X3^2 + 5,35 \cdot X4^2;$$

$$\upsilon_{11} = 50,62 + 19,54 \cdot X3 + 5,58 \cdot X1^2 + 5,53 \cdot X2^2 + 4,80 \cdot X3^2 + 5,60 \cdot X4^2;$$

$$\upsilon_{12} = 52,30 + 19,55 \cdot X3 + 5,81 \cdot X1^2 + 5,73 \cdot X2^2 + 4,85 \cdot X3^2 + 5,85 \cdot X4^2;$$

$$\upsilon_{13} = 52,76 + 19,55 \cdot X3 + 5,88 \cdot X1^2 + 5,79 \cdot X2^2 +$$

$$+ 4,87 \cdot X3^2 + 5,92 \cdot X4^2; \qquad (3.7)$$

де:

$$X1 = \frac{l_c - 375}{100}, \qquad (3.8)$$

$$X2 = \frac{f - 65}{15} \qquad (3.9)$$

$$X3 = \frac{\upsilon_{ex} - 25}{10} \qquad (3.10)$$

$$X4 = \frac{Q - 70}{20}. \qquad (3.11)$$

Використання критерію Стьюдента дозволило скоротити кількість коефіцієнтів b_i, що мають менше 5% рівень значимості.

3.1.6 Перевірка адекватності регресійної моделі

Перевірка адекватності регресійної моделі здійснюється з метою з’ясування правильності вибору виду рівняння регресії. Перевірці підлягає регресійна модель з відібраними (значущими) коефіцієнтами регресії.

Для з'ясування адекватності отриманої функції відгуку необхідно порівняти два параметри: залишкову дисперсію або дисперсію адекватності та дисперсію відтворюваності експерименту. Для адекватної регресійної моделі різниця між параметрами повинна бути випадковою величиною, тоді як залишкова дисперсія неадекватної моделі буде значно більшою за дисперсію відтворюваності експерименту. Порівняння двох оцінок дисперсій здійснюється за допомогою *F*-критерію:

$$F = \frac{s^2_{зд}}{s^2(y)} \tag{3.12}$$

де $s^2_{зд}$ – залишкова дисперсія, яка визначається за формулою (3.13).

$$s^2_{зд} = \frac{\sum_{u=1}^{N}\left(Y_u - Y_u\right)}{f_{зд}} \tag{3.13}$$

де Y_u – значення Y в u-му досвіді визначене за рівнянням регресії;

$f_{зд}$ – число ступенів свободи для визначення залишкової дисперсії (3.14).

$$f_{зд} = N - \left(n+1\right) = 25 - \left(4-1\right) = 20 \tag{3.14}$$

Зручність використання критерію Фішера полягає в тому, що перевірку гіпотези можна звести до порівняння з табличним значенням. У таблиці

використовується рівень значущості 0,05. При цьому, з відповідною довірчою ймовірністю модель можна вважати адекватною, якщо розраховане значення *F*-критерію не перевищує табличного значення. Значення критерію Фішера для проведених розрахунків становить *f*=1,6.

Проведена оцінка адекватності рівнянь, здійснена за допомогою критерію Фішера, показала, що заміна теплової моделі матричної форми на рівняння регресії з довірчою ймовірністю 0,95 адекватно відображає розрахунок температур у матричній формі. Таким чином, можна говорити про можливість застосування отриманої вибірки значень температур елементів конструкції АТЕД для розрахунку коефіцієнтів кореляції Пірсона.

3.1.7 Розрахунок коефіцієнтів кореляції Пірсона

Застосування статистичних методів, дозволяє провести розрахунок коефіцієнтів кореляції Пірсона. З урахуванням того, що кореляційна залежність можлива між двома випадковими величинами у випадку, коли кожному значенню однієї з них відповідає певний розподіл іншої величини, взаємозв'язок між цими випадковими величинами можна проаналізувати за допомогою діаграми розсіювання. Ця діаграма дозволяє встановити, чи є зв'язок між змінними, і який він за характером. На рисунку 3.2 наведено діаграму розсіювання деяких температур вузлів електродвигуна від температури осердя статора.

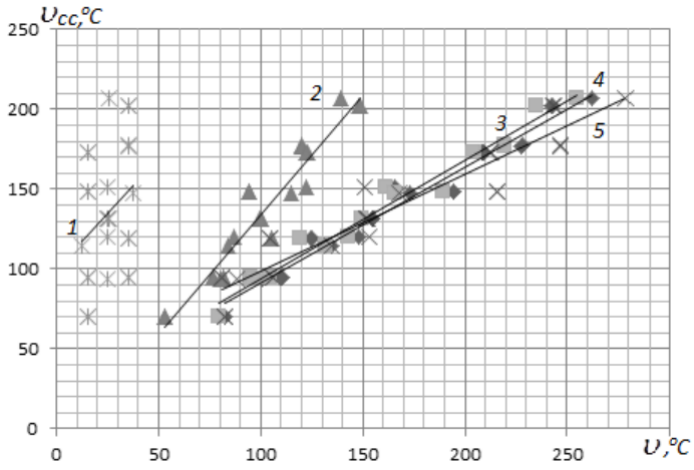


Рис. 3.2 – Взаємозв'язок між температурою осердя статора електродвигуна (υ_{cc}) і температурами вузлів АТЕД (υ): 1 – температура вихідного повітря електродвигуна; 2 – температура осердя ротора; 3 – температура лобової частини ОС з боку подачі охолоджувального повітря; 4 – температура пазової частини ОС; 5 – температура лобової частини ОС з боку виходу охолоджувального повітря

Аналіз наведеної діаграми показав позитивну лінійну залежність між представленими величинами.

Для оцінки лінійного взаємозв'язку між двома змінними X та Y використовується вибірковий коефіцієнт кореляції Пірсона (3.15).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \overline{X}\right)\left(y_i - Y\right)}{\left(n-1\right)S_X S_Y} \tag{3.15}$$

де $\overline{X}$ – середнє арифметичне для X;

Y – середнє арифметичне для $У$;

S_X – вибіркове середньоквадратичне для X;

S_Y – вибіркове середньоквадратичне для $У$;

n – обсяг вибірки.

Застосування цього коефіцієнта дозволяє визначити коефіцієнт зміни температур вузлів асинхронного тягового електродвигуна при зміні температури сталі осердя статора на 1 °С. Значення коефіцієнтів кореляції Пірсона представлені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Значення коефіцієнтів кореляції Пірсона

Найменування вузла електродвигуна	Коефіцієнт кореляції Пірсона
Лобова частина ОС з боку подачі повітря (υ_{C1})	0,78548746
Пазова частина статора обмотки (υ_{CP})	0,95236717
Лобова частина ОС з боку протилежної подачі повітря (υ_{C2})	0.78529899
Лобова частина ОР з боку подачі повітря (υ_{P1})	0,74957956
Пазова частина обмотки ротора (υ_{PP})	0,85981168
Лобовая часть ОР со стороны противоположной подаче воздуха (υ_{P2})	0,7519359
Сердечник ротора (υ_{CP})	0,87963868
Короткозамкнене кільце з боку подачі повітря (υ_{K1})	0,81952994
Короткозамкнене кільце з боку протилежної подачі повітря (υ_{K2})	0,81186933
Підігрів повітря в області 1 (υ_1)	0,26953404
Підігрів повітря в області 2 (υ_2)	0,30153559
Підігрів повітря в області 3, вихідна температура повітря (υ_3)	0,2665269
Підігрів повітря в області 4 (υ_4)	0,30970224
Підігрів повітря в області 5 (υ_5)	0,30738354
Підігрів повітря в області 6 (υ_6)	0,3037034
Підігрів повітря в області 7 (υ_7)	0,29982591
Підігрів повітря в області 8 (υ_8)	0,29615987
Підігрів повітря в області 9 (υ_9)	0,31175227
Підігрів повітря в області 10 (υ_{10})	0,30950416
Підігрів повітря в області 11 (υ_{11})	0,30857006

Підігрів повітря в області 12 (υ_{12})	0,29934467
Підігрів повітря в області 13 (υ_{13})	0,29841407

Отримані коефіцієнти дозволяють проводити коригування температур вузлів тягового електродвигуна залежно від отриманих значень температури осердя статора корпусу ТЕД.

Застосування цього коефіцієнта дозволяє оцінити вплив температур вузлів АТЕД на температуру осердя статора двигуна та виконати коригування отриманих у результаті моделювання усталених температур цих вузлів для нестаціонарного режиму.

3.1.8 Розрахунок нагрівання АТЕД за допомогою коефіцієнтів впливу

Під час роботи тягового асинхронного електродвигуна в нестаціонарному режимі приведення температур від усталених до поточних з урахуванням їхньої кореляції можна здійснювати за виразом (3.16).

$$\upsilon_I = \upsilon_{розрі} + (\upsilon_{ССзмін} - \upsilon_{ССрозр}) \cdot r_i \qquad (3.16)$$

де υ_i – скориговане значення температури і-го вузла АТЕД;

$\upsilon_{розрі}$ – усталене значення температури і-го вузла АТЕД, розраховане за тепловою математичною моделлю;

$\upsilon_{ССзмін}$ – значення температури осердя статора, виміряне на електродвигуні безпосередньо за допомогою термодатчика;

$\upsilon_{ССрозр}$ – значення усталеної температури сталі осердя статора, розраховане за ТММ;

υ_{ri} – коефіцієнт кореляції температур і-го вузла АТЕД та сталі осердя статора електродвигуна.

При цьому характер зміни температури під час нагрівання та охолодження набуває вигляду ламаної кривої замість експоненти. Це обумовлює високу

похибку, що має суттєве значення при теплових розрахунках. У результаті для визначення температур вузлів АТЕД в нестаціонарних режимах більш доцільним є застосування методу з використанням коефіцієнтів впливу.

3.2 Розрахунок температур вузлів ТЕД через постійні нагрівання

Основна ідея другого методу полягає у визначенні фактичного часу нагрівання опорного вузла, за яким проводиться перерахунок температур інших вузлів електродвигуна. Графічно ця методика розрахунку представлена на рисунку 3.3.

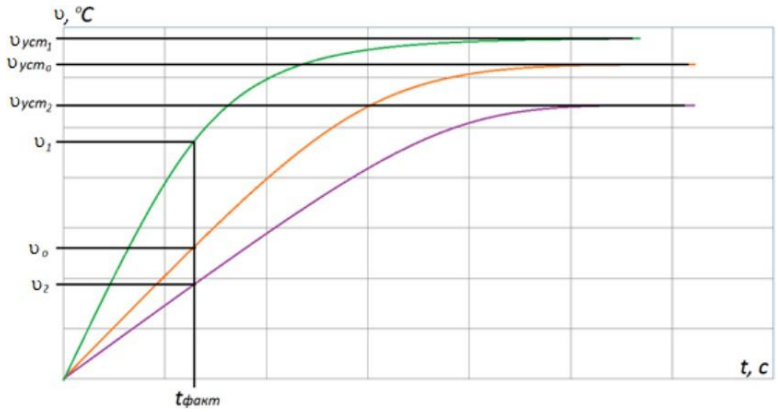


Рис. 3.3 – Методика розрахунку температур вузлів електродвигуна при роботі в нестаціонарних режимах

З використанням теплової математичної моделі розраховуються значення температур вузлів електродвигуна в усталеному режимі $\upsilon_{уст0}$, $\upsilon_{уст1}$, $\upsilon_{уст2}$. За фактичною температурою опорного вузла υ_0, наданою датчиком, та інформацією про постійну нагрівання цього елемента конструкції електродвигуна можна визначити час нагрівання відповідного елемента $t_{факт}$ за даних умов роботи. У свою чергу, за фактичним часом нагрівання, величинами усталених температур вузлів електродвигуна та постійними нагрівання цих елементів можна розрахувати їх температури υ_1, υ_2, які відповідають температурі опорного вузла υ_0.

Як опорний вузол тягового електродвигуна також використовується сердечник статора електродвигуна.

3.2.1 Визначення постійних нагріву елементів двигуна

В основі розрахунку постійних нагрівів лежить класична теорія нагрівання однорідних тіл, до яких можна віднести кожен елемент конструкції електродвигуна.

У проводених розрахунках прийняте таке припущення: теплопровідність матеріалу тіла достатньо велика, при цьому внутрішні перепади температури порівняно з перевищенням температури на поверхні зневажаються. Теплова інерція розглядуваного тіла характеризується його масою M і питомою теплоємністю с, постійну нагрівання тіла можна представити як:

$$T = \frac{c \cdot M}{\alpha \cdot S} \tag{3.17}$$

де c – питома теплоємність тіла;

M – маса тіла;

S – площа поверхні тіла;

α – коефіцієнт тепло віддачі тіла.

Добуток $\alpha \cdot S$ представляє собою теплові проводимості тепло віддачі поверхні тіла, зовнішньої теплової проводимості, розрахунок яких був проведений у тепловій математичній моделі АТЕД. Однак для того, щоб достатньо точно характеризувати тепловий стан реального об'єкта, необхідно також враховувати внутрішню теплову проводимість (3.18).

$$\lambda_{\lambda} = \lambda \cdot \frac{S}{\Delta} \tag{3.18}$$

Таким чином, підсумовуючи все вищесказане, теплову проводимість елемента конструкції АТЕД можна визначити (3.19).

$$T = \frac{cM}{(\lambda_\alpha - \lambda_\lambda)} \tag{3.19}$$

де λ_α – зовнішній тепловий опір, що характеризується конвективним теплообміном;

λ_λ – внутрішній тепловий опір, що характеризується теплопровідністю матеріалу.

3.2.2 Розрахунок нагрівання ТЕД із використанням постійних нагріву вузлів електродвигуна

Розрахунок температур вузлів електродвигуна в реальному часі до досягнення усталених значень можливий за наявною інформацією:

- температура опорного вузла: фактична, отримана шляхом вимірювання термопарою, і усталена, розрахована за допомогою ТММ;
- постійна нагріву цього опорного вузла. На основі вказаних даних стає можливим визначення часу фактичного нагріву цього вузла.

$$t_{ф} = -T \cdot \ln\left(\frac{\upsilon_0 - \upsilon_{уст0}}{\upsilon_{О.С.} - \upsilon_{уст0}}\right) \tag{3.20}$$

де T – стала нагріву сталі осердя статора з урахуванням умов його охолодження;

υ_0 – температура сталі осердя статора, виміряна за допомогою термопари;

$\upsilon_{УСТ0}$ – усталена температура сталі осердя статора, розрахована за допомогою ТММ;

$\upsilon_{О.С.}$ – температура навколишнього середовища.

Маючи значення фактичного часу, якому відповідає температура опорного вузла, за функціями кривих нагріву інших вузлів можна визначити фактичну температуру елементів конструкції електродвигуна.

$$\upsilon_i = \upsilon_{УСТi} \cdot \left(1 - e^{\frac{t_ф}{T_i}} \right) + \upsilon_{О.С.} \cdot e^{-\frac{t_ф}{T_i}} \qquad (3.21)$$

де υ_i – фактична температура і-го вузла;

$\upsilon_{УСТi}$ – усталена температура і-го вузла, розрахована за допомогою ТММ;

T_i – постійна нагріву і-го вузла з урахуванням умов його охолодження.

Підвищення температури повітря при його проходженні через електродвигун визначається з урахуванням отриманих значень фактичних температур вузлів двигуна з рівнянь теплового балансу ТММ.

$$\upsilon_i = \frac{\sum_{j=1}^{n} \upsilon_j \cdot \lambda_j + \upsilon_{i-1} \cdot X}{\sum_{j=1}^{n} \lambda_j} \qquad (3.22)$$

де υ_i – фактична температура підігріву охолоджувального повітря і-го вузла;

$\sum_{j=1}^{n} \upsilon_j \cdot \lambda_j$ – сума тепловиділень, що підігрівають область повітря і-го вузла;

$\upsilon_{i-1} \cdot X$ – підігрів повітря (і-1) вузла поточної області повітря машини;

$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j$ – сума теплопровідностей даної області повітря.

Представлені два методи розрахунку дозволяють визначати температури вузлів електродвигуна в нестаціонарних режимах.

3.3 Зіставлення методів, оцінка точності

Оцінка точності розроблених методів розрахунку температурного поля асинхронного тягового двигуна для нестаціонарних режимів роботи була виконана на основі експериментальних кривих нагрівання тягового електродвигуна НТА-1200. Часові залежності були зняті за таких вхідних параметрів:

- струм статора I_f=455 А;
- температура навколишнього повітря υ=12°С;
- витрата вентильованого повітря Q=66 м³/хв.

На рисунку 3.4 представлені криві нагрівання обмотки статора електродвигуна НТА-1200.

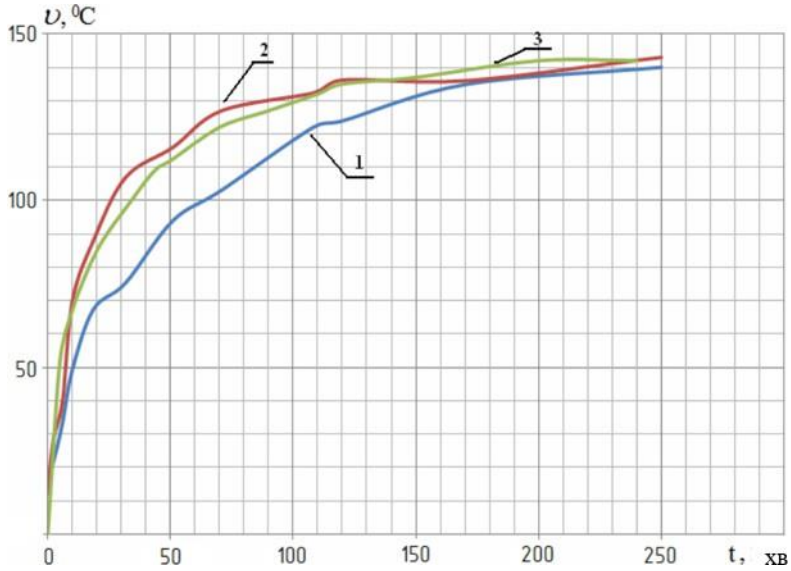


Рис. 3.4. Криві нагрівання обмотки статора тягового електродвигуна НТА-1200: 1 – розрахунок нагрівання за допомогою коефіцієнтів впливу; 2 – розрахунок нагрівання за допомогою теплових постійних; 3 – експериментальна крива нагрівання

Експериментальна крива нагрівання обмотки статора позначена номером 3. Криві 1 і 2 представляють залежності, отримані за допомогою моделювання двома раніше представленими методами. Як видно з графіка, крива 1, отримана

на основі використання для розрахунку нагрівання обмотки статора кореляційної залежності від температури осердя статора електродвигуна, має вигляд ламаної кривої. Через це похибка між експериментальними та розрахунковими даними є досить великою. Максимальна величина похибки становить 18%.

Залежність, отримана з використанням методики через теплові постійні, має більшу збіжність. Максимальна отримана похибка між розрахунковими даними цим способом і експериментальними даними не перевищує 8,3%.

4 Система моніторингу температурного режиму асинхронних тягових електричних двигунів у складі електровозів

4.1 Призначення системи моніторингу теплового стану тягових електродвигунів

Експлуатація рухомого складу відбувається в складних умовах, зокрема через постійне збільшення вагових норм перевезень. Іншим фактором, який ускладнює роботу електровозів, є кліматичні умови експлуатації. В результаті цього робота тягового асинхронного електродвигуна електровоза супроводжується постійними змінами вхідних параметрів: струму статора, частоти обертання. Тяговий електропривід має витримувати ці зміни без порушень експлуатаційних характеристик. Система моніторингу дозволяє отримувати інформацію про поточний тепловий стан електродвигуна, яка формується косвенно, на основі вхідних даних електродвигуна:

I_C – струм статора;

n – частота обертання двигуна;

f – частота живильної мережі;

U – напруга живильної мережі;

$\upsilon_{вх}$ – температура вхідного повітря;

Q – витрата охолоджувального повітря.

Ця система є комплексним пристроєм. Призначений моніторинг дозволить, за можливості, експлуатувати електрорухомий склад без теплових перевантажень тягового обладнання електровоза на основі отриманої інформації про теплове поле тягових машин. Зважаючи на те, що найбільш уразливим елементом будь-якої асинхронної електричної машини є її ізоляція, до 90 % пошкоджень, що призводять до виходу з ладу асинхронних електродвигунів, є пробій ізоляції, температурний фактор в основному визначає ресурс АТЕД. Відомо, що підвищення температури на 8°С ізоляційного матеріалу вдвічі зменшує термін її служби, а отже, й термін служби електродвигуна. Таким чином, інформація про

теплове поле тягового електродвигуна в умовах експлуатації ЕРС в складних умовах, при тепловій перевантаженні АТЕД, забезпечить можливість об’єктивної оцінки та прогнозування ресурсу ізоляції обмотки статора і двигуна в цілому. Крім того, система дозволить здійснювати оптимальне управління допоміжними машинами, що здійснюють охолодження тягових електродвигунів з метою оптимізації енергетичних процесів в електровозах з асинхронним тяговим електроприводом.

4.2 Принцип роботи системи моніторингу асинхронних тягових електродвигунів

Розроблювана система реалізується в обчислювальному блоці, в якому закладені раніше представлені теплові математичні моделі розрахунку температур вузлів електродвигуна, що враховують вхідні параметри роботи асинхронного тягового двигуна. Під час експлуатації локомотива сигнали з датчиків, встановлених на тяговий електродвигун, через певні інтервали часу перетворюються в електронному блоці і надходять в обчислювальний блок (персональний комп'ютер). На основі вхідних даних система за закладеною ТММ в обчислювальному блоці здійснює розрахунок теплових проводимостей, втрат в електродвигуні і, як результат, розрахунок значень усталених температур елементів конструкції АТЕД. Після цього значення температури сердечника статора порівнюється з отриманим значенням, отриманим з датчика температури, встановленого на електродвигуні. У разі невідповідності температур відбувається перерахунок значень температур решти вузлів двигуна за раніше запропонованими методиками. Якщо температура сердечника статора, виміряна за допомогою датчика, менша за розрахункову, коригування проводиться за другою методикою з використанням постійних нагрівів. Якщо значення температури з датчика більше за розрахункову температуру опорного вузла, використовується методика, що застосовується для розрахунку коефіцієнтів кореляції. Таким чином, система дозволяє за інформаційними значеннями

вхідних параметрів визначати загальну картину температурного поля двигуна в реальному часі. Використання цієї системи моніторингу дає можливість контролю температур вузлів машини, недоступних для безпосереднього вимірювання під час експлуатації, наприклад, таких вузлів як ротор і його обмотка.

Для реалізації системи моніторингу теплового стану АТЕД, з метою скорочення вхідних даних, необхідно мати інформацію про частоту струму статора та швидкість руху електровоза.

4.2.1 Регулювання частоти обертання тягового електродвигуна

Найбільш поширеним способом плавного регулювання частоти обертання трифазних асинхронних двигунів є зміна частоти напруги живлення f_1. При цьому слід зазначити, що магнітний потік у повітряному зазорі прямо пропорційний поданій напрузі U_1 і обернено пропорційний числу витків фази статора обмотки ω_1 і частоті живильної мережі f_1 (4.1).

$$\Phi = \frac{U_1}{c \cdot \omega_1 \cdot f_1} \tag{4.1}$$

де c – постійний коефіцієнт.

Для найкращого використання двигуна зміна частоти повинна супроводжуватися зміною амплітуди напруги живлення в тій же мірі U_1. Згідно з наведеною формулою, регулювання частоти живильної мережі f_1 призведе до зміни магнітного потоку машини. Зменшення f_1 викличе збільшення потоку, що може призвести до насичення магнітопроводу, різкому зростанню намагнічуючого струму і перегріву як сталі сердечника, так і обмоток статора. Збільшення ж частоти живильної напруги призводить до зменшення потоку Φ, що при постійному моменті викличе ріст струму в роторі і, відповідно, перегрів ротора при недовикористанні сталі.

Для недопущення цих ситуацій і збереження магнітного потоку незмінним необхідно регулювати напругу живлення статора при зміні його частоти.

Закон оптимального регулювання амплітудою і частотою напруги дозволяє здійснити два необхідних для електричної тяги способи реалізації: *M=const*, *P=const.*

Перший спосіб регулювання використовується для розгону електрорухомого складу до номінальної швидкості, при цьому напруга і потужність збільшуються до своїх номінальних значень пропорційно частоті струму статора.

$$\frac{U_1}{U_{1H}} = \frac{f_1}{f_{1H}}\sqrt{\frac{M}{M_H}} \quad \text{звідки:} \quad f_1 = \frac{f_{1H}}{U_{1H}}U_1 \tag{4.2}$$

$$f_1 = \frac{f_{1H}}{U_{1H}}U_1 = \frac{49,4}{2240}U_1 = 0,022 \cdot U_1$$

Режим *P=const* використовується в діапазоні від номінальної до максимальної частоти. Цей спосіб регулювання є більш сприятливим для двигуна, оскільки дозволяє до максимальної швидкості зберігати потужність, рівну номінальній, при постійній статичній перевантажуваності. Момент при цьому обернено пропорційний частоті і квадрату напруги.

Цей закон регулювання описується рівнянням (4.3).

$$\left(\frac{U_1}{U_{1H}}\right)^2 = \frac{f_1}{f_{1H}} \quad \text{звідки:} \quad f_1 = \frac{f_{1H}}{U_{1H}^2}U_1^2$$

$$\frac{U_1^2}{f_1} = \frac{U_{1H}^2}{f_{1H}} = const$$

$$f_1 = \frac{f_{1H}}{U_{1H}^2} U_1^2 = \frac{49,4}{2240^2} U_1^2 = 9,845 \cdot 10^{-6} \cdot U_1^2 \qquad (4.3)$$

Таким чином, для коректної роботи системи моніторингу теплового стану АТЕД необхідно постійно порівнювати значення швидкості руху електропоїзного складу з номінальним значенням для даного складу і приймати рішення щодо використання того чи іншого способу регулювання частоти та, відповідно, способу її визначення.

4.2.2 Розрахунок частоти обертання тягового двигуна для теплової системи моніторингу тягових електродвигунів

Згідно з класичною методикою проектування асинхронних тягових електродвигунів, представленою М.Д. Находкіним [2], частоту обертання тягового двигуна, який експлуатується на електрорухомому складі, можна визначити двома способами:

- через передавальне відношення (4.4);
- через обертальний момент (4.5).

$$n = \frac{5,3 \cdot \mu \cdot \nu_{лок}}{D_б} \qquad (4.4)$$

де F – передавальне число;

$\nu_{лок}$ – швидкість руху локомотива (км/год);

$D_б$ – діаметр бандажа середньо зношеного ведучого колеса по колу кочення (м).

$$n = \frac{2725 \cdot \nu_{лок} \cdot F}{M} \qquad (4.5)$$

де F – сила тяги (кН);

M – момент на валу тягового електродвигуна (Нм).

Частота обертання електродвигуна за кожним з способів для умов швидкості руху локомотива $v_{лок}$ = 42,9 км/год, сили тяги F = 78 кН і моменту на валу електродвигуна М =7748 Н·м дорівнює:

$$n = \frac{5{,}3 \cdot \mu \cdot \nu_{лок}}{D_б} = \frac{5{,}3 \cdot 6{,}294 \cdot 42{,}9}{1{,}210} = 1182{,}70 об / хв$$

за умови, що передатне відношення становить 6,294.

$$n = \frac{2725 \cdot \nu_{лок} \cdot F}{M} = \frac{2725 \cdot 42{,}9 \cdot 78}{7748} = 1176{,}78 об / хв$$

Розбіжність частоти обертання електродвигуна за двома методами не перевищує 2 %. Таким чином, існує можливість в системі теплового моніторингу АТЕД застосовувати обидва способи визначення частоти обертання тягового електродвигуна в залежності від наявних відомих вхідних параметрів.

4.2.3 Алгоритм роботи системи моніторингу теплового стану тягових електродвигунів змінного струму

Розроблена система моніторингу теплового стану має наступний алгоритм, представлений на рисунку 4.1.

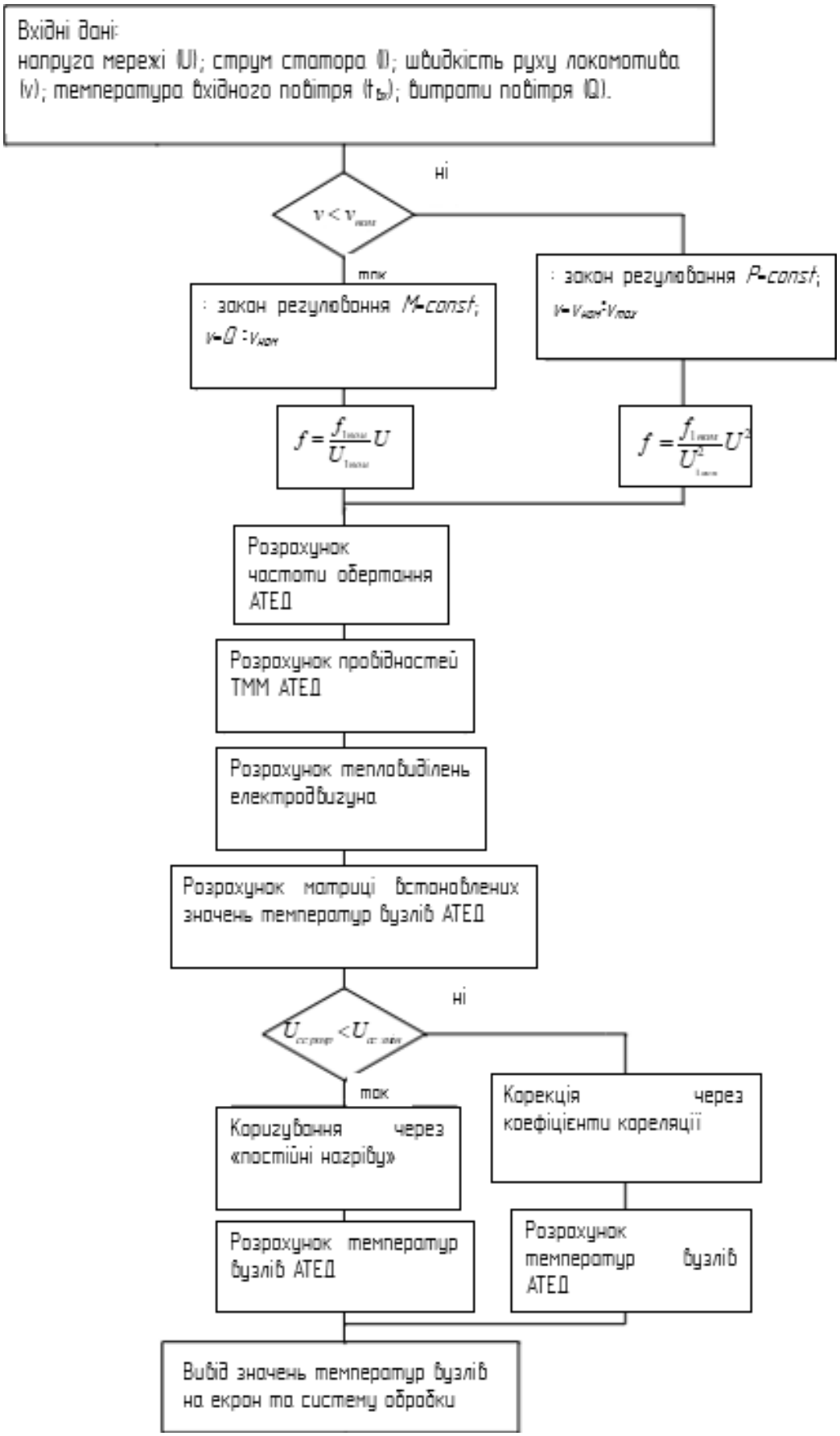


Рис. 4.1 – Алгоритм роботи системи моніторингу теплового стану тягових електродвигунів змінного струму

Згідно з представленим алгоритмом, система моніторингу має наступний принцип роботи:

Початковим етапом є зчитування вхідних даних у систему: струм статора, напруга живильної мережі, температура навколишнього середовища, витрата охолоджувального повітря, швидкість руху електровоза. На основі отриманих даних відбувається порівняння швидкості руху локомотива з номінальним значенням швидкості для визначення закону регулювання частотою і її визначення. Наступним етапом є визначення частоти обертання АТЕД за величиною швидкості локомотива. Потім проводиться розрахунок параметрів теплової математичної моделі: розрахунок проводимостей схеми заміщення та розрахунок втрат. Результатом проміжного розрахунку є визначення встановленого температурного поля машини при цих вхідних параметрах.

Для приведення результатів температур вузлів електродвигуна до реального значення, проводиться порівняння температури з датчика, розташованого в сердечнику статора, і температури цього елемента конструкції, розрахованої за допомогою ТММ. Це порівняння дозволяє здійснити перерахунок значень температур вузлів всього електродвигуна до реальних значень температур. З урахуванням порівняння вибирається той чи інший метод приведення температур.

Реалізація роботи цієї системи можливе при спільному використанні наступних засобів:

- фізичних – датчик напруги, датчик струму статора, два датчики температури, які вимірюють температуру навколишнього середовища та «опорного вузла» (температуру сердечника статора), датчик витрати охолоджувального повітря, аналогово-цифровий перетворювач, персональний комп'ютер;
- віртуальних – програмне забезпечення Matlab, встановлене на комп'ютері.

4.3 Апробація роботи системи моніторингу теплового стану асинхронних тягових електродвигунів

Апробація системи моніторингу теплового стану АТЕД проводилась на електровозі 2ЕС10 «Граніт» № 062. Електровози цієї марки оснащені асинхронним тяговим електроприводом марки Siemens (рис. 4.2). Конструктивне виконання, умови експлуатації, номінальні параметри застосовуваних асинхронних електродвигунів у цьому електровозі мають аналогію за габаритами, характеристиками застосовуваних матеріалів тощо з електродвигуном серії НТА-1200, для якого була розроблена система моніторингу. Приведення параметрів математичної моделі для досліджуваного двигуна НТА-1200 до двигуна, встановленого на електровозі, дозволило експериментально дослідити адекватність розробленої системи моніторингу теплового стану тягових електродвигунів змінного струму.

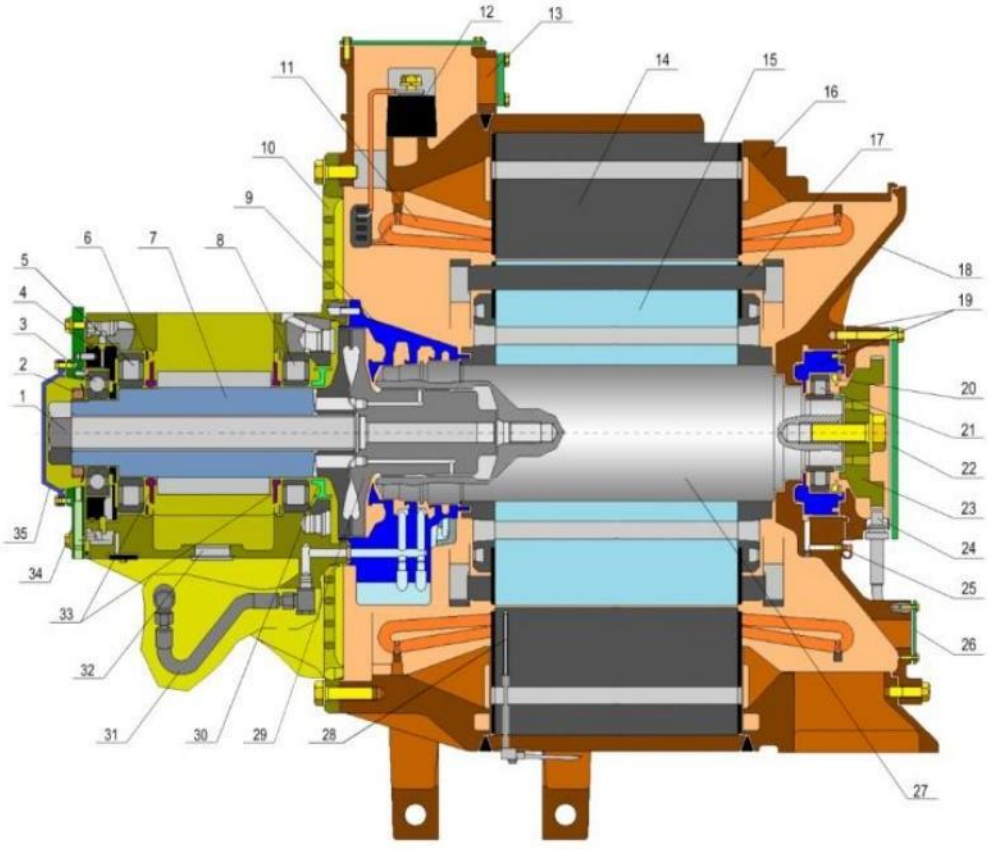


Рис. 4.2 – Конструкція тягового електродвигуна

Експлуатовані електровози «Граніт» оснащені системою визначення температур вузлів двигуна. Ця система дозволяє відстежувати дані температурного стану трьох вузлів кожного електродвигуна, встановленого на секції електровоза: пазова частина обмотки статора, сердечник статора та ротор. Значення температур зазначених вузлів виводяться на робочий екран машиністу електровоза.

Інформація про параметри роботи електровоза надається машиністу на дисплеї робочого місця, що дозволяє здійснювати їх контроль. Інтерфейс включає інформацію про напругу контактної мережі, струм статора кожного електродвигуна, створюваний момент кожної секції електровоза, а також швидкість руху складу. Виведення інформації можливе як у табличному, так і в графічному режимі.

Необхідно зазначити, що реалізована в цьому електровозі система визначення температур вузлів АТЕД має низку недоліків. Застосовуваний АТЕД на електровозі 2ЕС10 «Граніт», так само як і двигуни типу НТА-1200, обладнаний датчиком температури (позиція № 28), який вимірює температуру пазової частини обмотки статора. Таким чином, температура цього вузла передається безпосередньо з датчика і є достовірною. Визначення температур вузлів сердечника статора та ротора здійснюється за певними залежностями (пропорційне співвідношення між температурами обмотки статора і сердечника статора та ротора), закладеними в систему. Система не відстежує температури таких вузлів, як передні частини обмотки статора, а також розглядає ротор як єдиний вузол, без виділення обмотки та сердечника ротора як самостійних елементів конструкції АТЕД. Таким чином, ця система не дозволяє оцінювати тепловий стан електродвигуна в повному обсязі.

4.3.1 Апробація роботи теплової математичної моделі в режимі роботи, що встановився

Експериментальні дослідження роботи теплової математичної моделі були проведені під час експлуатації електровоза № 062 «Граніт». На рисунку 4.3 представлені експериментальні дані кривих руху на керівному підйомі перегону поїзда № 2522 загальною масою 6205 тонн з локомотивом 2ЕС10 № 062, секція «А» та асинхронного тягового електродвигуна № 083 72179. На рисунку представлені графіки зміни температур зазначених вузлів електродвигуна, а також швидкість руху та тягове зусилля, створюване цим асинхронним тяговим електродвигуном.

Згідно з представленими графіками вхідні параметри АТЕД склали:

- струм статора I_f =796 А;
- напруга контактної мережі U=2800 В;
- швидкість руху ЕРС v_l =55,1 км/год;
- температура навколишнього повітря υ_1=15 °С;
- витрата вентильованого повітря Q=90 м^3;
- тягове зусилля, створюване електродвигуном F=67,6 кН;
- момент на валу двигуна M=6992 Н·м.

Значення температур у цьому режимі склали:

- обмотка статора υ_{OC} =145°С;
- сердечник статора υ_{CC} =110°С;
- обмотки ротора υ_P =87 °С.

Розрахунок встановлених температур вузлів електродвигуна при тих самих вхідних параметрах за розробленою тепловою математичною моделлю для встановленого режиму показав результати, представлені в таблиці 4.1.

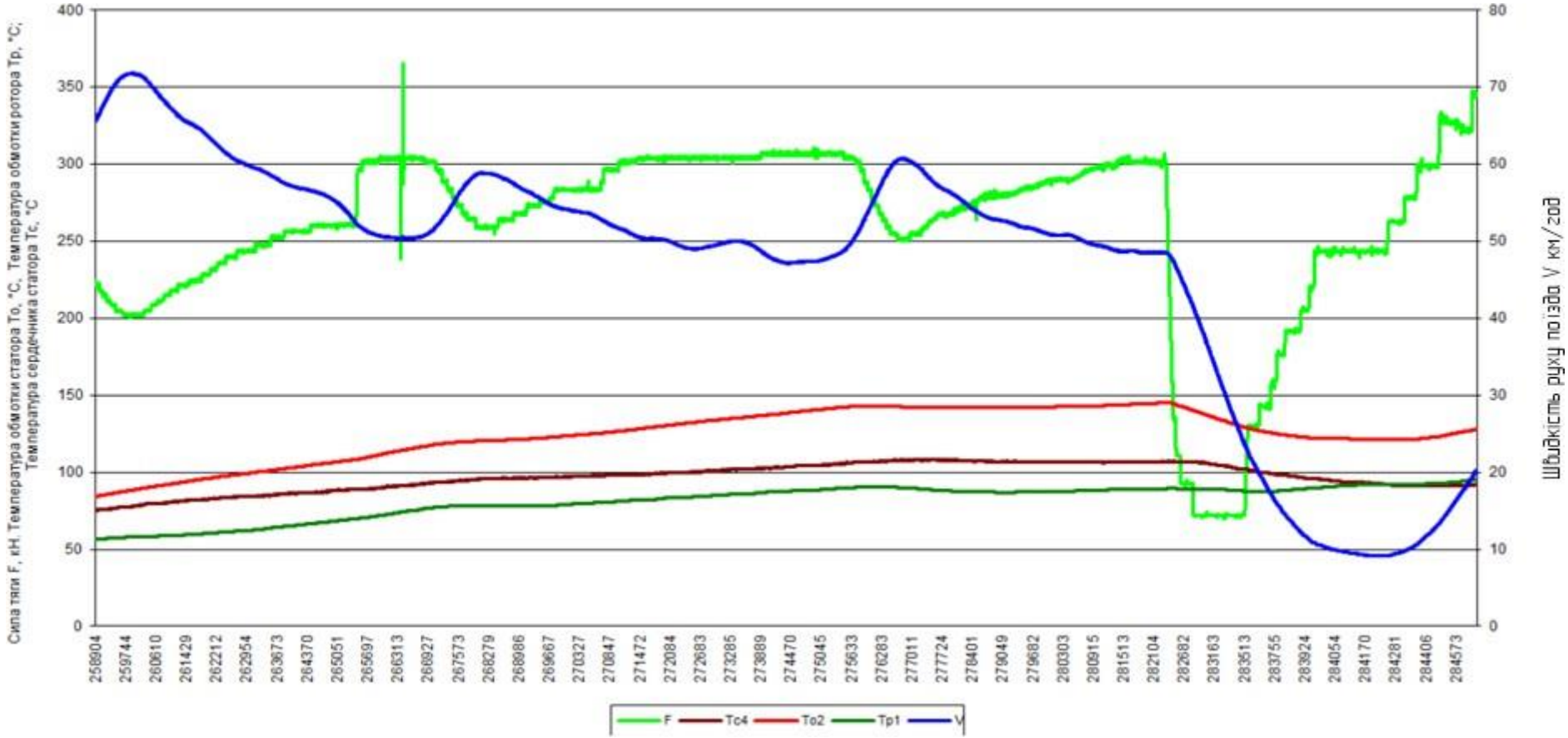


Рис. 4.3 – Криві руху електровоза 2ЕС10 №062 секції «А» з двигуном № 083 72179

Таблиця 4.1 – Результати математичного моделювання встановленого температурного поля електродвигуна

Найменування вузла електродвигуна	Температура вузлів електродвигуна, °С
Лобова частина ОС з боку подачі повітря (υ_{C1})	153,7
Пазова частина обмотки статора (υ_{CP})	140,9
Лобова частина ОС з боку протилежної подачі повітря (υ_{C2})	162,1
Сердечник статора (υ_{CC})	109,1
Лобова частина ОР з боку подачі повітря (υ_{P1})	101,1
Пазова частина обмотки ротора (υ_{PP})	83,6
Лобова частина ОР з боку протилежної подачі повітря (υ_{P2})	110,0
Сердечник ротора (υ_{CP})	79,2
Короткозамкнене кільце з боку подачі повітря (υ_{K1})	101,0
Короткозамкнене кільце з боку протилежної подачі повітря (υ_{K2})	109,9
Підігрів повітря в області 1 (υ_1)	31,8
Підігрів повітря в області 2 (υ_2)	39,9
Підігрів повітря в області 3, вихідна температура повітря (υ_3)	48,8
Підігрів повітря в області 4 (υ_4)	30,4
Підігрів повітря в області 5 (υ_5)	34,2
Підігрів повітря в області 6 (υ_6)	40,8
Підігрів повітря в області 7 (υ_7)	47,4
Підігрів повітря в області 8 (υ_8)	49,3
Підігрів повітря в області 9 (υ_9)	32,1
Підігрів повітря в області 10 (υ_{10})	33,8
Підігрів повітря в області 11 (υ_{11})	39,4
Підігрів повітря в області 12 (υ_{12})	45,0
Підігрів повітря в області 13 (υ_{13})	46,6

Похибки між значеннями температур, отриманими розрахунковим шляхом та експериментальними значеннями, склали для:

- обмотки статора – 3 %;
- осердя статора – 1 %;
- обмотки ротора – 5 %.

На рисунку 4.4 представлені криві руху на іншому керівному підйомі поїзда № 2343 загальною масою 6570 тонн з локомотивом 2ЕС10 № 062, секція «А», АТЕД № 083 72179. Рух ЕПС на ділянці шляху, що лежить у проміжку від 19839 км до 14094 км, відбувався при невеликому варіюванні вхідних параметрів, і його можна також вважати таким, що перебуває у встановленому тепловому стані тягового електродвигуна.

У таблиці 4.2 наведено вибірку експериментальних і розрахункових значень температур обмотки статора, осердя статора та обмотки ротора за кілометражем. Також розраховано похибку між отриманими даними.

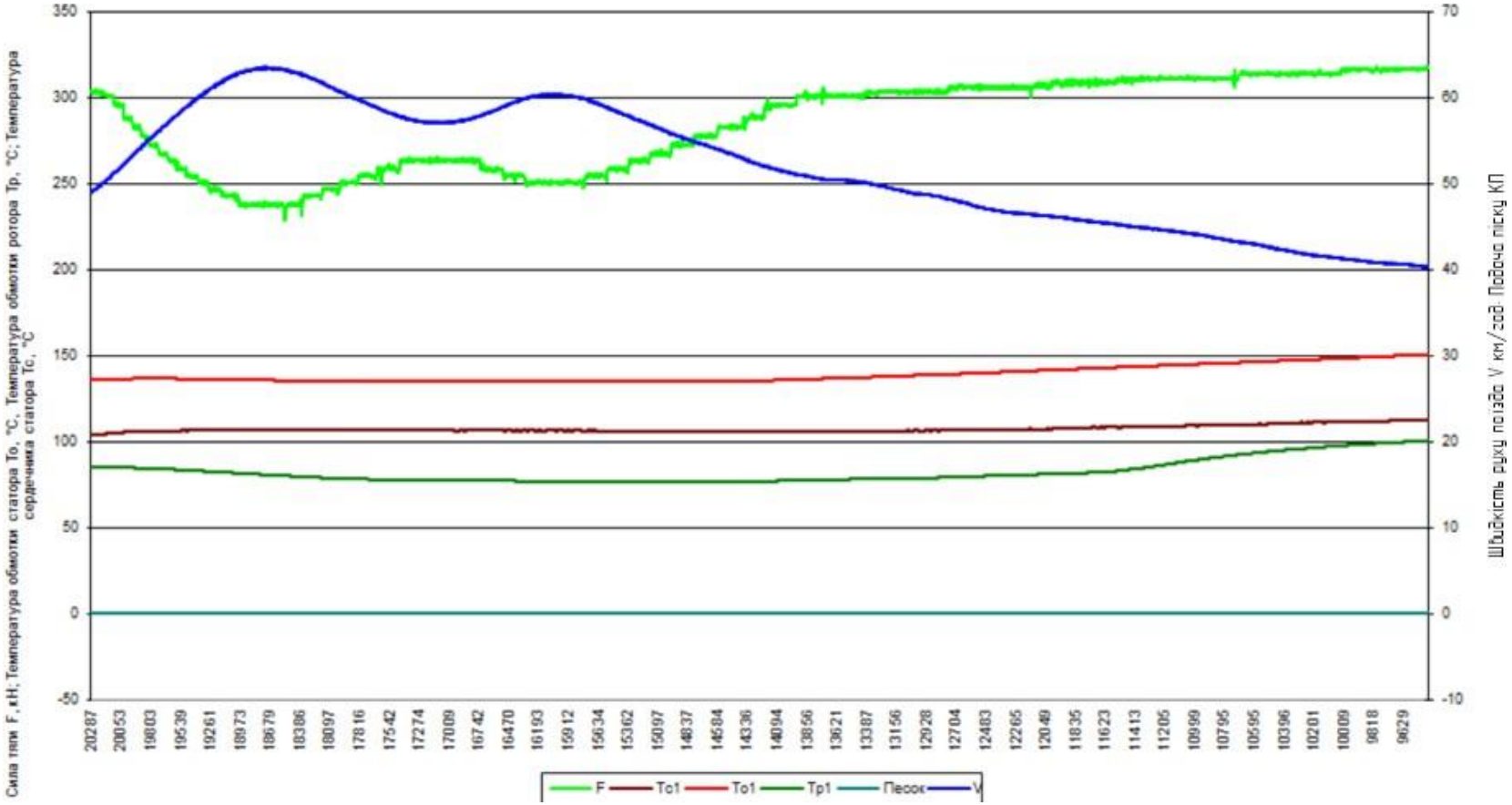


Рис. 4.4 – Криві руху поїзда № 2343 з локомотивом 2ЕС10 №062 секції «А» з АТЕД № 083 72179

Таблиця 4.2. Результати експериментальних та розрахункових значень температур по кілометражу

Кілометраж	17542	16742	15912	14094	13156
Струм статора, I_f (А)	752	760	760	776	752
Напруга контактного ланцюга, U (В)	3040	3040	3040	3040	3040
Швидкість руху, v_1 (км/год)	56, 9	56, 4	58, 8	50, 3	47, 9
Температура навколишнього повітря, υ_1 (°С)	11	11	11	11	11
Витрата вентильованого повітря, q ($м^3$)	90	90	90	90	90
Тягове зусилля, що створюється електродвигуном, F (кН)	65, 5	66, 0	63, 1	73, 8	76, 2
Момент на валу двигуна, M (Н·м)	6500	6536	6264	7328	7524
Температура статора обмотки (експеримент/розрахунок/величина похибки), υ_{OC} (°С)	135,6/ /132,9/ /2,0 %	135,4/ /134,7/ /0,5 %	133,8/ /133,7/ /0,1 %	136,0/ /140,5/ /3,2 %	138,4/ /137,2/ /0,8 %
Температура осердя статора (експеримент/розрахунок/величина похибки), υ_{CC} (°С)	106,9/ /105,3/ /1,5 %	106,9/ /106,5/ /0,4 %	106,9/ /106,4/ /0,5 %	105,8/ /107,6/ /1,7 %	106,3/ /109,5/ /3,0 %
Температура обмотки ротора (експеримент/розрахунок/величина похибки), υ_P (°С)	77,9/ /78,7/ /1,0%	77,5/ /78,1/ /0,8 %	77,2/ /78,0/ /1,0 %	77,3/ /78,7/ /1,8 %	78,8/ /80,2/ /1,7 %

Похибка між розрахунковими усталеними значеннями температур вузлів електродвигуна і експериментальними значеннями не перевищує 5 %. Найбільша похибка отримана для ротора.

Отримані результати підтверджують адекватність складеної теплової схеми заміщення тягового асинхронного електродвигуна. Це дозволяє зробити висновок про те, що тепловиділення вузлів і параметри теплових зв’язків елементів конструкції електродвигуна визначені правильно.

4.3.2 Апробація теплової математичної моделі для нестаціонарних режимів роботи АТЕД

Криві руху поїзда № 2642 загальною масою 6367 тонн з локомотивом 2ЕС10 № 062, секція «А» та асинхронним тяговим електродвигуном № 083 72179 представлені на рисунку 4.5.

На рисунку 4.6 представлені результати розрахунку кривої нагрівання за методом теплових мереж (ТММ) та раніше подані експериментальні криві нагрівання осердя статора та обмотки ротора.

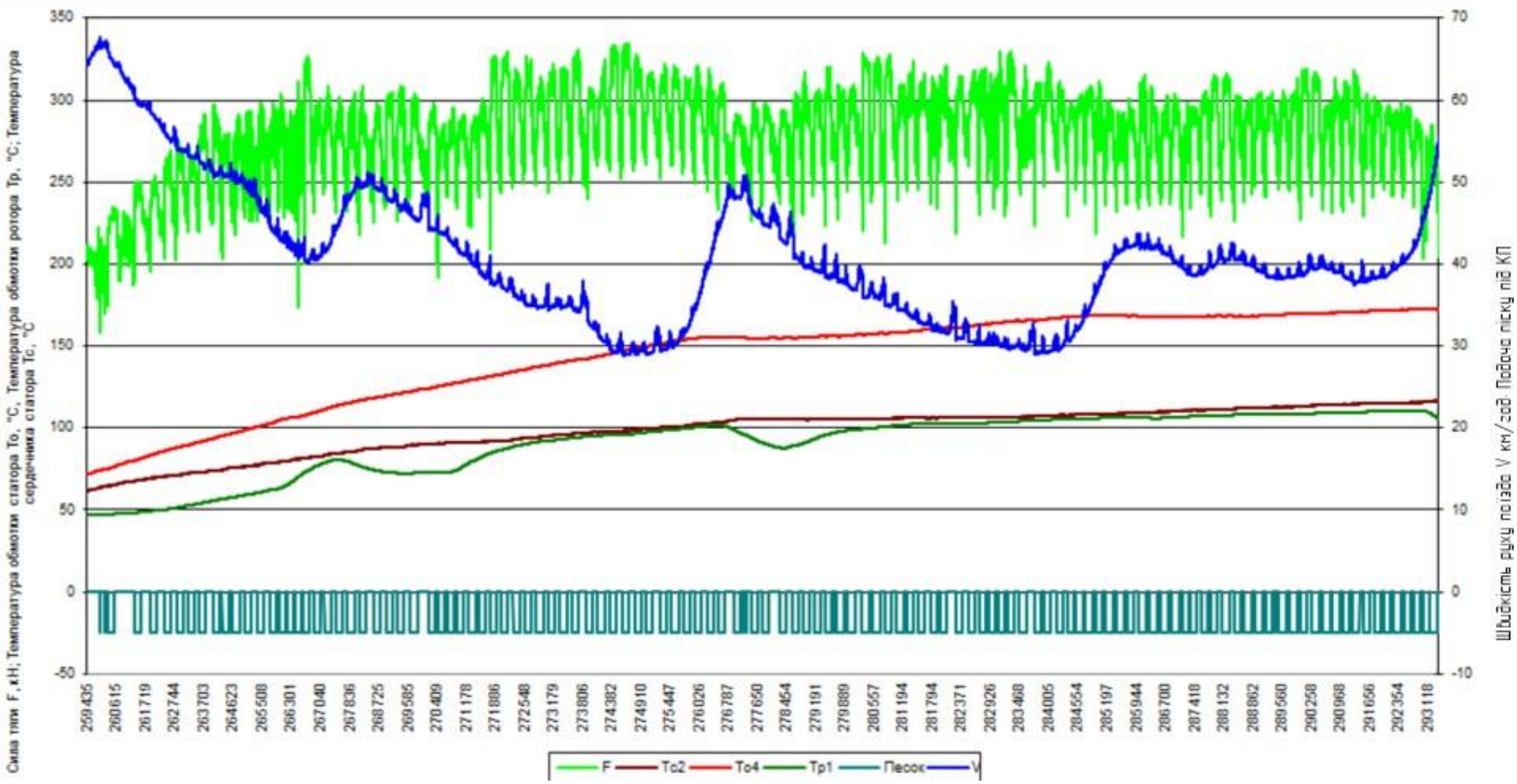


Рис. 4.5 – Криві руху поїзда №2642 з локомотивом 2ЕС10 №062, секція «А» з електродвигуном № 083 72179

Аналіз даних характеристик показує, що розбіжності між отриманими розрахунковими та експериментальними даними становлять не більше 10 %.

Це дозволяє зробити висновок про придатність і можливість використання розроблених методик розрахунку температур вузлів електродвигуна, що експлуатується в неусталених теплових режимах.

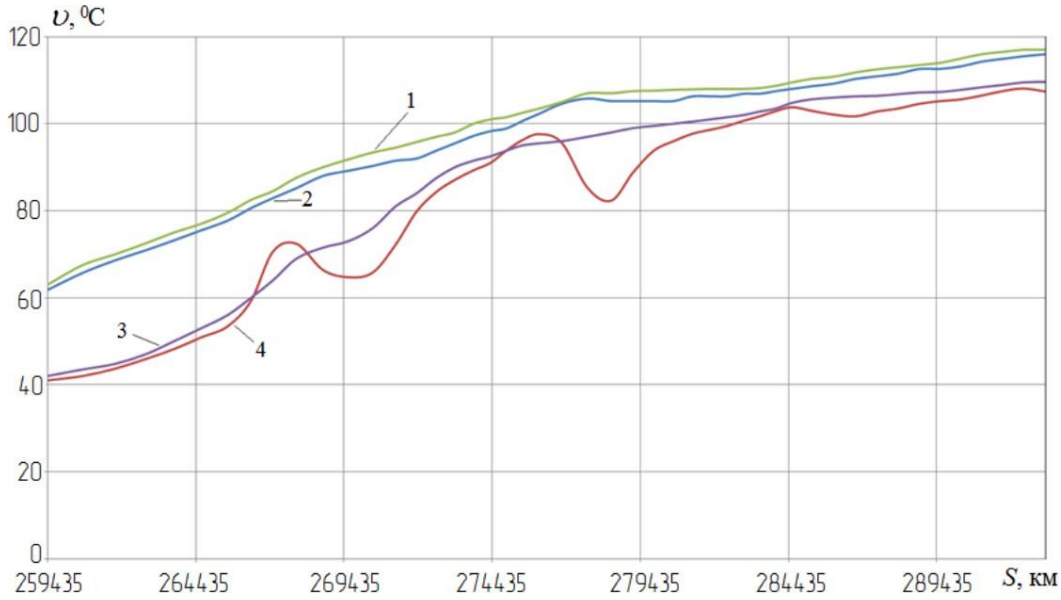


Рис. 4.6 – Експериментальні та розрахункові криві нагрівання АТЕД під час руху (1 – розрахункова крива нагрівання осердя статора, 2 – експериментальна крива нагрівання осердя статора, 3 – розрахункова крива нагрівання обмотки ротора, 4 – експериментальна крива нагрівання обмотки ротора)

Розроблена теплова модель дає змогу з достатньою точністю визначати температури різних вузлів АТЕД у реальному часі, а також реалізувати на практиці визначення температур вузлів, недоступних для безпосереднього вимірювання під час експлуатації.

4.4 Аналіз отриманих результатів випробувань

Проведені експериментальні дослідження підтвердили результати, отримані за допомогою математичних моделей теплового стану асинхронного тягового двигуна:

Величина похибки розрахунків температур вузлів електродвигуна за методом теплових мереж (ТММ) у сталому режимі та режимах, близьких до сталих, не перевищує 5 %. Найбільша похибка отримана для ротора.

Похибка розрахунків температур вузлів АТЕД у неусталеному режимі не перевищує 10 %.

Розроблена теплова математична модель може бути застосована для асинхронних двигунів, які мають подібну конструкцію. Адекватна робота моделі можлива за умови введення відповідних параметрів, геометричних розмірів та властивостей використовуваних ізоляційних матеріалів.

5 Розрахунок економічного ефекту від модернізації

5.1 Коротка характеристика запропонованого технічного рішення

Суть економічного ефекту досягається при заміні тягових двигунів постійного струму з реостатно-контакторною системою керування на асинхронний тяговий електропривод з автономними інверторами напруги та додаткової системи моніторінгу теплового стану тягових двигунів.

Таблиця 5.1 – Технічні характеристики двигунів базового та модернізованого електровозу

Параметр	ТЛ-2К базовий колекторний	НТА-1200А новий двигун
Кількість ТЕД	8	8
Потужність одного ТЕД	670 кВт	1200 кВт
Рід струму ТЕД	Постійний	Змінний
Коефіцієнт корисної дії ТЕД	0,93	0,96

Економія досягається за рахунок зниження додаткових втрат потужності в пускогальмівних резисторах, а також за рахунок підвищення ККД тягового електропривода та зниження загальних втрат потужності. Технічні характеристики базового та запропонованого двигунів представлені у таблиці 5.1.

В результаті модернізації економічний ефект очікується від:

- скорочення витрат на електроенергію;
- скорочення витрат на поточні витрати при ремонті;
- підвищення надійності модернізованих електровозів, в наслідок чого збільшиться міжремонтні періоди і як наслідок зменшиться витрати на ремонт;
- підвищення якості обслуговування пасажирських перевезень.

5.2 Методики розрахунку економічного ефекту

Сумарний за роками розрахункового періоду економічний ефект E_T визначається як перевищення сумарної вартісної оцінки результатів інноваційного проекту за розрахунковий період P_T над вартісною оцінкою сукупних витрат на здійснення інноваційного проекту за розрахунковий період $З_T$:

$$\mathrm{E_T} = \mathrm{P_T} - \mathrm{З_T}, \tag{5.1}$$

Також може бути визначено за виразом

$$\mathrm{E_T} = \sum_{t=t_H}^{tK} (\mathrm{P}_t - \mathrm{З}_t) \cdot \alpha_t, \tag{5.2}$$

де E_T– економічний ефект у t-му році розрахункового періоду;

P_T – вартісна оцінка результатів заходу в t-му році розрахункового періоду, грн;

$З_T$ – вартісна оцінка витрат усіх ресурсів у t-му році розрахункового періоду, грн;

A_t – коефіцієнт приведення результатів, витрат, економічного ефекту різних років до розрахункового року;

$t_н$ - початковий рік розрахункового періоду;

$t_к$ - кінцевий рік розрахункового періоду.

Економічний ефект заходу НТП визначається за весь розрахунковий період, включаючи розробку, виробництво і використання нової техніки, тобто є інтегральним ефектом.

Приведення експлуатаційних витрат всіх років періоду реалізації до розрахункового року здійснюється шляхом множення їхньої величини за кожний рік на коефіцієнт дисконтування α_t , що визначається за формулою

$$\alpha_t = (1+\mathrm{E_н})^{tp-1}, \quad (5.3)$$

де $E_н$ – норматив дисконту різночасових витрат і результатів, $E_н$=0,1;

t_p – розрахунковий рік;

t – рік, витрати і результати якого приводяться до розрахункового року.

5.3 Розрахунок вартісної оцінки витрат

5.3.1 Розрахунок капітальних витрат

Капітальні витрати на модернізацію:

$$K_t = k_{\text{одн}} + B_{\text{м/д}} + B_{\text{транс}}, \quad (5.4)$$

де $K_{одн}$ – витрати на придбання восьми інверторів напруги фірми SIEMENS та восьми асинхронних ТЕД ДТА-1200А.

$B_{м/д}$ – витрати на демонтаж базових та монтаж нових ТЕД, грн

$B_{транс}$– витрати транспортування нового обладнання до підприємства, яке здійснює модернізацію, грн.

У таблиці 5.2 приведено перелік обладнання, яке буде демонтовано.

Таблиця 5.2 – Перелік демонтованого обладнання.

Обладнання	Тип	Кількість
ТЕД постійного струму	ТЛ-2К	8

Вартість одного інвертора SIEMENS SIBAC E23-45-1DC-2ST дорівнює 55000 доларів, тобто 2 337500 грн (при курсі 1 долар=42,50 грн). Витрати на транспортування тягових інверторів складають близько 900 доларів, що приблизно дорівнює 41250 грн.

Вартість одного асинхронного ТЕД типу ДТА-1200А становить 698570 грн. Витрати на транспортування тягових асинхронних двигунів складатиме 1750 євро.

Вартість розглянутої системи контролю теплового стану складає 2 000 доларів, тобто 85 000 грн на кожний тяговий двигун.

В таблиці 5.3 приведена вартість силового обладнання, яке буде встановлюватися на електровозі з урахуванням транспортування

Таблиця 5.3 – Вартість силового обладнання, яке встановлюємо на електровозі з урахуванням транспортування

Обладнання	Тип	Кількість	Ціна одиниці, грн	Загальна сума, грн
Тягові інвертори	SIEMENS SIBAC E23-45-1DC-2ST	6	2 337500	14025000
Тягові двигуни	НТА-1200А	6	698570	4191420
Система моніторингу теплового стану	1SP0635D2S1C-	6	85000	510000
Витрати на транспортуванні інверторів				37000
Витрати на транспортування тягових двигунів				49500
Витрати на транспортування IGBT та драйверів				26580
Всього				18 839 500

Витрати на монтаж та демонтаж складають:

$$В_{МОНТ/ДЕМОНТ} = З_М \cdot m + З_Д \cdot m, \quad (5.5)$$

де m – кількість обладнання (інверторів, транзисторів та асинхронних двигунів);

$З_Д$ – витрати на демонтаж одиниці обладнання, грн;

$З_М$ – витратина монтаж одиниці обладнання, грн.

В таблиці 5.4 приведені витрати на заробітну плату та відрахування на соціальні заходи для демонтажу випрямної установки

Таблиця 5.4 – Витрати на заробітну плату та відрахування на соціальні заходи для демонтажу випрямної установки

Вид робіт	Кількість працівників	Розряд	Витрати часу, год.	Годинна тарифна ставка, грн.	Основна заробітна плата, грн.	Додаткова заробітна плата, грн. (10%)	ідрахування на соціальн заходи , грн. (22%)	Всього, грн.
Демонтаж	2	3	8	61,66	986,56	98,656	238,748	1323,964
Демонтаж	2	5	8	73,57	1177,12	117,712	284,68	1579,512
Всього								2903,476

Розглянемо витрати підприємства на оплату праці працівників та нарахування на заробітну плату, що пов'язані з демонтажем базової моделі з випрямною установкою та двигуном постійного струму та монтажем нової схеми з асинхронним двигуном. Трудові витрати на демонтаж базової РКСК представленні в таблиці 5.5, а монтаж нової схеми та встановлення автономного інвертора напруги представлені в таблиці 5.6.

Сумарна вартість демонтажу базового обладнання та монтажу нового обладнання на електрорухомому складі може бути розрахована за наступною формулою:

$$B_{\text{монт/дмн}} = B_{\text{дмн.випр}} \cdot \eta_{\text{вип}} + B_{\text{дмн.ТЕД}} \cdot \eta_{\text{ТЕД}} +$$

$$+B_{\text{монт.4}QS} \cdot \eta_{4QS} + B_{\text{монт.інв}} \cdot \eta_{\text{інв}} + B_{\text{монт.АД}} \cdot \eta_{\text{АД}} \qquad (5.6)$$

де $B_{монт/демонт}$ – сумарна вартість демонтажу базового обладнання та монтажу нового обладнання на електрорухомому складі, грн;

$B_{дмт/випр}$ – витрати на демонтаж випрямляльної установки, грн;

$B_{дмт.ТЕД}$ – витрати на демонтаж тягових двигунів постійного струму, грн;

$n_{ТЕД}$ – кількість тягових двигунів постійного струму, шт.;

$B_{монт.4QS}$ – витрати на монтаж 4QS – випрямлячів, грн;

N_{4QS} – кількість 4QS – випрямлячів, шт.;

$B_{монт.інв}$ – витрати на монтаж тягових інверторів, грн;

$n_{інв}$ – кількість інверторів на одному електрорухомому складі, шт.;

$B_{монт.АД}$ – витрати на монтаж тягових асинхронних двигунів, грн;

$n_{АД}$ – кількість тягових асинхронних двигунів, шт.;

Таблиця 5.5 – Витрати на заробітну плату та відрахування на соціальні заходи для демонтажу одного двигуна постійного струму

Вид робіт	Кількість працівників	Розряд	Витрати часу, год.	Годинна тарифна ставка, грн.	Основна заробітна плата, грн.	Додаткова заробітна плата, грн. (10%)	Відрахування на соціальні заходи , грн. (22%)	Всього, грн.
Демонтаж	2	3	4	61,66	493,28	49,328	119,37	661,978
Демонтаж	2	5	4	73,57	588,56	58,856	142,43	789,846
Всього								1451,824

Таблиця 5.6 – Витрати на заробітну плату та відрахування на соціальні заходи для монтаж, встановлення та підключення одного асинхронного двигуна

Вид робіт	Кількість працівників	Розряд	Витрати часу, год.	Годинна тарифна ставка, грн.	Основна заробітна плата, грн.	Додаткова заробітна плата, грн. (10%)	Відрахування на соціальні заходи, грн. (22%)	Всього, грн.
Монтаж	2	3	8	61,66	986,56	98,656	238,748	1323,964
Монтаж	2	5	8	73,57	1177,12	117,712	284,68	1579,512
Всього								2903,47

Таблиця 5.7 – Витрати на заробітну плату та відрахування на соціальні заходи для монтажу та встановлення одного автономного інвертора напруги

Вид робіт	Кількість працівників	Розряд	Витрати часу, год.	Годинна тарифна ставка, грн.	Основна заробітна плата, грн.	Додаткова заробітна плата, грн. (10%)	Відрахування на соціальні заходи, грн. (22%)	Всього, грн.
Монтаж	2	3	4	61,66	493,28	49,328	119,24	661,978
Монтаж	2	5	4	73,57	588,56	58,856	142,12	789,846
Всього								1451,824

Витрати на заробітну плату та відрахування на соціальні заходи для монтажу системи керування представлено в таблиці 5.8.

Таблиця 5.8 – Витрати на заробітну плату та відрахування на соціальні заходи для монтажу системи керування.

Вид робіт	Кількість працівників	Розряд	Витрати часу, год.	Годинна тарифна ставка, грн.	Основна заробітна плата, грн.	Додаткова заробітна плата, грн. (10%)	Відрахування на соціальні заходи, грн. (22%)	Всього, грн.
Монтаж	2	3	4	61,66	493,28	49,328	119,24	661,978
Монтаж	2	5	4	73,57	588,56	58,856	142,12	789,846
Всього								1451,8

Підставляємо значення розрахунку витрат на монтаж та демонтаж обладнання отримаємо:

$$В_{монт/демонт} = 2903{,}476 + 1451{,}824 \cdot 8 + 2903{,}476 \cdot 6 + 1451{,}824 \cdot 3 + 1451{,}824 \cdot 2 = 39198{,}044 \text{ грн.}$$

Таблиця 5.9 – Витрати на комплектуючі вироби для встановлення та підключення автономного інвертора напруги, асинхронного двигуна

Матеріал	Марка	Кількість, шт (м).	Ціна од., грн	Сума, грн
Силовий кабель, м	АКВВГ 4х2,5	30	12,03	360,9
Сигнальні проводи, м	МГТФ-0,35	50	7,90	395
Кабельні наконечники, компл.	ІЕК	30	10	300
Болти	М64	20	48,7	974
Гайки	М64	20	67,4	1348
Візок вантажний	К-8	2	1770	3540
Усього				6917,9

Таким чином капітальні витрати на придбання обладнання, транспортування та монтаж і демонтаж обладнання на складуть:

$$К_т = В_{АД} \cdot n_{АД} + В_{інв.} \cdot n_{інв} + В_{транс.} + В_{монт./демонт.} + В_{компл} \quad (5.7)$$

де $B_{АД}$ – вартість тягових асинхронних двигунів, грн;

$n_{АД}$ – кількість тягових асинхронних двигунів, шт.;

$B_{інв}$ – вартість тягових інверторів, грн;

$n_{інв}$ – кількість тягових інверторів, шт.;

$B_{ф}$ – витрати на монтаж вихідних фільтрів, грн;

$n_{ф}$ – кількість вихідних фільтрів, шт.;

$B_{транс}$ – витрати на транспортування нового обладнання, грн;

$B_{монт./демонт.}$ – витрати на монтаж та демонтаж тягових асинхронних двигунів, грн;

$B_{компл.}$ – вартість комплектуючих виробів, грн;

$$К_т = 18\,839\,500 + 39198{,}044 + 6917{,}9 = 18\,885\,615{,}94 \text{ грн.}$$

5.4 Розрахунок показників використання

Розрахунок було виконано при відстані слідування плеча електрорухомого складу 280 км.

Програма технічного обслуговування та ремонту електровозів розраховується виходячи із загального пробігу на лінії обертання та встановлених норм пробігу між технічним обслуговуванням та ремонтами за формулами:

$$MS_р = 2 \cdot L \cdot N \cdot 365, \quad (6.8)$$

де L – довжина ділянки обігу електропоїзду;

N – кількість поїздів на даній ділянці.

$$MS_{\text{р}} = 2 \cdot 280 \cdot 2 \cdot 365 = 408800 \text{ лок⍰ км.}$$

Визначимо місячний пробіг електровозів:

$$MS_{\text{м}} = \frac{2 \cdot L \cdot N \cdot 365}{12}, \tag{6.9}$$

$$MS_{\text{м}} = \frac{2 \cdot 280 \cdot 2 \cdot 365}{12} = 34066{,}66 \text{ лок⍰ км.}$$

Визначимо добовий пробіг ЕРС:

$$MS_{\text{д}} = 2 \cdot L \cdot N, \tag{6.10}$$

$$MS_{\text{д}} = 2 \cdot 280 \cdot 2 = 1120 \text{ лок⍰ км.}$$

Середньодобовий пробіг одного електропоїзда:

$$S_{\text{ср}} = \frac{2 \cdot L \cdot N}{2}, \tag{6.11}$$

$$S_{\text{ср}} = \frac{1120}{2} = 560 \text{ км.}$$

Визначимо експлуатаційні пари електропоїздів:

$$M_e = \frac{\sum MS_{\text{р}}}{S_{\text{ср}} \cdot 365}. \tag{6.12}$$

$$M_e = \frac{408800}{560 \cdot 365} = 2\,.$$

Робота електровоза за добу:

$$A_{\text{доб}} = S_{\text{ср}} \cdot Q, \tag{6.13}$$

де Q – маса електропоїзда брутто, т.

$$A_{\text{доб}} = 560 \cdot 172 = 96320 \text{ т} \cdot \text{км брутто.}$$

Визначимо роботу електровозів депо за рік:

$$A_{\text{рік}} = MS_{\text{ср}} \cdot Q, \tag{6.14}$$

$$A_{\text{рік}} = 408800 \cdot 172 = 70313600 \text{ т} \cdot \text{км брутто.}$$

При визначенні економічної ефективності модернізації знаходимо лише ту частину витрат, яка змінюється в порівняльних варіантах. В даному випадку при заміні реостатно-контакторної системи керування ТЕД на систему імпульсного керування асинхронними двигунами витрати на ремонт зменшиться на 10% за рахунок застосування більш надійних в експлуатації безконтактних приладів IGBT модулів та більшої надійності асинхронних тягових двигунів.

$$M_{\text{ПР}-1} = \frac{MS_{\text{ср}}}{L_{\text{ПР}-1}}. \tag{6.15}$$

$$M_{\text{ПР}-1} = \frac{408}{30} = 13 \text{ лок.}$$

$$M_{\text{ПР}-2} = \frac{MS_{\text{ср}}}{L_{\text{ПР}-2}}. \quad (6.16)$$

$$M_{\text{ПР}-2} = \frac{408}{200} = 2 \text{ лок.}$$

$$M_{\text{ПР}-3} = \frac{MS_{\text{ср}}}{L_{\text{ПР}-3}}. \quad (6.17)$$

$$M_{\text{ПР}-3} = \frac{408}{300} = 1 \text{ лок.}$$

Визначимо вартість поточних ремонтів при базовому варіанті:

$$B_{\text{ПР}-1} = 13 \cdot 250000 = 3250000 \text{ грн.}$$

де 250000 – нормативні міжремонтні періоди, км

$$B_{\text{ПР}-2} = 2 \cdot 600000 = 1200000 \text{ грн.}$$

де 600000 – нормативні міжремонтні періоди, км

$$B_{\text{ПР}-3} = 1 \cdot 1000000 = 1000000 \text{ грн.}$$

де 1000000 – нормативні міжремонтні періоди, км

Тобто розрахунок витрат на 1 локомотив:

$$B_{\text{рБ}} = \frac{B_{\text{ПР}-1} + B_{\text{ПР}-2} + B_{\text{ПР}-3}}{M_e}. \quad (6.18)$$

$$B_{\text{рБ}} = \frac{3250000 + 1200000 + 1000000}{2} = 2725000 \text{ грн.}$$

Визначимо вартість поточних ремонтів при модернізованому варіанті:

$$B_{\text{ПР}-1} = 13 \cdot 225000 = 2925000 \text{ грн.}$$

де 225000 – нормативні міжремонтні періоди, км

$$B_{\text{ПР}-2} = 2 \cdot 540000 = 1080000 \text{ грн.}$$

де 540000 – нормативні міжремонтні періоди, км

$$B_{\text{ПР}-3} = 1 \cdot 900000 = 900000 \text{ грн.}$$

де 900000 – нормативні міжремонтні періоди, км

Тобто розрахунок витрат на 1 локомотив:

$$B_{\text{рМ}} = \frac{B_{\text{ПР}-1} + B_{\text{ПР}-2} + B_{\text{ПР}-3}}{M_e}.$$

$$B_{\text{рМ}} = \frac{2925000 + 1080000 + 900000}{2} = 2452500 \text{ грн.}$$

Витрати електроенергії на тягу електровозів визначаються за формулою:

$$R_A = \overline{R_A} \cdot \sum MS \cdot 5{,}60 \qquad (6.19)$$

де $\overline{R_A}$ - питомі витрати енергії, для базового і модернізованого варіанту $\frac{кВт \cdot год}{поїзд - км}$

5,60 грн - вартість електроенергії за 1кВ·год

Питомі витрати енергії, для нового і базового варіанту при дільничній швидкості 68 км/год, дорівнюють для базового – 10, а для нового 7 – $\frac{кВт \cdot год}{поїзд - км}$

Витрати на електроенергію базового електропоїзда будуть складати

$$R_{АБ} = 10 * 408800 * 5{,}60 = 22892800 \text{ грн.}$$

$$b_e = \frac{R_{АБ}}{M_e} = \frac{22892800}{2} = 11\,446400 \text{ грн.}$$

$$R_{АМ} = 7 * 408800 * 5{,}60 = 16\,024960 \text{ грн.}$$

$$b_e = \frac{R_{АМ}}{M_e} = \frac{5\,849\,928}{2} = 8012480 \text{ грн.}$$

Результати розрахунку експлуатаційних витрат заносимо в таблицю 6.10.

Таблиця 5.10 – Результати розрахунку експлуатаційних витрат

Витрати. грн в рік	Електровози	
	Базовий	Модернізований
Витрати на ремонт	2 725 000	2 452 500
Витрати на електроенергію	11 446400	8012480
Всього	14171400	10464980

Результати розрахунку економічного ефекту від експлуатації модернізованого електровоза протягом наступних 10 років зведені до таблиці 5.11.

Таблиця 5.11 – Результати економічного ефекту від експлуатації модернізованого електровозу протягом 10 років

Роки	Капітальні вкладення., грн.	Експлуатаційні. витрати базового ел.воза , грн.	Експлуатаційні витрати модерн. ел.воза , грн.	Економ. ефект від реалізації модерн-ції, грн	Коефіцієнт. приведення до розрахункового року	Економічний ефект приведений до розрахункового року	Економічний ефект наростаючим підсумком, грн.
	Kt	Ебаз	Емод	ЕТ	$\alpha\tau$	ЕТ·$\alpha\tau$	ΣЕТ
1	18885616	14171400	10 464 980	-15179196	0,909	-13797889,2	-13797889,2
2	0	14171400	10 464 980	3706420	0,826	3061502,92	-10736386,2
3	0	14171400	10 464 980	3706420	0,751	2783521,42	-7952864,82
4	0	14171400	10 464 980	3706420	0,683	2531484,86	-5421379,96
5	0	14171400	10 464 980	3706420	0,62	2297980,4	-3123399,56
6	0	14171400	10 464 980	3706420	0,564	2090420,88	-1032978,68
7	0	14171400	10 464 980	3706420	0,513	1901393,46	868414,776
8	0	14171400	10 464 980	3706420	0,466	1727191,72	2595606,5
9	0	14171400	10 464 980	3706420	0,424	1571522,08	4167128,58
10	0	14171400	10 464 980	3706420	0,385	1426971,7	5594100,28

Таким чином економічний ефект від модернізації електровозу змінного струму асинхронними тяговими двигунами за 10 років експлуатації наростаючим підсумком склав 5594100,28 грн., затрати на капіталовкладення для модернізації електропоїзда окупаються на 7 році.

Висновки до кваліфікаційної роботи

Основними результатами роботи зі створення системи моніторингу теплового стану асинхронних тягових електродвигунів електровозів є наступні:

1. Розроблена система теплового моніторингу тягових асинхронних двигунів дозволяє здійснювати безперервний контроль теплового стану всіх елементів конструкції АТЕД (як на нерухомих, так і на обертових частинах) під час його експлуатації на електровозі в режимі реального часу. Ця система моніторингу може бути використана для будь-яких асинхронних двигунів за умови введення відповідних параметрів, геометричних розмірів і властивостей використовуваних ізоляційних матеріалів.

2. Мінімальними вхідними параметрами, необхідними для нормальної роботи системи теплового моніторингу для всіх режимів експлуатації АТЕД, є: напруга мережі, фазний струм статора АТЕД, швидкість руху локомотива, витрата охолоджуючого повітря, температура вхідного повітря та температура вибраного опорного вузла. Для реалізації роботи системи моніторингу АТЕД на електровозі потрібна лише установка датчика витрати охолоджуючого повітря і його температури, а інші вхідні параметри можна отримати з встановленої штатної апаратури.

3. Математична модель теплового стану асинхронного тягового електродвигуна, розроблена на основі методу теплових схем заміщення, має високу деталізацію елементів конструкції статора і ротора, пов’язаних з умовами охолодження, враховує підігрів охолоджуючого повітря, що проходить через електродвигун, що дозволяє з більшою точністю розраховувати усталене теплове поле АТЕД. Необхідними вхідними даними є: фазний струм статора, напруга і частота мережі живлення, температура вхідного повітря, витрата охолоджуючого повітря.

4. У розробленій моделі теплового стану тягового електродвигуна в неусталених режимах слід:

– при температурі опорного вузла нижче усталеної використовувати методику визначення температур вузлів АТЕД, що базується на розрахунку постійних нагріву;

– при температурі опорного вузла вище усталеної використовувати методику, засновану на визначенні кореляційної залежності між температурами вузлів. При цьому величини похибок визначення температур вузлів АТЕД не перевищують 10 %.

5. Моделювання усталених температурних полів у всіх режимах роботи електродвигуна показало необхідність контролю температур лобових частин обмоток як таких, що мають найвищу температуру нагріву. Тому температуру цього вузла слід використовувати як вихідний параметр для коригування навантаження тягових електродвигунів електровоза. Це також було підтверджено моделюванням режимів роботи в середовищі ELCUT.

6. Результати експериментальних досліджень підтверджують, що використання теплових математичних моделей дає достовірну інформацію про значення температур вузлів електродвигуна. Похибки розрахунків в усталеному режимі та режимах, близьких до усталеного, не перевищують 5 %. Найбільша похибка розрахунків температур вузлів АТЕД у неусталених режимах складає 8,3 %.

Список використаних джерел:

1. Флора, В. Д. Тягові електричні двигуни / В. Д. Флора; за ред. доцента к.т.н. Ю. С. Коробкова. / Запоріжжя – Інформаційна система iElectro, 2011. - 318 с.

2. Кущ А. Ст. Комплекс мікропроцесорних захистів для систем збудження турбо- та гідрогенераторів / А.В. Кущ, Б.Ф. Симонов, А.І. Кадишев // Електричні станції. 2011. - № 9 - 36-42 с.

3. Patent. US 3629676 A, UNITED STATES PATENT. Traction motor temperature control of locomotive power / Ephraim Max Jr, Smith Earl D.; заявник та патентовласник: Gen Motors Corp. - № CA935905A1; заявл. 09.04.1970; опубл. 21.12.1971.

4. 55. Patent. US 5528445 A, UNITED STATES PATENT. Automatic fault current protection for a locomotive propulsion system / Cooke Philip R. (Erie, PA), 126 Laukaitis Joseph A. (Erie, PA); заявник та патентовласник: General Electric Company; заявл. 23.09.1994; опубл. 18.06.1996.

5. 56. Patent. US20140062371 A1, UNITED STATES PATENT. Method and system for motor thermal protection/ Roy David Schultz, Jeffrey Daigle, Sudhir Gupta; заявник та патентовласник: Roy David Schultz, Jeffrey Daigle, Sudhir Gupta; заявл. 06.09.2012; опубл. 06.03.2014.

6. Шевченка, О. Ф. Порівняння можливостей аналітичного та чисельного методів моделювання електричної машини/А. Ф. Шевченка, Г. Б. Вяльцев// Електротехніка. 2011. - № 6. - с. 20а-24.

7. ANSYSIcepak. Режим доступу https://cae-expert.ru/product/ansys-icepak.

ДОДАТОК А – ГРАФІЧНИЙ МАТЕРІАЛ ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Український державний університет залізничного транспорту

Механіко-енергетичний факультет
Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

ІЛЮСТРАЦІЙНИЙ МАТЕРІАЛ
до кваліфікаційної роботи

СИСТЕМА ВИМІРЮВАННЯ ТА КОНТРОЛЮ ТЕПЛОВОГО СТАНУ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ РУХОМОГО СКЛАДУ

Розробив студент групи 214-ЕЕ-Д23
спеціальності 273 «Залізничний транспорт»
спеціалізацій «Електровози і електропоїзди»

Виконав _____ Т.Е. Циганенко
Керівник проекту: _____ О.А. Плахтій
Нормоконтроль: _____ О.А. Плахтій
Завідувач кафедри: _____ М.М. Бабаєв

2024

Статистика пошкоджень та відмов тягових електродвигунів

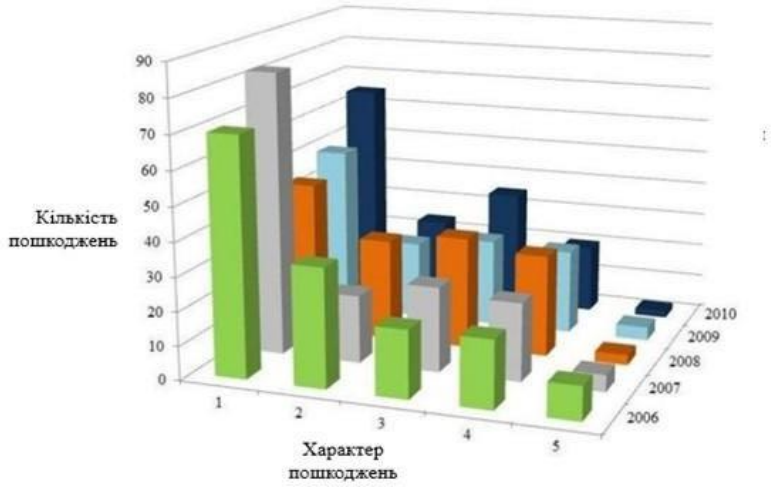


Рис. 1.1 – Діаграми розподілу пошкоджень ТЕД за окремими вузлами та деталями двигуна ТЛ-2К1 за 2006 -2010 роки: а – плановий ремонт; б – позаплановий ремонт

Таблиця 1 - Дані про розподіл пошкоджень тягових електродвигунів марки ТЛ-2К1

Вид ушкодження електродвигуна	Відсоток пошкоджень від загальної кількості, %
Пробій ізоляції та міжвиткові замикання обмотки якоря	16 – 25
Пробій ізоляції та міжвиткові замикання головних та додаткових полюсів та компенсаційної обмотки	12 – 16
Порушення комутації (круговий вогонь)	8 – 16
Пошкодження якірних підшипників	14 – 16
Порушення розпаювання сполук обмотки якоря в петушках колектора	5 – 6

Дані показують, що найбільша частка відмов тягових двигунів електровозів припадає на пробої ізоляції обмоток машини, що є наслідком перегріву обмоток, яка призводить до прискорення старіння ізоляції.

Оцінювання та моніторинг теплового стану тягових електродвигунів

Для отримання достовірної інформації про технічний стан і оцінку залишкового ресурсу електродвигуна під час експлуатації необхідно мати інформацію про повну картину температурного поля машини

В сучасних тягових асинхронних двигунах для контролю теплового стану машини вбудовуються датчики температури, зокрема, в електродвигунах марки НТА-1200 у пакет статора інтегровані терморезистори типу РТ-100.

Використовуваний датчик температури складається з двох терморезисторів у вигляді капсул 1, які встановлені в спеціальні гнізда в осерді статора 2. З'єднання датчика зі схемою керування електровоза здійснюється за допомогою спеціального кабелю 3 і штепсельного роз'єму 4.

Терморезистори з'єднані з вивідним кабелем шляхом пайки; місце з'єднання закрите спеціальною ущільнювальною кришкою 5.

Проте датчик дає можливість оцінки температури лише в одній точці, в той же час нагрівання вузлів конструкції відбувається нерівномірно.

Наприклад, розподіл температури вздовж статора тягового електродвигуна ДАТ-470 показує, що різниця між температурами передньої та задньої лобових частин обмотки статора може досягати 12-32 % за різних умов охолодження електродвигуна.

Таким чином розробка комплексної системи оцінки теплового стану тягових двигунів є актуальною

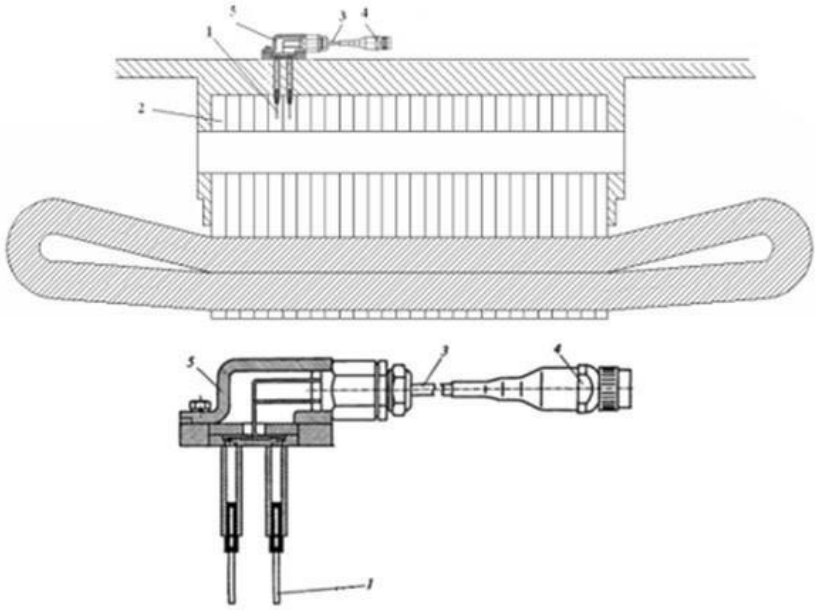


Рис. 1.2 – Установка термодатчиків тягового електродвигуна НТА-1200: 1 – капсула з терморезисторами; 2 – осердя статора; 3 – кабель; 4 – штепсельний роз'єм; 5 – ущільнювальна кришка

Методи аналітичного визначення теплового стану електричних маших

Серед аналітичних методів розрахунку теплового поля електродвигунів найбільше застосування мають такі методи:

- метод теплових параметрів;
- метод температурного поля;
- **метод еквівалентних теплових схем, в якому** припускається аналогія теплових і електричних потоків, що базується на єдиній формі рівнянь теплообміну та електричного струму

$$P = \frac{\lambda S_{cp} \Delta}{\delta} = \frac{\Delta T}{R_\lambda} \qquad I = \frac{k S_{cp} \Delta U}{l} = \frac{\Delta U}{R_e} \qquad P = \sum_{i=1}^{n} q_i$$

де S_{cp} – середня площа теплопередавальної поверхні;

λ – коефіцієнт теплопровідності;

k – питома електрична провідність;

ΔU – різницю потенціалів на довжині l провідника з перетином S;

R_λ – тепловий опір даної ділянки шляху теплового потоку;

R_e – електричний опір.

P – потужність теплового джерела;

q_i – тепловий потік в i-ї гілки, що відходить від теплового джерела.

Математична модель теплового стану АТЕД, на основі методу еквівалентних теплових схем

На представленій схемі прийняті наступні позначення:

P_{CC} – теплові втрати в сердечнику статора;

P_{C1} – теплові втрати в лобовій частині обмотки статора зі сторони подачі повітря;

P_{CP} – теплові втрати в пазовій частині обмотки статора; РС2 – втрати в лобовій частині обмотки статора зі сторони протилежної подачі повітря;

P_{CP} – теплові втрати в сердечнику ротора;

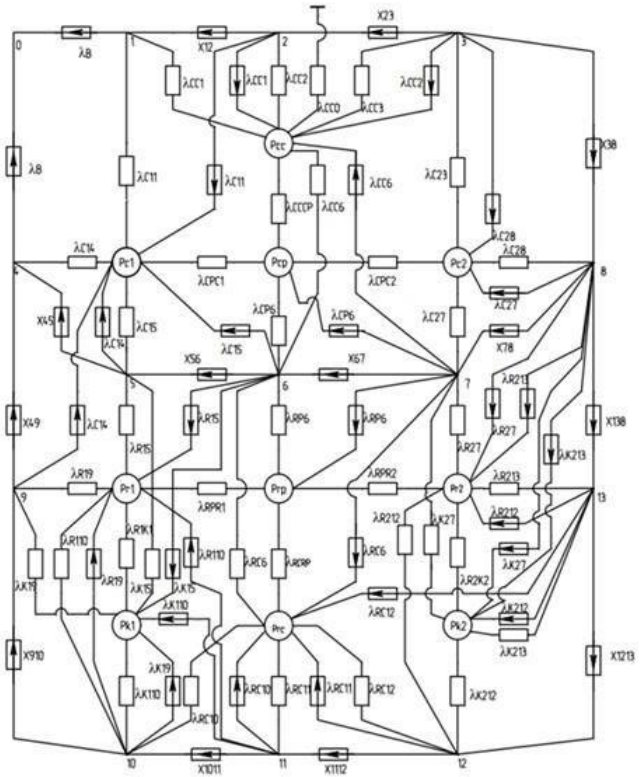
P_{P1} – теплові втрати в лобовій частині обмотки ротора зі сторони подачі повітря;

P_{PP} – теплові втрати в пазовій частині обмотки ротора;

P_{P2} – теплові втрати в лобовій частині обмотки ротора зі сторони протилежної подачі повітря;

P_{K1} – теплові втрати в короткозамкнутому кільці зі сторони подачі повітря;

P_{K2} – теплові втрати в короткозамкнутому кільці зі сторони протилежної подачі повітря.



Теплова схема заміщення АТЕД типу НТА-1200

Системи рівнянь, що описують тепловий стан

$$P_{CC}=\upsilon_{CC}(\lambda_{CC1}+\lambda_{CC2}+\lambda_{CC0}+\lambda_{CC3}+\lambda_{CC6}+\lambda_{CCCP})-\upsilon_1\cdot\lambda_{CC1}-\upsilon_2\cdot\lambda_{CC2}-\upsilon_{вкл}\cdot\lambda_{CC0}-$$
$$-\upsilon_3\cdot\lambda_{CC3}-\upsilon_6\cdot\lambda_{CCP}-\upsilon_{CP}\cdot\lambda_{CCCP};$$

$$P_{C1}=\upsilon_{C1}(\lambda_{C14}+\lambda_{C11}+\lambda_{CPC1}+\lambda_{C15})-\upsilon_1\cdot\lambda_{C11}-\upsilon_{CP}\cdot\lambda_{CPC1}-\upsilon_5\cdot\lambda_{C15}-\upsilon_4\cdot\lambda_{C14};$$

$$P_{CP}=\upsilon_{CP}(\lambda_{CCCP}+\lambda_{CPC2}+\lambda_{CPC1}+\lambda_{CP6})-\upsilon_{C1}\cdot\lambda_{CPC1}-\upsilon_{CC}\cdot\lambda_{CCCP}-\upsilon_{C2}\cdot\lambda_{CPC2}-\upsilon_6\cdot\lambda_{CP6};$$

$$P_{C2}=\upsilon_{C2}(\lambda_{C23}+\lambda_{C28}+\lambda_{CPC2}+\lambda_{C27})-\upsilon_3\cdot\lambda_{C23}-\upsilon_{CP}\cdot\lambda_{CPC2}-\upsilon_8\cdot\lambda_{C28}-\upsilon_7\cdot\lambda_{C27};$$

$$P_{RC}=\upsilon_{RC}(\lambda_{RC6}+\lambda_{RCRP}+\lambda_{RC12}+\lambda_{RC11}+\lambda_{RC10})-\upsilon_6\cdot\lambda_{RC6}-\upsilon_{RP}\cdot\lambda_{RCRP}-\upsilon_{12}\cdot\lambda_{RC12}-$$
$$-\upsilon_{11}\cdot\lambda_{RC11}-\upsilon_{10}\cdot\lambda_{RC10};$$

$$P_{R1}=\upsilon_{R1}(\lambda_{R19}+\lambda_{R15}+\lambda_{RPR1}+\lambda_{R110}+\lambda_{R1K1})-\upsilon_9\cdot\lambda_{R19}-\upsilon_5\cdot\lambda_{R15}-\upsilon_{RP}\cdot\lambda_{RPR1}-$$
$$-\upsilon_{10}\cdot\lambda_{R1K1}-\upsilon_{K1}\cdot\lambda_{RC10}$$

$$P_1=\upsilon_1\cdot(\lambda_B+\lambda_{C11}+\lambda_{CC1})-\upsilon_{C1}\cdot\lambda_{C11}-\upsilon_{CC}\cdot\lambda_{CC1}=\upsilon_B\cdot\lambda_B;$$

$$P_2=\upsilon_2\cdot(\lambda_B+\lambda_{CC2})-\upsilon_{C1}\cdot\lambda_{CC1}-\upsilon_1\cdot X_{12}-\upsilon_{CC}\cdot(\lambda_{CC1}+\lambda_{CC2});$$

$$P_3=\upsilon_3\cdot(2\cdot\lambda_B+\lambda_{CC3}+\lambda_{C23})-\upsilon_2 X_{23}-\upsilon_{CC}(\lambda_{CC3}+\lambda_{CC2})-\upsilon_{C2}\cdot(\lambda_{C23}+\lambda_{C28})-\upsilon_8 X_{38};$$

$$P_4=\upsilon_4\cdot(\lambda_B+\lambda_{C14})-\upsilon_{C1}\lambda_{C14}=\upsilon_B\lambda_B;$$

$$P_{K1}=\upsilon_{K1}(\lambda_{K19}+\lambda_{K15}+\lambda_{R1K1}+\lambda_{K110})-\upsilon_9\cdot\lambda_{K19}-\upsilon_5\cdot\lambda_{K15}-U_{R1}\cdot\lambda_{R1K1}-\upsilon_{10}\cdot\lambda_{K110};$$

$$P_{K2}=\upsilon_{K2}(\lambda_{K27}+\lambda_{K213}+\lambda_{R2K2}+\lambda_{K212})-\upsilon_7\cdot\lambda_{K27}-\upsilon_{13}\cdot\lambda_{K213}-$$
$$-\upsilon_{R2}\cdot\lambda_{R2K2}-\upsilon_{12}\cdot\lambda_{K212}.$$

$$P_{RP}=\upsilon_{RP}(\lambda_{RPR1}+\lambda_{RP6}+\lambda_{RPR2}+\lambda_{RCRP})-\upsilon_{R1}\cdot\lambda_{RPR1}-\upsilon_6\cdot\lambda_{RP6}-\upsilon_{R2}\cdot\lambda_{RPR2}-\upsilon_{RC}\cdot\lambda_{RCRP};$$

$$P_{R2}=\upsilon_{R2}(\lambda_{R27}+\lambda_{R213}+\lambda_{RPR2}+\lambda_{R212}+\lambda_{R2K2})-\upsilon_7\cdot\lambda_{R27}-\upsilon_{13}\cdot\lambda_{R213}-$$
$$-\upsilon_{RP}\cdot\lambda_{RPR2}-\upsilon_{12}\cdot\lambda_{R212}-\upsilon_{K2}\cdot\lambda_{R2K2};$$

$$P_5=\upsilon_5\cdot(\lambda_B+\lambda_{C15}+\lambda_{K15}+\lambda_{R15})-\upsilon_4\cdot X_{45}-\upsilon_{C1}\cdot(\lambda_{C14}+\lambda_{C15})-\upsilon_{K1}\cdot\lambda_{K15}-\upsilon_{R1}\cdot\lambda_{R15};$$

$$P_6=\upsilon_6\cdot(\lambda_B+\lambda_{CP6}+\lambda_{RP6}+\lambda_{RC6}+\lambda_{CC6})-\upsilon_{RP}\cdot\lambda_{RP6}-\upsilon_{RC}\cdot\lambda_{RC6}-\upsilon_{K1}\cdot\lambda_{K15}-\upsilon_5\cdot X_{56}-$$
$$-\upsilon_{C1}\cdot\lambda_{C15}-\upsilon_{CP}\cdot\lambda_{CP6}-\upsilon_{CC}\cdot\lambda_{CC6}-\upsilon_{R1}\cdot\lambda_{R15};$$

$$P_7=\upsilon_7\cdot(\lambda_B+\lambda_{K27}+\lambda_{C27}+\lambda_{R27})-\upsilon_{K2}\cdot\lambda_{K27}-\upsilon_{RC}\cdot\lambda_{RC6}-\upsilon_{RP}\cdot\lambda_{RP6}-\upsilon_6\cdot X_{67}-$$
$$-\upsilon_{CP}\cdot\lambda_{CP6}-\upsilon_{CC}\cdot\lambda_{CC6}-\upsilon_{C2}\cdot\lambda_{C27}-\upsilon_{R2}\cdot\lambda_{R27};$$

$$P_8=\upsilon_8\cdot(2\cdot\lambda_B+\lambda_{C28})-\upsilon_7\cdot X_{78}-\upsilon_{C2}\cdot(\lambda_{C28}+\lambda_{C27})-\upsilon_{K2}\cdot(\lambda_{K27}+\lambda_{K213})-\upsilon_{13}\cdot X_{138}-$$
$$-\upsilon_{R2}\cdot(\lambda_{R27}+\lambda_{R213});$$

$$P_9=\upsilon_9\cdot(\lambda_B+\lambda_{K19}+\lambda_{R19})-\upsilon_4\cdot X_{49}-\upsilon_{C1}\cdot\lambda_{C14}-\upsilon_{K1}\cdot\lambda_{K19}-\upsilon_{R1}\cdot\lambda_{R19};$$

$$P_{10}=\upsilon_{10}\cdot(\lambda_B+\lambda_{K110}+\lambda_{RC10}+\lambda_{R110})-\upsilon_9\cdot X_{910}-\upsilon_{K1}\cdot(\lambda_{K19}+\lambda_{K110})-\upsilon_{RC}\cdot\lambda_{RC10}-$$
$$-\upsilon_{R1}\cdot(\lambda_{R19}+\lambda_{R110});$$

$$P_{11}=\upsilon_{11}\cdot(\lambda_B+\lambda_{RC11})-\upsilon_{10}\cdot X_{1011}-\upsilon_{K1}\cdot\lambda_{K110}-\upsilon_{RC}\cdot(\lambda_{RC10}+\lambda_{RC11})-\upsilon_{R1}\cdot\lambda_{R110};$$

$$P_{12}=\upsilon_{12}\cdot(\lambda_B+\lambda_{RC12}+\lambda_{K212}+\lambda_{R212})-\upsilon_{11}\cdot X_{1112}-\upsilon_{RC}\cdot(\lambda_{RC11}+\lambda_{RC12})-\upsilon_{K2}\cdot\lambda_{K212}-$$
$$-\upsilon_{R212}\cdot\lambda_{R212};$$

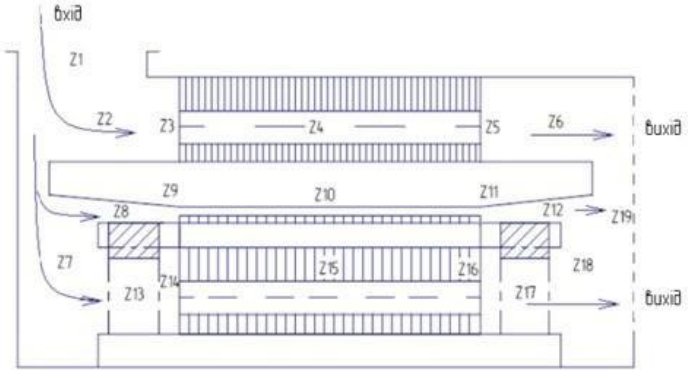
λ – теплові провідності відповідних конструктивних елементів

Вентиляційний розрахунок АТЕД

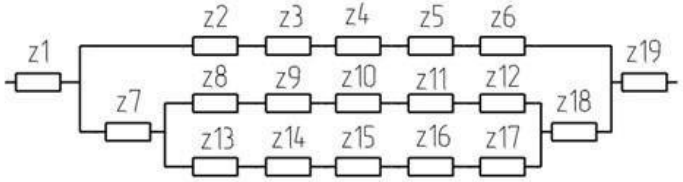
Були проведені розрахунки тепловиділень у вузлах двигуна, а також розрахунки провідностей теплової схеми.

Була розроблена вентиляційна схема заміщення до розглянутого типу тягового асинхронного електродвигуна марки НТА-1200, який також має незалежну аксіальну систему вентиляції з подачею вентилюючого повітря зверху з боку, протилежного редуктору електродвигуна, і викидом через підшипниковий щит зі сторони редуктора.

Розрахунок еквівалентної гідравлічної схеми дозволив визначити швидкості охолоджувального повітря в різних гілках схеми. Результати розрахунку для номінального режиму роботи двигуна НТА-1200 наведені в таблиці



Напрямок руху вентиляційного повітря в електродвигуні НТА-1200



Еквівалентна схема потоку повітря системи охолодження АТЕД НТА-1200

Результати вентиляційного розрахунку АТЕД типу НТА-1200 для номінального режиму роботи

Канал уху повітря	Швидкість повітря, м/сек
Вентиляційні канали статора	26,73
Відносно лобових частин обмотки статора	3, 63
Між лобовими частинами обмотки статора та КЗ кільцями	1, 38
Повітряний зазор	15, 66
Під КЗ кільцем з боку подачі повітря	6, 88
Під КЗ кільцем з протилежної сторони подачі повітря	9, 53
Вентиляційні канали ротора	25, 00

Результати розрахунків теплового стану

Таблиця 2.1 – Результати вентиляційного розрахунку АТЕД типу НТА-12 для номінального режиму роботи

Канал уху повітря	Швидкість повітря, м/сек
Вентиляційні канали статора	26,73
Відносно лобових частин обмотки статора	3, 63
Між лобовими частинами обмотки статора та КЗ кільцями	1, 38
Повітряний зазор	15, 66
Під КЗ кільцем з боку подачі повітря	6, 88
Під КЗ кільцем з протилежної сторони подачі повітря	9, 53
Вентиляційні канали ротора	25, 00

Таблиця 2.2. Результати моделювання встановленого теплового стану асинхронного тягового двигуна за допомогою ТММ

Найменування вузла електродвигуна	Температура вузлів електродвигуна, °С	
	U=3320 В $I_ф$=336 А t=20°С n=796 об/хв	U=3000 В $I_ф$=600 А t=20°С n=1306 об/хв
Лобова частина ОС із боку подачі повітря	91, 4	121, 7
Пазова частина статора обмотки	106, 0	121, 3
Лобова частина ОС з боку протилежної подачі повітря	97, 3	128, 8
Сердечник статора	104, 8	104, 8
Лобова частина ОР з боку подачі повітря	84, 5	105, 2
Пазова частина обмотки ротора	88, 0	90, 1
Лобова частина ОР з боку протилежної подачі повітря	88, 8	113, 7
Сердечник ротора	84, 0	87, 7
Короткозамкнене кільце з боку подачі повітря	84, 5	105, 1
КЗ кільце з боку протилежної подачі повітря	88, 8	113, 6
Підігрів повітря в області 3, вихідна температура повітря	41, 2	56, 4

Результати розрахунків теплового стану

Таблиця 2.1 – Результати вентиляційного розрахунку АТЕД типу НТА-12 для номінального режиму роботи

Канал уху повітря	Швидкість повітря, м/сек
Вентиляційні канали статора	26,73
Відносно лобових частин обмотки статора	3, 63
Між лобовими частинами обмотки статора та КЗ кільцями	1, 38
Повітряний зазор	15, 66
Під КЗ кільцем з боку подачі повітря	6, 88
Під КЗ кільцем з протилежної сторони подачі повітря	9, 53
Вентиляційні канали ротора	25, 00

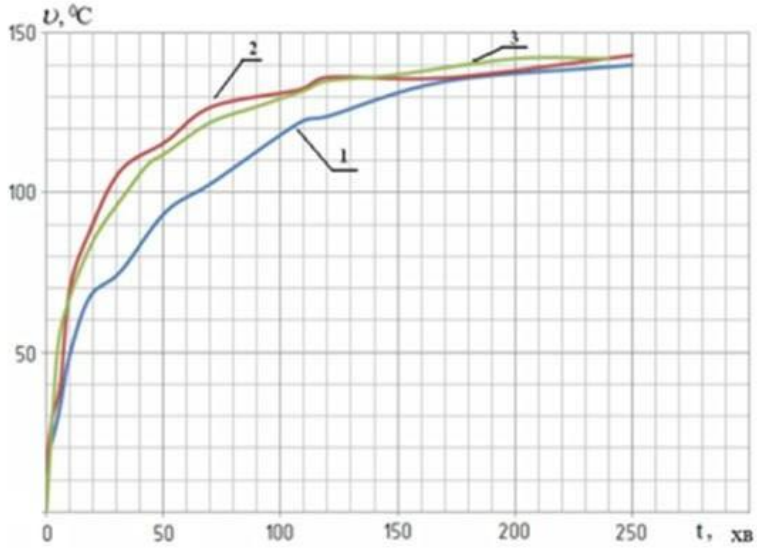
Таблиця 2.2. Результати моделювання встановленого теплового стану асинхронного тягового двигуна за допомогою ТММ

Найменування вузла електродвигуна	Температура вузлів електродвигуна, °С	
	U=3320 В I_f=336 А t=20°С n=796 об/хв	U=3000 В I_f=600 А t=20°С n=1306 об/хв
Лобова частина ОС із боку подачі повітря	91, 4	121, 7
Пазова частина статора обмотки	106, 0	121, 3
Лобова частина ОС з боку протилежної подачі повітря	97, 3	128, 8
Сердечник статора	104, 8	104, 8
Лобова частина ОР з боку подачі повітря	84, 5	105, 2
Пазова частина обмотки ротора	88, 0	90, 1
Лобова частина ОР з боку протилежної подачі повітря	88, 8	113, 7
Сердечник ротора	84, 0	87, 7
Короткозамкнене кільце з боку подачі повітря	84, 5	105, 1
КЗ кільце з боку протилежної подачі повітря	88, 8	113, 6
Підігрів повітря в області 3, вихідна температура повітря	41, 2	56, 4

Оцінка аналіз результатів розробленої теплової математичної моделі

Розбіжності між результатами, отриманими за допомогою теплової математичної моделі, і моделюванням в середовищі ELCUT не перевищують 10 %. Найбільше відхилення між результатами моделювань було отримано для вузлів електродвигуна, розташованих з протилежного боку від подачі охолоджувального повітря. Це можна пояснити тим, що моделювання в програмному комплексі ELCUT не дозволяє врахувати систему вентиляції. Аксіальна незалежна вентиляція, що застосовується в таких електродвигунах, сприяє кращій тепловіддачі з лобових частин машини зі сторони подачі охолоджувального потоку. У той час як великі габарити АТЕД сприяють підігріву охолоджувального повітря, що проходить вздовж осі машини, за рахунок теплоотдачі вузлів, розташованих по напрямку його руху, і погіршення теплоотдачі від лобових частин обмоток електродвигуна зі сторони виходу охолоджувального повітря.

Моделювання цього режиму роботи електродвигуна показує, що режими перевантаження сприяють перегріву лобових обмоток частин електродвигуна порівняно з пазовими частинами. Це є наслідком того, що тепловідведення з лобових частин при збереженні всіх інших вхідних параметрів електродвигуна залишається практично незмінним, при збільшенні електричних втрат в обмотці приблизно в 4 рази.

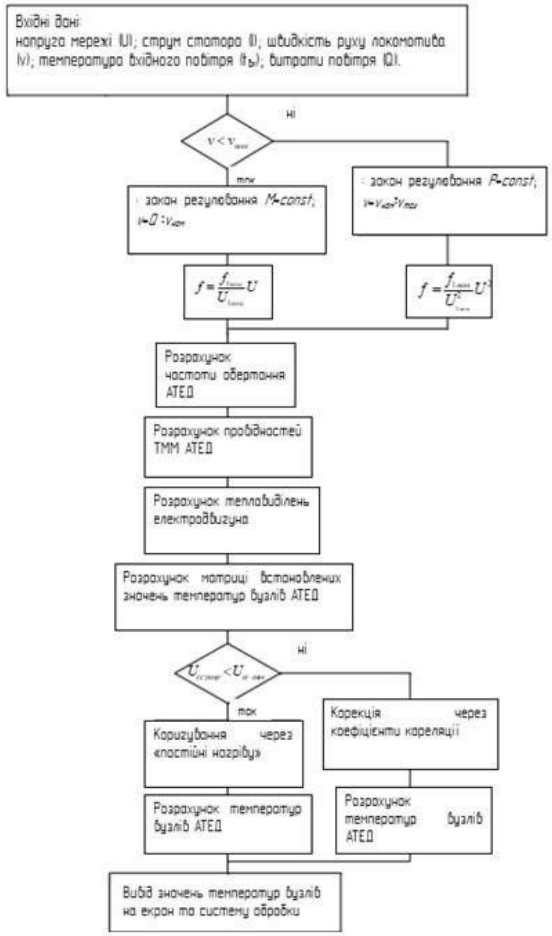


Криві нагрівання обмотки статора тягового електродвигуна НТА-1200:
1 – розрахунок нагрівання за допомогою коефіцієнтів впливу;
2 – розрахунок нагрівання за допомогою теплових постійних;
3 – експериментальна крива нагрівання (згідно джерела [12])

Експериментальна крива нагрівання обмотки статора позначена номером 3. Криві 1 і 2 представляють залежності, отримані за допомогою моделювання двома раніше представленими методами. Як видно з графіка, крива 1, отримана на основі використання для розрахунку нагрівання обмотки статора кореляційної залежності від температури осердя статора електродвигуна, має вигляд ламаної кривої. Через це похибка між експериментальними та розрахунковими даними є досить великою. Максимальна величина похибки становить 18%.

Залежність, отримана з використанням методики через теплові постійні, має більшу збіжність. Максимальна отримана похибка між розрахунковими даними цим способом і експериментальними даними не перевищує 8,3%.

Алгоритм роботи системи моніторингу теплового стану тягових електродвигунів змінного струму



На рисунку зображений алгоритм роботи системи моніторингу теплового стану тягових електродвигунів змінного струму.

Згідно з представленим алгоритмом, система моніторингу має наступний принцип роботи:

Початковим етапом є зчитування вхідних даних у систему: струм статора, напруга живильної мережі, температура навколишнього середовища, витрата охолоджувального повітря, швидкість руху електровоза. На основі отриманих даних відбувається порівняння швидкості руху локомотива з номінальним значенням швидкості для визначення закону регулювання частотою і її визначення. Наступним етапом є визначення частоти обертання АТЕД за величиною швидкості локомотива. Потім проводиться розрахунок параметрів теплової математичної моделі: розрахунок проводимостей схеми заміщення та розрахунок втрат. Результатом проміжного розрахунку є визначення встановленого температурного поля машини при цих вхідних параметрах.\

Застосування запропонованої системи дозволить знизити кількість режимів експлуатації ТЕД при яких відбувається перегрів тягових двигунів, при яких відбувається зниження показників надійності

Висновки до кваліфікаційної роботи

Основними результатами теоретичної та практичної роботи зі створення системи моніторингу теплового стану асинхронних тягових електродвигунів електровозів є наступні:

1. Розроблена система теплового моніторингу тягових асинхронних двигунів дозволяє здійснювати безперервний контроль теплового стану всіх елементів конструкції АТЕД (як на нерухомих, так і на обертових частинах) під час його експлуатації на електровозі в режимі реального часу. Ця система моніторингу може бути використана для будь-яких асинхронних двигунів за умови введення відповідних параметрів, геометричних розмірів і властивостей використовуваних ізоляційних матеріалів.

2. Мінімальними вхідними параметрами, необхідними для нормальної роботи системи теплового моніторингу для всіх режимів експлуатації АТЕД, є: напруга мережі, фазний струм статора АТЕД, швидкість руху локомотива, витрата охолоджуючого повітря, температура вхідного повітря та температура вибраного опорного вузла. Для реалізації роботи системи моніторингу АТЕД на електровозі потрібна лише установка датчика витрати охолоджуючого повітря і його температури, а інші вхідні параметри можна отримати з встановленої штатної апаратури.

3. Математична модель теплового стану асинхронного тягового електродвигуна, розроблена на основі методу теплових схем заміщення, має високу деталізацію елементів конструкції статора і ротора, пов'язаних з умовами охолодження, враховує підігрів охолоджуючого повітря, що проходить через електродвигун, що дозволяє з більшою точністю розраховувати усталене теплове поле АТЕД. Необхідними вхідними даними є: фазний струм статора, напруга і частота мережі живлення, температура вхідного повітря, витрата охолоджуючого повітря.

4. У розробленій моделі теплового стану тягового електродвигуна в неусталених режимах слід:

- при температурі опорного вузла нижче усталеної використовувати методику визначення температур вузлів АТЕД, що базується на розрахунку постійних нагріву;
- при температурі опорного вузла вище усталеної використовувати методику, засновану на визначенні кореляційної залежності між температурами вузлів. При цьому величини похибок визначення температур вузлів АТЕД не перевищують 10 %.

5. Моделювання усталених температурних полів у всіх режимах роботи електродвигуна показало необхідність контролю температур лобових частин обмоток як таких, що мають найвищу температуру нагріву. Тому температуру цього вузла слід використовувати як вихідний параметр для коригування навантаження тягових електродвигунів електровоза. Це також було підтверджено моделюванням режимів роботи в середовищі ELCUT.

6. Результати експериментальних досліджень підтверджують, що використання теплових математичних моделей дає достовірну інформацію про значення температур вузлів електродвигуна. Похибки розрахунків в усталеному режимі та режимах, близьких до усталеного, не перевищують 5 %. Найбільша похибка розрахунків температур вузлів АТЕД у неусталених режимах складає 8,3 %.