

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ

Факультет "Транспортна інженерія"

Кафедра "Управління та експлуатація рухомого складу"

"ДО ЗАХИСТУ"

Зав. кафедрою В. Боднар БОДНАР

"12" 01 2026 р.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи *магістра*

на тему: "Підвищення ефективності охолодження тягових
двигунів електровозів"

за освітньою програмою: "Локомотиви та локомотивне господарство"
зі спеціальності 273 "Залізничний транспорт"
галузі знань 27 "Транспорт та послуги"

Виконав: студент групи ЛГ2421

Олексій ПАНЧЕНКО

Керівник Дмитро БОБИРЬ

Нормоконтролер Людмила КОЛОДІЙ

Засвідчую, що у цій роботі немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних посилань.

Студент Олексій ПАНЧЕНКО

Дніпро, 2026

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
UKRAINIAN STATE UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGIES

Faculty “*Transport engineering*”

Department “*Management and operation of rolling stock*”

Explanatory Note
to Master’s Thesis

master

on the topic: “**Improving the cooling efficiency of traction motors in electric locomotives**”

according to educational curriculum: “*Locomotives and Locomotive Economy*”
in the Speciality *J7 “Railway transport”*

Branch of knowledge *27 “Transport and services”*

Done by the student of the group *LG2421*:

Oleksiy PANCHENKO

Scientific Supervisor: Dmytro BOBYR

Normative controller: Liudmyla KOLODII

Dnipro, 2026

Український державний університет науки і технологій

Факультет «*Транспортна інженерія*»,

кафедра «*Управління та експлуатація рухомого складу*»

Спеціальність *J7 «Залізничний транспорт»*

за ОП «*Локомотиви та локомотивне господарство*»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри «Локомотиви»

_____ Борис БОДНАР

«_____» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу на здобуття ОС «*магістр*»

студенту групи *ЛГ2421*

Панченку Олексію Віталійовичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: «**Підвищення ефективності охолодження тягових двигунів електровозів**»

затверджена наказом від «02» жовтня 2025 р № 1401ст

2. Термін подання студентом закінченої роботи «13» січня 2026 р

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: проектно-конструкторська документація на елементи системи охолодження ТЕД електровоза; статистична інформація з надійності електровозів; аеродинамічні опори в досліджуваному об'єкті в експлуатації.

4. Перелік креслень (демонстративного матеріалу)

1) Загальний вигляд тягового електричного двигуна електровоза змінного струму.

2) Схема вентиляції тягового електричного двигуна та напрямки руху охолоджувального повітря.

3) Тривимірний модель тягового електричного двигуна для CFD-досліджень.

- 4) Розрахункова область і граничні умови CFD-моделі тягового електричного двигуна.
- 5) Розподіл швидкостей і структура повітряних потоків у тяговому електричному двигуні.
- 6) Температурні поля тягового електричного двигуна та порівняльна оцінка схем вентиляції.

5. Перелік питань до розробки та термін виконання

| Назва розділу кваліфікаційної роботи | Термін виконання | Обсяг розділу, % |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|------------------------|
| Аналіз несправностей досліджуваного об'єкта. Аналіз конструкції та роботи досліджуваного об'єкта | 12.11.2025 | 30 |
| Побудова тривимірної моделі ТЕД | 12.12.2025 | 30 |
| Аналіз 3D-моделі | 14.01.2026 | 40 |

Студент _____ Олексій ПАНЧЕНКО

Керівник роботи _____ Дмитро БОБИРЬ

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістра:

91 с., 32 рис., 27 табл., 12 джерел.

Кваліфікаційна робота магістра присвячена дослідженню та підвищенню ефективності охолодження тягових електричних двигунів електровозів змінного струму, які експлуатуються в умовах значних теплових, електромагнітних і механічних навантажень.

Об'єкт дослідження – процеси формування теплового режиму та повітряного охолодження тягових електричних двигунів електровозів у реальних умовах експлуатації.

Метою роботи є підвищення ефективності системи охолодження тягових електродвигунів шляхом аналізу причин їх перегріву, дослідження теплових і аеродинамічних процесів у внутрішніх порожнинах двигуна та обґрунтування технічних рішень, спрямованих на зниження температурних перевантажень і підвищення експлуатаційної надійності електричних машин.

Для досягнення поставленої мети у роботі використано аналітичні, розрахункові та чисельні методи дослідження. Проведено аналіз статистики відмов тягових електродвигунів, що дозволило встановити визначальну роль перегріву обмоток якоря та полюсів у зниженні їх надійності. Для дослідження теплових і вентиляційних процесів побудовано детальну тривимірну модель тягового електродвигуна в середовищі САПР SolidWorks. Подальший аналіз виконано з використанням САЕ-пакета SolidWorks Flow Simulation на основі методів обчислювальної гідродинаміки (CFD), із застосуванням рівнянь Нав'є-Стокса, енергетичного балансу та критеріїв подібності теплообміну.

Одержані результати показали, що традиційні схеми вентиляції не забезпечують рівномірного тепловідведення та призводять до локальних перегрівів обмоток. Найбільш ефективним виявився варіант із використанням одного впускного та двох випускних отворів у поєднанні зі збільшенням витрати охолоджувального повітря та швидкості обертання вентилятора, що дозволило знизити максимальну температуру обмотки головного полюса та температуру повітря в зоні лобових частин обмотки якоря до допустимих значень. Запропоновані технічні рішення можуть бути використані під час модернізації систем вентиляції тягових електродвигунів і сприяють підвищенню їх ресурсу та надійності.

Ключові слова: ТЯГОВИЙ ЕЛЕКТРОДВИГУН, ЕЛЕКТРОВОЗ, ТЕПЛОВИЙ РЕЖИМ, ВЕНТИЛЯЦІЯ, CFD-МОДЕЛЮВАННЯ, SOLIDWORKS FLOW SIMULATION, ОХОЛОДЖЕННЯ.

ЗМІСТ

| | |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП..... | 6 |
| 1 АНАЛІЗ НЕСПРАВНОСТЕЙ ДОСЛІДЖУВАНОВОГО ОБ’ЄКТА..... | 8 |
| 1.1 Аналіз відмов тягових електродвигунів..... | 8 |
| 1.2 Аналіз причин перегріву тягових двигунів..... | 15 |
| 2 АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЇ ТА РОБОТИ ДОСЛІДЖУВАНОВОГО ОБ’ЄКТА..... | 22 |
| 2.1 Загальні відомості..... | 22 |
| 2.2 Будова та основні параметри вузлів тягового електродвигуна | 23 |
| 2.3 Повітряні потоки..... | 44 |
| 2.4 Джерела тепловиділення..... | 54 |
| 3 ПОБУДОВА ТРИВИМІРНОЇ МОДЕЛІ ТЕД..... | 60 |
| 3.1 Загальні відомості..... | 60 |
| 3.2 Аналіз САПР | 60 |
| 3.3 Побудова тривимірної моделі | 61 |
| 4 АНАЛІЗ 3D-МОДЕЛІ | 64 |
| 4.1 Загальні відомості..... | 64 |
| 4.2 Постановка умов задачі..... | 74 |
| 4.3 Аналіз результатів розрахунків..... | 76 |
| ВИСНОВКИ..... | 91 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... | 93 |

| | | | | | | | | |
|--------------|-----------------|----------|--------|------|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|-------|---------|
| | | | | | <i>0032.200177.000.04КР.ПЗ</i> | | | |
| змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | <i>Підвищення ефективності охолодження тягових двигунів електровозів</i> | Літ. | Аркуш | Аркушів |
| Розроблено. | <i>Панченко</i> | | | | | 5 | 91 | |
| Перевір. | <i>Бобирь</i> | | | | | | | |
| Рецензування | | | | | | | | |
| Н. Контр. | <i>Колодій</i> | | | | | <i>УДУНТ, зр. ЛГ2421</i> | | |
| Затверд. | | | | | | | | |

ВСТУП

Сучасний електровоз є складною електромеханічною системою, надійність і ефективність роботи якої визначається передусім працездатністю його тягових електричних двигунів. Саме тягові електродвигуни безпосередньо реалізують тягове зусилля та забезпечують рух поїзда в різних експлуатаційних режимах, а тому істотно впливають як на енергетичні показники, так і на експлуатаційну надійність локомотива в цілому.

Тягові електричні двигуни працюють у надзвичайно складних умовах, що характеризуються значними динамічними навантаженнями, постійними вібраціями, широким діапазоном зміни напруги живлення зі значною несиметрією фаз, а також коливаннями температури навколишнього середовища від мінус 50 °С до плюс 60 °С. За таких умов теплові режими роботи електродвигунів набувають критичного значення, оскільки перегрів ізоляції обмоток, підшипникових вузлів та струмопровідних частин є однією з основних причин передчасних відмов.

Відмова будь-якого тягового двигуна під час руху електровоза з поїздом, як правило, призводить до обмеження його експлуатаційних можливостей, а в окремих випадках – до повної втрати працездатності локомотива. Хоча за відмови одного двигуна поїзд ще може продовжувати рух за рахунок справних тягових машин, вихід з ладу декількох двигунів унеможлиблює реалізацію необхідних тягових характеристик. Такі ситуації спричиняють порушення графіка руху поїздів, необхідність залучення допоміжного локомотива, постановку електровоза на позаплановий ремонт і, як наслідок, – додаткові фінансові витрати на відновлення його технічного стану.

Відмови електричних машин у кінцевому підсумку призводять до суттєвих економічних втрат, зниження пропускнуєї спроможності дільниць та погіршення надійності перевізного процесу. У зв'язку з цим підвищення ресурсу та безвідмовності роботи тягових електродвигунів є одним із пріоритетних завдань сучасного локомотивобудування й експлуатації [1].

Одним із ключових чинників, що визначає надійність тягових електродвигунів, є ефективність їх системи охолодження. Неякісне тепловідведення призводить до прискореного старіння ізоляції, зростання ймовірності міжвиткових замикань, відмов підшипників і зниження загального ресурсу електричних машин. Тому

| | | | | | | |
|-------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200177.000.04КР.ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 6 |
| змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

проблема підвищення ефективності охолодження тягових двигунів електровозів є актуальною, технічно значущою та має важливе практичне значення для забезпечення надійної та економічно ефективної роботи залізничного транспорту.

Об'єкт дослідження – процес теплового режиму та охолодження тягових електричних двигунів електровозів у реальних умовах експлуатації.

Предмет дослідження – методи, засоби та конструктивні й режимні параметри систем охолодження тягових електродвигунів електровозів, що впливають на їх тепловий стан, надійність та ефективність роботи.

Мета магістерської роботи – підвищення ефективності охолодження тягових електричних двигунів електровозів шляхом аналізу існуючих систем охолодження, дослідження теплових режимів роботи та обґрунтування технічних заходів щодо зниження температурних перевантажень і підвищення надійності роботи електричних машин.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно розв'язати такі основні завдання:

- проаналізувати умови експлуатації тягових електричних двигунів електровозів та фактори, що впливають на їх тепловий стан;
- виконати огляд існуючих систем охолодження тягових електродвигунів та оцінити їх ефективність;
- дослідити основні причини перегріву тягових електродвигунів у процесі експлуатації;
- провести аналіз впливу температурних режимів на ресурс та надійність ізоляції обмоток і основних вузлів електричних машин;
- обґрунтувати напрями підвищення ефективності охолодження тягових електродвигунів;
- запропонувати технічні заходи щодо удосконалення системи охолодження та оцінити їх вплив на експлуатаційну надійність електровоза;
- виконати оцінку техніко-економічної доцільності запропонованих рішень.

У подальшому як типовий об'єкт дослідження прийнято вантажний електровоз змінного струму серії ВЛ80, що є однією з наймасовіших серій локомотивів змінного струму, які експлуатуються в АТ «Укрзалізниця».

| | | | | | | |
|-------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200177.000.04КР.ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 7 |
| змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

1 АНАЛІЗ НЕСПРАВНОСТЕЙ ДОСЛІДЖУВАНОВОГО ОБ'ЄКТА

1.1 Аналіз відмов тягових електродвигунів

На сучасному тяговому рухомому складі широке застосування отримали тягові електричні двигуни постійного струму, що зумовлено їх м'якими регульовальними характеристиками та високою стійкістю до перевантажень. Водночас ефективність їх роботи істотно знижується під впливом несприятливих чинників експлуатації, зокрема підвищеної вологості або надмірної сухості повітря, різких коливань температури навколишнього середовища та інших зовнішніх впливів. У процесі роботи електровоза тягові електродвигуни функціонують за умов значних коливань струму, напруги й, відповідно, температури. Періодичні цикли нагрівання та охолодження обмоток і ізоляційних матеріалів, які мають різні коефіцієнти теплового розширення, призводять до прискореного старіння ізоляції та її механічного зношування.

На підставі численних аналітичних досліджень і звітних матеріалів достовірно встановлено, що тягові електродвигуни є найбільш навантаженим елементом електровоза та виконують ключову функцію у забезпеченні його руху. Саме на них припадає основна частка відмов обладнання електровозів. Поява відмов ТЕД зумовлюється як важкими умовами експлуатації при підвищених тягових навантаженнях і помилковим вибором режимів роботи локомотивними бригадами, так і рівнем якості виконання ремонтів [2].

Умови експлуатації тягових електродвигунів на різних залізницях суттєво відрізняються та визначаються не лише кліматичними чинниками, а й параметрами поздовжнього профілю колії, рівнем коливань напруги в контактній мережі, вантажонапруженістю та інтенсивністю руху поїздів.

Експлуатація ТЕД в умовах значних температурних перепадів у поєднанні з різкими змінами швидкості руху локомотива призводить до стрибкоподібної зміни навантажень на двигуни, частоти обертання їх якорів, виникнення поштовхових навантажень і підвищеної вібрації. Часті пуски та перевантаження спричиняють інтенсивне нагрівання якорних обмоток, що призводить до прискореного теплового

| | | | | | | |
|-------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200177.000.04КР.ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 8 |
| змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

старіння та руйнування ізоляції [3].

Нерівномірність зменшеного подавання охолоджувального повітря у внутрішні порожнини двигуна, відмінності в навантаженні на осі та діаметрах бандажів колісних пар, а також розузгодження швидкісних характеристик тягових електродвигунів зумовлюють нерівномірний перегрів обмоток якоря та полюсних котушок. У разі перевищення гранично допустимих температур якорних обмоток ізоляція зазнає часткової втрати еластичності, переходить у жорсткий і крихкий стан, що призводить до істотного зниження її електричної міцності.

Згідно з результатами численних досліджень [4, 5], у разі перегріву обмоток відбувається інтенсивне випаровування летких компонентів ізоляційних матеріалів, що спричиняє розшарування ізоляційного шару, утворення пористої структури та подальшу появу мікротріщин. В умовах експлуатації за наявності постійної вібрації, внаслідок руху повітря через нещільності ущільнень колекторних люків, повітропроводів, а також через частково відкриті вентиляційні отвори тягових електродвигунів, усередину машин, попри наявність снігозахисних елементів конструкції, проникають вода та сніг. Крім того, зволоження внутрішніх елементів двигуна відбувається і під час встановлення холодного локомотива в опалюване приміщення [6].

За режимів роботи без навантаження волога, що потрапляє всередину двигуна, активно поглинається ізоляцією. Проникаючи в пори та найдрібніші тріщини ізоляційного матеріалу, вона істотно знижує його механічну та електричну міцність. Особливо інтенсивне зволоження ізоляції спостерігається за умов підвищеної вологості повітря в поєднанні з різким зростанням температури навколишнього середовища [2, 7].

Осінньо-зимовий період є найбільш несприятливим для експлуатації тягових електродвигунів електровозів, оскільки температурні перепади та потрапляння снігу всередину двигунів через негерметичність колекторних люків і повітропроводів призводять до інтенсивного зволоження ізоляції та, як наслідок, до різкого зниження її електричного опору.

Під час підвищення температури навколишнього повітря в умовах добових

| | | | | | | |
|-------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200177.000.04КР.ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 9 |
| змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

температурних коливань або відлиг тяговий електродвигун прогривається повільно. У разі контакту вологого повітря з більш холодними елементами ТЕД відбувається його охолодження до межі вологонасичення, унаслідок чого надлишкова водяна пара конденсується на обмотках і колекторі у вигляді інею. Це призводить до перезволоження ізоляції та ініціює процес її руйнування або, за наявності вже розвинутих дефектів, інтенсифікує подальшу деградацію.

Інтенсивність інеєутворення визначається швидкістю зміни температури й відносною вологістю повітря. Зокрема, за температур нижче $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ утворення інею, як правило, не спостерігається через незначний температурний градієнт, тоді як перепаду температури на $5\text{--}6\text{ }^{\circ}\text{C}$ протягом 6 годин цілком достатньо для його появи [8].

Для запобігання інеєутворенню перед постановкою електровоза в опалювальний цех тягові електродвигуни необхідно попередньо підігрівати. З цією метою застосовують метод прогрівання від вентиляторів електровоза: перед заїздом у цех вмикають систему вентиляції, унаслідок чого двигуни прогриваються до температури, близької до температури повітря в приміщенні, і лише після цього локомотив подають у цех.

Окремі пошкодження якорів тягових електродвигунів виникають унаслідок неправильного вибору режимів керування електровозом, що спричиняє лавиноподібне боксування колісних пар і, як наслідок, перевантаження ТЕД. Вихід з ладу котушок головних і додаткових полюсів зумовлюється проникненням вологи у внутрішні порожнини остова через неякісні ущільнення, а також послабленням їх кріплення на осердях. Крім того, ненадійне закріплення виводів обмоток полюсів призводить до передчасного виходу з ладу обладнання та негативно впливає на його довговічність.

У процесі експлуатації тягові електродвигуни зазнають значних динамічних навантажень, що передусім несприятливо позначається на роботі щіткотримального вузла та стані робочої поверхні колектора. Це, своєю чергою, зумовлює підвищене іскріння під щітками, погіршення процесу комутації, виникнення кругового вогню по колектору та, зрештою, перекидання електричної дуги на корпус із

| | | | | | | |
|-------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200177.000.04КР.ПЗ | Арк. |
| змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 10 |

подальшим спрацьовуванням захисту [9].

Оцінювання технічного стану локомотивів і визначення їх надійності можливі лише на основі аналізу надійності рухомого складу, результати якого свідчать, що найбільш уразливим вузлом є саме тяговий електродвигун [1, 10]. За матеріалами багаторічного аналізу технічного стану електровозів, встановлено, що тягові електродвигуни є найбільш пошкоджуваним вузлом вантажних електровозів.

На ТЕД електровозів припадає 54 % усіх відмов, на електричне обладнання – 25 %, на механічне – 19 %, на гальмівне та пневматичне – 2 % [1, 4].

Згідно зі статистичними даними найбільша кількість відмов у роботі припадає на тягові електродвигуни вантажних електровозів серії ВЛ80. Друге місце посідають ТЕД електровозів серій 2ЕС5К і 2ЕЛ5. При цьому конструкційно на електровозах обох серій застосовуються тягові електродвигуни з обмоткою якоря з відкритими лобовими з'єднаннями.

На практиці майже кожен другий тяговий електродвигун потребує виконання капітального ремонту не за напрацюванням, а за фактичним технічним станом через пошкодження, пов'язані з пробоем ізоляції якірних обмоток і котушок полюсів, міжвитковими замиканнями, тріщинами валів якорів, зносом шийок та іншими дефектами. Згідно з результатами аналізу, найбільша частка відмов ТЕД припадає саме на пробій ізоляції, що переважно зумовлюється складними умовами експлуатації: перевантаженнями, комутаційними перенапругами, перезволоженням, боксуванням колісних пар та іншими супутніми чинниками [10].

Установлено і статистично підтверджується, що максимальна кількість відмов ТЕД, пов'язаних із пробоем ізоляції, спостерігається в періоди різких температурних коливань, коли суттєво зростає ймовірність зволоження обмоток унаслідок проникнення вологи всередину двигуна.

Для обладнання, працездатність якого може бути відновлена після виникнення відмови, показники надійності визначають за статистичними даними, отриманими з використанням планів випробувань типу $[N, R, L_0]$ та $[N, R, r]$. Як показник безвідмовності [11] у цьому разі застосовують параметр потоку відмов $\omega(l)$. За визначенням параметр $\omega(l)$ характеризує середню кількість відмов локомотива або

| | | | | | | |
|-------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200177.000.04КР.ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 11 |
| змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

Під час аналізу залежностей зміни параметрів потоків відмов тягових електродвигунів електровозів встановлено такі характерні закономірності:

– у процесі тривалої експлуатації відбувається поступове зниження надійності ізоляції;

– спостерігається стале зростання параметра потоку відмов ізоляції;

– зафіксовано істотні сезонні коливання значень ω упродовж року;

– відзначається підвищення потоку відмов котушок головних і додаткових полюсів, а також компенсаційної обмотки, що зумовлено тривалою роботою ТЕД під струмовими навантаженнями, які перевищують номінальні значення, унаслідок чого прискорюється процес старіння ізоляційних матеріалів.

Розподіл відмов тягових електродвигунів електровозів змінного струму на РФ «Львівська залізниця» за 2024 рік наведено на рис. 1.1.

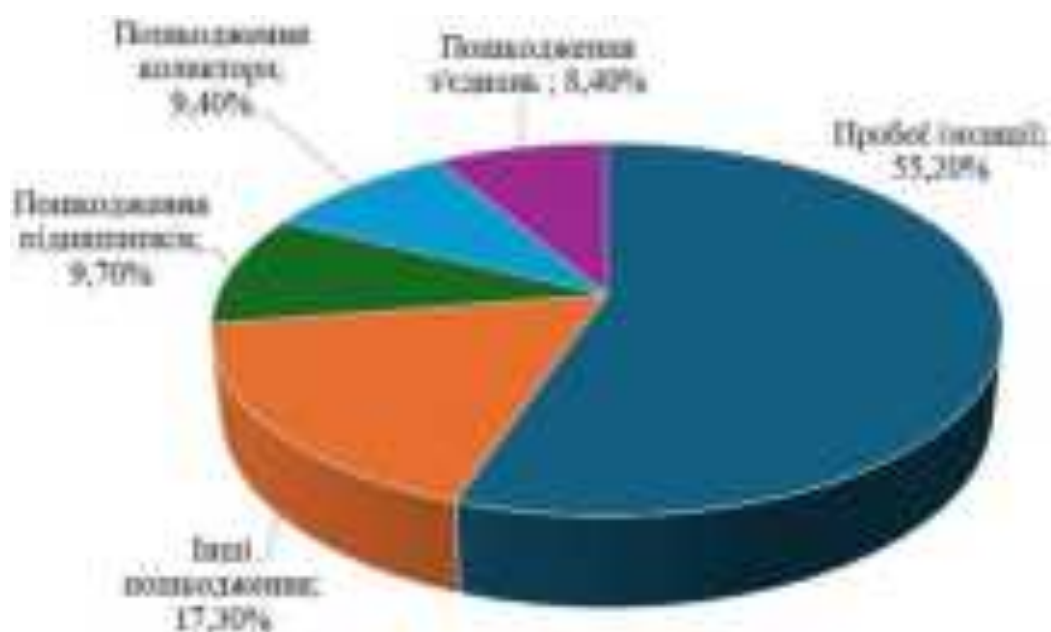


Рисунок 1.1 – Розподіл відмов тягових електродвигунів електровозів змінного струму на РФ «Львівська залізниця» за 2024 рік

Як видно з діаграми основне місце по відмовах займає пробої ізоляції.

| | | | | | | |
|-------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200177.000.04КР.ПЗ | Арк. |
| змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 14 |

1.2 Аналіз причин перегріву тягових двигунів

Процеси перетворення електричної енергії в механічну та у зворотному напрямі супроводжуються неминучими енергетичними втратами, що переходять у теплову енергію. Частина цього тепла відводиться у навколишнє середовище, а інша – спричиняє нагрівання елементів електричної машини. Саме тепловий режим є визначальним фактором встановлення номінальних струмів і потужностей тягових електродвигунів. Температура, до якої нагріваються вузли машини, залежить не лише від інтенсивності виділення тепла, а й від умов його відведення. У зв'язку з цим ефективність системи охолодження істотно впливає на габаритні розміри тягових електродвигунів за заданої потужності або, навпаки, на величину потужності за незмінних габаритів.

Як охолоджувальне середовище для тягових електричних машин застосовується повітря. Інтенсивність вентиляції оцінюють коефіцієнтом вентиляції, який визначається у відсотках як відношення потужності тривалого режиму роботи двигуна до його годинної потужності. Для електровозних тягових двигунів з незалежною вентиляцією значення цього коефіцієнта становить 85–88 %, а для двигунів електропоїздів із самовентиляцією — 70–74 % відповідно до [1–3].

Витрата повітря, що подається через електродвигун із незалежною системою вентиляції за тривалого режиму роботи, повинна забезпечувати повне відведення тепла, яке утворюється внаслідок електричних та механічних втрат, і підтримувати допустимий рівень перевищення температури. Раціональний вибір параметрів вентиляції має важливе експлуатаційне значення. Недостатня вентиляція призводить до підвищеного нагрівання обмоток і, відповідно, до обмеження потужності двигуна, тоді як надмірна вентиляція спричиняє зайві витрати електроенергії та зниження коефіцієнта корисної дії електричної машини.

Основними причинами перегріву тягових електродвигунів є перевантаження, погіршення умов вентиляції, биття колектора, незадовільний стан контактних з'єднань та інші експлуатаційні фактори. Характерні ознаки перегріву та їх основні причини наведені в табл. 1.2.

| | | | | | | |
|-------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200177.000.04КР.ПЗ | Арк. |
| змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 15 |

[Redacted]

| | | |
|------------|------------|------------|
| [Redacted] | [Redacted] | [Redacted] |
| [Redacted] | [Redacted] | [Redacted] |
| [Redacted] | [Redacted] | [Redacted] |
| [Redacted] | [Redacted] | [Redacted] |
| [Redacted] | [Redacted] | [Redacted] |

Статистика відмов тягових електродвигунів електровозів 2ЕС5К за 2022–2024 роки через перегрів його складових частин наведена в табл. 1.3.

Таблиця 1.3 – Статистика відмов тягових електродвигунів через перегрів його складових частин

| [Redacted] | [Redacted] | [Redacted] | [Redacted] | [Redacted] |
|------------|------------|------------|------------|------------|
| [Redacted] | [Redacted] | [Redacted] | [Redacted] | [Redacted] |
| [Redacted] | [Redacted] | [Redacted] | [Redacted] | [Redacted] |
| [Redacted] | [Redacted] | [Redacted] | [Redacted] | [Redacted] |
| [Redacted] | [Redacted] | [Redacted] | [Redacted] | [Redacted] |
| [Redacted] | [Redacted] | [Redacted] | [Redacted] | [Redacted] |
| [Redacted] | [Redacted] | [Redacted] | [Redacted] | [Redacted] |
| [Redacted] | [Redacted] | [Redacted] | [Redacted] | [Redacted] |
| [Redacted] | [Redacted] | [Redacted] | [Redacted] | [Redacted] |

[Redacted]

| | | | | |
|------------|------------|------------|------------|------------|
| [Redacted] | [Redacted] | [Redacted] | [Redacted] | [Redacted] |
| [Redacted] | [Redacted] | [Redacted] | [Redacted] | [Redacted] |

Упродовж 2021–2024 років в АТ «Укрзалізниця» було зафіксовано 87 відмов тягових електродвигунів електровозів серії ВЛ80^{ВІ}. Із загальної кількості відмов 12 випадків стали наслідком підвищеного температурного режиму, що відповідає 13,8 %. Це свідчить про те, що раціональна та ефективна система вентиляції тягових двигунів здатна знизити інтенсивність їх відмов майже на 14 %.

З аналізу даних табл. 1.3 випливає, що обмотка якоря є найбільш термочутливим елементом тягового електродвигуна. Протягом трирічного періоду внаслідок її перегріву зафіксовано 7 випадків відмов. Для порівняння, через перегрів колекторного вузла за той самий проміжок часу сталося лише 3 відмови, а додаткового полюса – 2. За результатами проведеного аналізу побудовано гістограму (рис. 1.2), яка наочно ілюструє рівень термічної стійкості окремих вузлів двигуна.

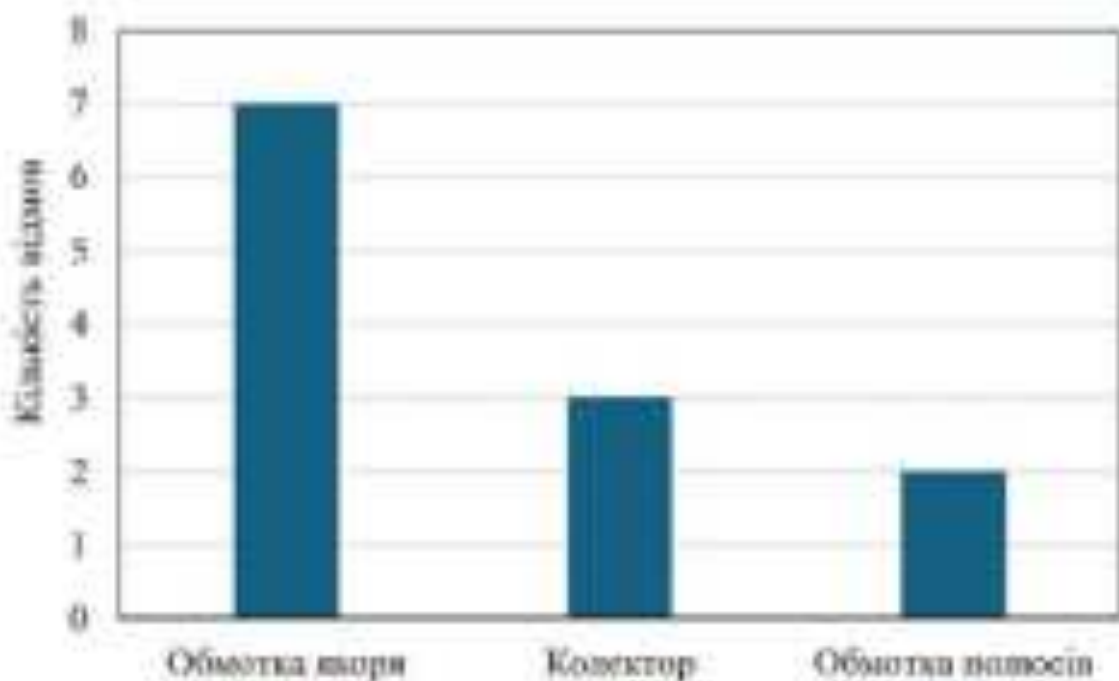


Рисунок 1.2 – Розподіл відмов складових ТЕД від впливу високих температур

Таким чином, теплові перевантаження, що переважно впливають на обмотку якоря, є одним із визначальних чинників зниження надійності тягових електричних двигунів. Зменшення впливу високих температур за рахунок удосконалення системи вентиляції, застосування теплостійкої ізоляції та оптимізації режимів навантаження дозволяє суттєво скоротити кількість відмов, підвищити міжремонтний ресурс двигунів і загальну експлуатаційну надійність локомотивів.

| | | | | | | |
|-------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200177.000.04КР.ПЗ | Арк. |
| змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 21 |

2 АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЇ ТА РОБОТИ ДОСЛІДЖУВАНОВОГО ОБ'ЄКТА

2.1 Загальні відомості

Тяговий електродвигун НБ-418 (рис. 2.1) є компенсованою шестиполусною електричною машиною пульсуючого струму з послідовним збудженням, оснащеною незалежною системою вентиляції та призначеною для опорно-осьового підвищення [3]. Така конструктивна схема забезпечує надійну передачу тягових зусиль від колісної пари до остова двигуна, а також стійкість агрегату до динамічних навантажень, що виникають у процесі експлуатації.

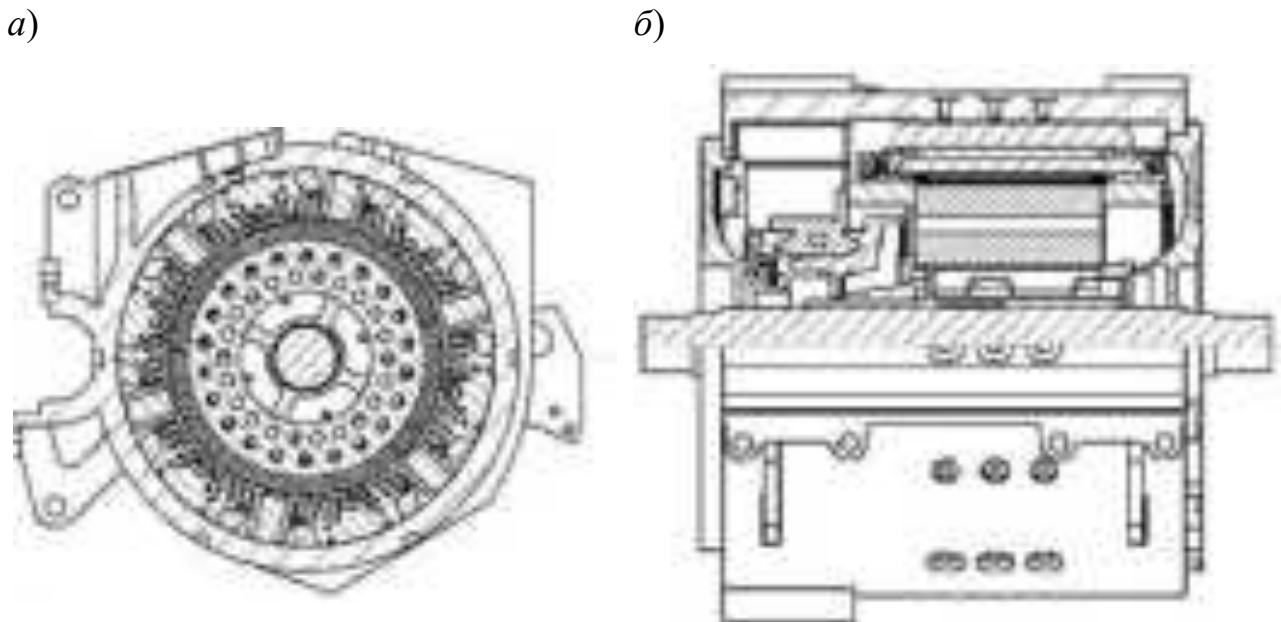


Рисунок 2.1 – Тяговий електродвигун НБ-418:

а) поперечний переріз; б) поздовжній переріз

Компенсаційна обмотка, розташована в полюсних наконечниках, призначена для зменшення спотворень магнітного поля якоря та покращення умов комутації, що особливо важливо під час роботи двигуна в режимах змінних навантажень. Послідовне збудження забезпечує високі пускові тягові характеристики, що є визначальним для електровозів вантажного призначення.

| | | | | | | |
|-------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200177.000.04КР.ПЗ | Арк. |
| змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 22 |

Система вентиляції тягового електродвигуна виконана за незалежною схемою. Охолоджувальне повітря надходить у внутрішній об'єм двигуна з боку колекторного вузла через спеціальний вентиляційний люк, проходить уздовж активних елементів – обмоток якоря та збудження, осердя якоря, колекторного вузла – і відводиться з боку, протилежного колектору, вгору під кузов електровоза через спеціальний кожух. Такий напрям руху повітряного потоку забезпечує інтенсивне відведення тепла від найбільш теплонанавантажених елементів, передусім обмотки якоря та колекторного вузла.

Водночас ефективність охолодження значною мірою залежить від стану вентиляційних каналів, герметичності кожухів, режимів роботи вентилятора та фактичних експлуатаційних навантажень. Порушення нормального теплового режиму призводить до прискореного старіння ізоляції, зростання ймовірності міжвиткових замикань і, як наслідок, до передчасних відмов тягового електродвигуна.

Таким чином, конструктивні особливості тягового електродвигуна та умови його теплового навантаження визначають необхідність детального аналізу теплових процесів і системи вентиляції при дослідженні причин відмов та розробленні заходів щодо підвищення його експлуатаційної надійності.

2.2 Будова та основні параметри вузлів тягового електродвигуна

2.2.1 Вал якоря двигуна

Вал якоря тягового електродвигуна призначений для об'єднання всіх конструктивних елементів якоря в єдиний вузол та виконання функції їх несучої основи, а також для передавання обертового моменту від двигуна через шестеренну передачу на зубчасте колесо [1]. Вал виготовляється зі сталі марки 20ХН3А, механічні та фізико-технологічні характеристики якої наведено в табл. 2.1.

Жорсткість вала якоря повинна забезпечувати відсутність недопустимих прогинів під дією максимальних механічних і електромагнітних навантажень, оскільки їх поява може призвести до торкання ротора зі статором, виникнення значних сил однобічного магнітного притягання, перекосів у підшипникових опорах та

| | | | | | | |
|-------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200177.000.04КР.ПЗ | Арк. |
| змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 23 |

порушення нормального зачеплення зубчастої передачі. За всіх режимів роботи рівень напружень у матеріалі вала не повинен перевищувати допустимих значень, установлених для відповідної марки сталі. Шорсткість посадочних поверхонь має відповідати не нижче 7-го класу.

Таблиця 2.1 – Параметри сталі 20ХНЗА

| | |
|--|--|
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |

Конструкція вала якоря наведена на рис. 2.2.

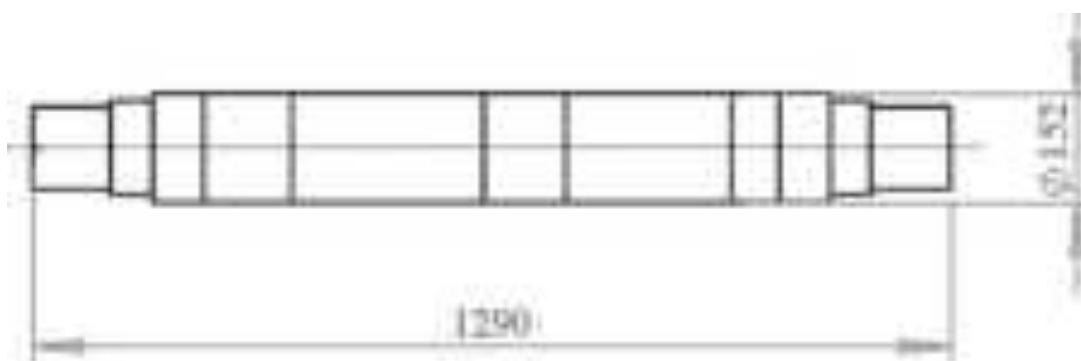


Рисунок 2.2 – Модель вала якоря тягового електродвигуна, побудована в середовищі SolidWorks

З метою забезпечення необхідної міцності вала всі переходи між ділянками різного діаметра виконані з плавними обрисами – галтелями, без застосування кільцевих проточок та шпонкових пазів.

2.2.2 Втулка якоря

Втулка якоря виконана у вигляді коробчастого елемента. За зовнішнім

діаметром вона оброблена для встановлення задньої натискної шайби, осердя якоря та колектора, а за внутрішнім – для щільної посадки на вал [4]. Монтаж втулки на вал здійснюється з натягом у межах 0,13–0,19 мм. На виступній частині втулки нарізана різьба M175×3, призначена для встановлення гайки кріплення колектора. Втулка, як і остов двигуна, виготовляється зі сталі марки 25Л, основні механічні характеристики якої наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Параметри сталі 25Л

| | |
|--|--|
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |

Вид втулки представлений на рис. 2.3.

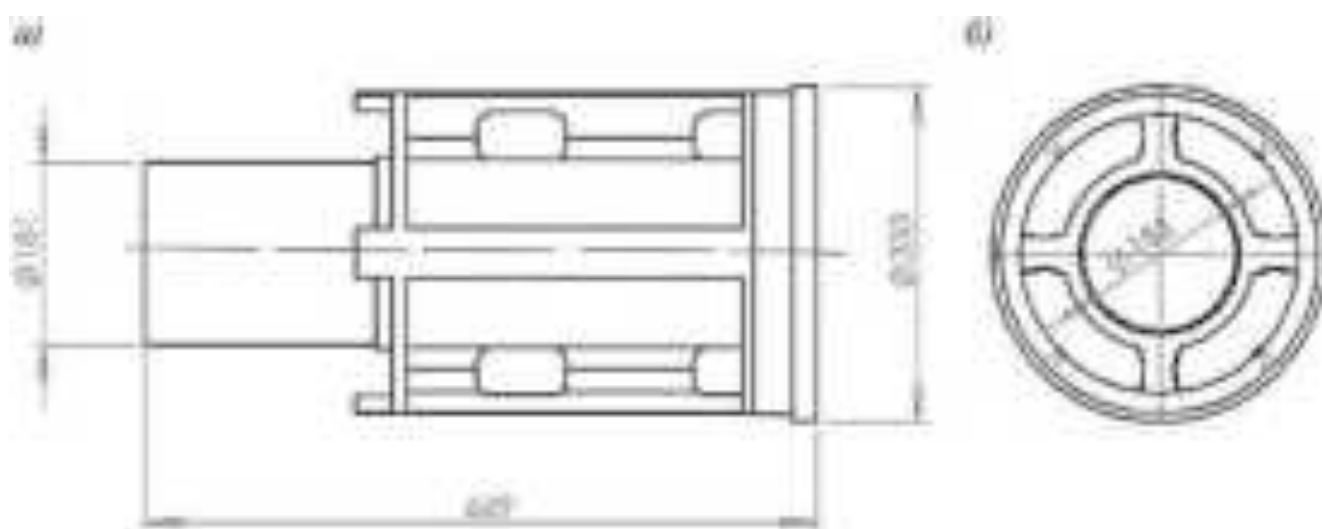


Рисунок 2.3 – Модель втулки якоря, виконана в середовищі SolidWorks:

а) вигляд зліва; б) вигляд спереду

2.2.3 Осердя якоря

Осердя якоря тягового електродвигуна призначене для замикання та пе-

| | | | | | | |
|-------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200177.000.04КР.ПЗ | Арк. |
| змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 25 |

їх забруднення призводять до порушення теплового режиму й істотного зростання ймовірності аварійних відмов.

Лист осердя якоря тягового електродвигуна наведено на рис. 2.4.

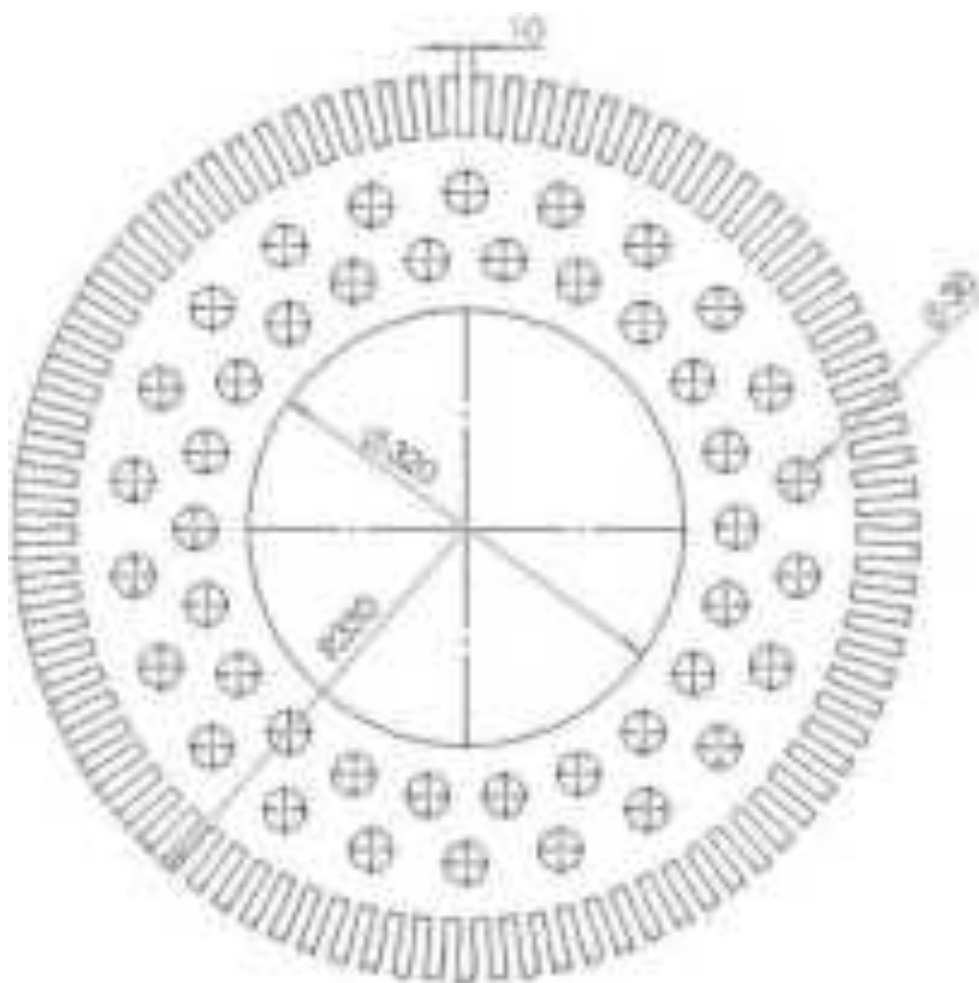


Рисунок 2.4 – Модель листа осердя якоря тягового електродвигуна, побудована в середовищі SolidWorks

2.2.4 Обмотка якоря

Сукупність провідників, розміщених у пазах осердя якоря та електрично з'єднаних із колекторними пластинами, утворює обмотку якоря. У тягових електродвигунах вона, як правило, виконується у вигляді окремих секцій або котушок. Кожна така секція складається з кількох провідників, виготовлених із прямокутної

| | | | | | | |
|-------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200177.000.04КР.ПЗ | Арк. |
| змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 27 |

мідної шини [4]. Основні фізико-механічні характеристики міді наведені в табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Параметри прямокутної міді

| | |
|--|--|
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |

У тягових електродвигунах найпоширенішими є хвильова та петльова схеми обмотки. При цьому хвильова обмотка переважно застосовується в двигунах потужністю до приблизно 500 кВт, що зумовлено її здатністю забезпечувати необхідні пускові та тягові характеристики. Секція обмотки якоря зображена на рис. 2.5.



Рисунок 2.5 – Секція обмотки якоря

Тип обмотки якоря безпосередньо впливає на характер електромагнітних процесів у тяговому електродвигуні. Хвильова обмотка характеризується меншою кількістю паралельних гілок, що зумовлює підвищені значення струму в окремих провідниках і сприяє формуванню більш рівномірного електромагнітного моменту.

Петльова обмотка, навпаки, має більшу кількість паралельних гілок, що дозволяє зменшити струмові навантаження на провідники та покращити умови комутації, особливо в режимах змінних навантажень. Вибір типу обмотки визначається потужністю двигуна, характером експлуатаційних режимів та вимогами до пускових і тягових характеристик.

Підвищені струмові навантаження в елементах обмотки зумовлюють інтенсивне тепловиділення внаслідок втрат у міді. Це призводить до зростання температури провідників та ізоляції, прискорення процесів теплового старіння й підвищення ймовірності міжвиткових замикань. У зв'язку з цим подальший аналіз

доцільно спрямувати на дослідження теплового режиму обмотки якоря, умов її охолодження та чинників, що визначають термічну стійкість ізоляційної системи тягового електродвигуна.

Обмотки тягових електричних двигунів оснащуються багатошаровою системою електроізоляції, яка працює в умовах одночасної дії значних електричних, теплових та механічних навантажень. Залежно від функціонального призначення розрізняють три основні її різновиди: виткову, корпусну та покривну.

Виткова ізоляція у всіх типах двигунів виконується зі склослюдинітової стрічки, якою ізолюється кожен провідник в один шар. Вона сприймає основні електричні напруження між сусідніми витками, особливо під час пускових режимів, короткочасних перевантажень та імпульсних перенапруг.

Корпусна ізоляція є базовим елементом ізоляційної системи та забезпечує електричну міцність пакета провідників відносно осердя якоря. Її товщина визначається рівнем робочої напруги, класом нагрівостійкості та властивостями застосовуваних ізоляційних матеріалів. У процесі експлуатації саме корпусна ізоляція зазнає найбільших теплових навантажень, зумовлених втратами в міді, що прискорює процеси її теплового старіння. Між секціями додатково встановлюються ізоляційні прокладки для вирівнювання електричного поля та зниження локальних напружень.

Покривна ізоляція формує зовнішній захисний шар у пазу якоря та забезпечує механічний захист секцій обмотки від стирання, вібрацій і динамічних ударів. Вона також частково сприймає теплові потоки від нагрітих провідників до осердя якоря. Фіксація секцій у пазах здійснюється клинами, переважно секціонованими текстолітовими або, рідше, буковими. Передні та задні лобові частини обмоток додатково стягуються бандажами – металевими або неметалевими, що зменшує механічні деформації при електромагнітних ударах і термічних розширеннях.

2.2.5 Колекторний вузол

Колекторний вузол тягового електричного двигуна складається з колектора, втулки та натискного конуса. Він є одним із найбільш відповідальних і навантажених елементів електричної машини, оскільки забезпечує процес електромеханічної

| | | | | | | |
|-------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200177.000.04КР.ПЗ | Арк. |
| змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 29 |

комутації струму в обмотці якоря. В умовах сучасних експлуатаційних режимів цей вузол працює практично на граничних можливостях застосовуваних матеріалів і технологій виготовлення.

Кожна колекторна пластина електрично з'єднана з відповідною секцією обмотки якоря, що забезпечує послідовне перемикання струму в процесі обертання ротора. Кількість пластин у тягових двигунах, як правило, перевищує 300 одиниць [4], що зумовлює високу точність їх виготовлення та складання.

У тягових електричних машинах найпоширенішими є колектори арочного типу. Пластини колектора (рис. 2.6) мають трапецієподібну форму, ізолюються між собою міканітовими прокладками та виготовляються з міді з добавкою срібла, що підвищує їх електропровідність, механічну міцність і зносостійкість.

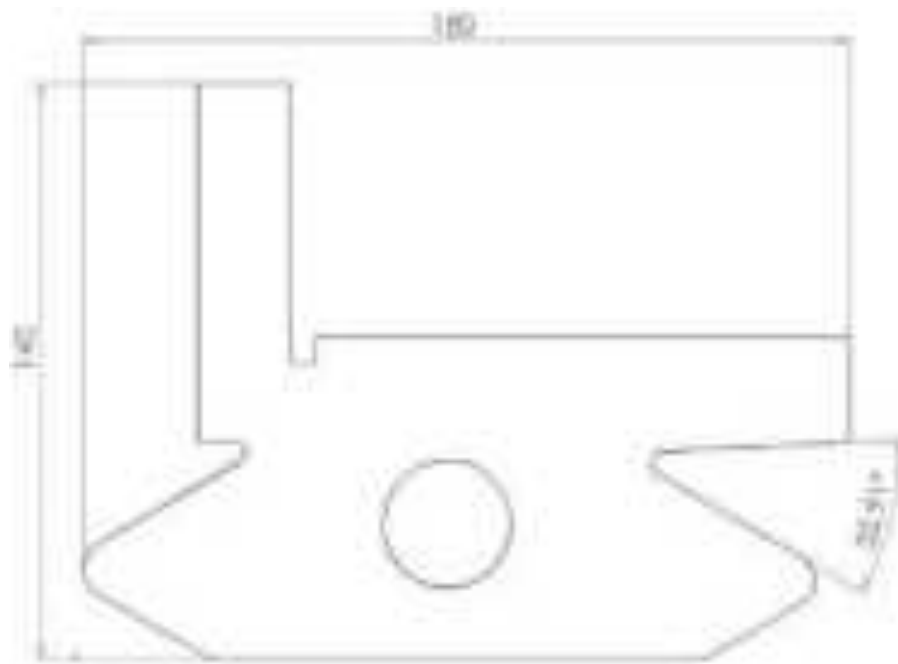


Рисунок 2.6 – Колекторна пластина, змодельована в середовищі SolidWorks

Хімічний склад і основні властивості цього сплаву наведено в табл. 2.5.

Втулка колектора, що виготовляється зі сталі 25Л, призначена для жорсткого закріплення колекторних пластин і встановлюється на втулку якоря [4]. У процесі роботи вона сприймає значні механічні та відцентрові навантаження, зумовлені високою частотою обертання якоря, а також термічні напруження, що виникають

| | | | | | | |
|-------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200177.000.04КР.ПЗ | Арк. |
| змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 30 |

якості комутації та зниження ресурсу колекторного вузла. Важливу роль у формуванні теплового режиму відіграють ефективність вентиляції та частота обертання якоря: зі зростанням швидкості обертання підвищуються відцентрові сили, інтенсивність тертя та тепловиділення, а недостатній повітряний обдув призводить до перегріву колектора і прогресуючого зношування контактних поверхонь.

У разі тривалої роботи тягового двигуна в режимі перевантаження (затяжні підйоми, рух із перевищенням допустимої маси складу, неефективна вентиляція) температура в зоні контакту «щітка – колектор» різко зростає. Це призводить до локального підпалу колекторних пластин, оплавлення міканітової ізоляції між ними та появи міжпластинчастих замикань. У таких умовах спостерігається інтенсивне іскріння, різке зростання зносу щіток і прискорене руйнування робочої поверхні колектора, що вимагає позачергового обточування або навіть заміни колекторного вузла.

2.2.6 Головні та додаткові полюси

Осердя головних полюсів, аналогічно до осердя якоря, виготовляються зі штампованих листів маловуглецевої електротехнічної сталі [4], яка характеризується високою магнітною проникністю та малими питомими втратами на перемагнічування. Такий вибір матеріалу забезпечує формування стійкого магнітного поля за мінімальних енергетичних втрат. Технологія виготовлення та складання осердь у цілому відповідає методиці формування осердя якоря: окремі листи комплектуються в пакет, після чого крайні пластини фіксуються точковим зварюванням.

Листовий пакет осердя полюсів істотно знижує вихрові струми, що виникають під час змін магнітного потоку, а отже, – обмежує додаткові теплові втрати та локальний перегрів. Проте в реальних умовах експлуатації в полюсах мають місце як втрати на гістерезис, так і залишкові вихрові втрати, що зумовлює їх нагрів і потребує ефективного тепловідведення. Температурний стан осердя полюсів безпосередньо впливає на стабільність магнітного поля, якість комутації та загальний ККД тягового електричного двигуна. Пластину головного полюса подано на рис. 2.8.

| | | | | | | |
|-------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200177.000.04КР.ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 32 |
| змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

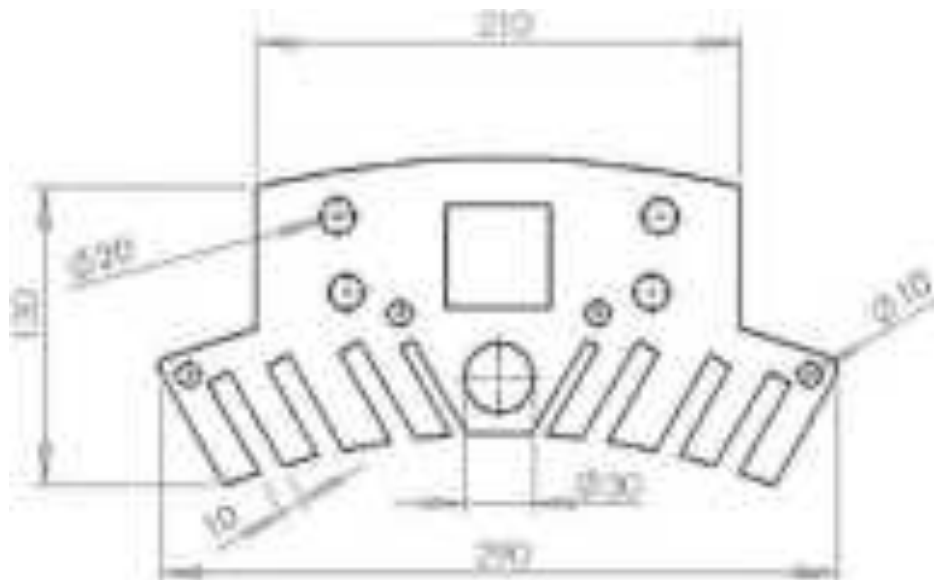


Рисунок 2.8 – Схема пластини головного полюса, створена в середовищі SolidWorks

У тягових електричних машинах, оснащених компенсаційною обмоткою, на головних полюсах передбачаються спеціальні пази для її укладання.

Головні полюси закріплюються на остові двигуна та слугують основою для розміщення обмотки збудження, забезпечуючи формування основного магнітного поля. Загальний вигляд головного полюса подано на рис. 2.9.



Рисунок 2.9 – Тривимірна модель головного полюсу тягового двигуна

У тягових електричних двигунах котушки головних полюсів виготовляють із прямокутної шинної міді, яку переважно намотують на ребро. Така орієнтація

| | | | | | | |
|-------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200177.000.04КР.ПЗ | Арк. |
| змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 33 |

провідника підвищує механічну жорсткість обмотки та сприяє ефективнішому тепловідведенню. Міжвиткову ізоляцію виконують відповідно до класів нагрівостійкості F або H, оскільки котушки збудження працюють в умовах підвищеної теплової напруженості, зумовленої тривалими струмовими навантаженнями, магнітними втратами в полюсах і обмеженою інтенсивністю охолодження в цій зоні.

Конструкція котушок головних полюсів має певні відмінності для двигунів послідовного та незалежного збудження. У двигунах із незалежним збудженням обмотка багатовиткова, а струм у ній у 3–5 разів менший за струм якоря, що знижує електродинамічні навантаження, проте не виключає ризику перегріву за недостатнього тепловідведення.

Компенсаційні котушки виготовляють окремо, після чого готові секції укладають у пази головних полюсів. У робочому режимі вони зазнають додаткового теплового впливу від основної обмотки збудження та магнітної системи двигуна.

Котушки обмоток збудження виготовляють трьома основними способами:

- у моноблочному виконанні;
- з монолітною ізоляцією;
- з немонолітною ізоляцією.

У моноблочному виконанні котушку разом із головним полюсом заливають компаундом і сушать у термічних печах, що забезпечує високу механічну міцність і стабільність теплового режиму. За монолітного виконання котушку після заливання компаундом сушать окремо. У немонолітному виконанні котушку просочують термопластичним компаундом, що спрощує ремонт, але зменшує теплопровідність ізоляційної системи та підвищує чутливість до локального перегріву.

Для підвищення надійності механічного кріплення та покращення теплового контакту котушки з полюсом між ними встановлюють хвилеподібну прокладку, яка забезпечує пружне стискання. Кріплення головних полюсів до остову здійснюється болтами з пружинними шайбами, що запобігає їх послабленню під дією вібрацій і циклічних теплових деформацій.

Додаткові полюси розміщують між головними та використовують для покращення умов комутації. У сучасних тягових двигунах пульсуючого струму їх осердя

| | | | | | | |
|-------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200177.000.04КР.ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 34 |
| змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

виконують шихтованими з листів електротехнічної сталі для зменшення вихрових струмів і відповідних теплових втрат. У двигунах постійного струму осердя додаткових полюсів, як правило, виготовляють суцільними зі сталевого прокату. В окремих конструкціях між остовом і осердям додаткового полюса встановлюють діамантну прокладку для коригування магнітного потоку та зниження локального перегріву.

Котушку додаткових полюсів намотують на вузьке ребро, а ізоляція витків і котушки в цілому за принципом виконання аналогічна ізоляції котушок головних полюсів. Зовнішній вигляд додаткового полюса наведено на рис. 2.10.

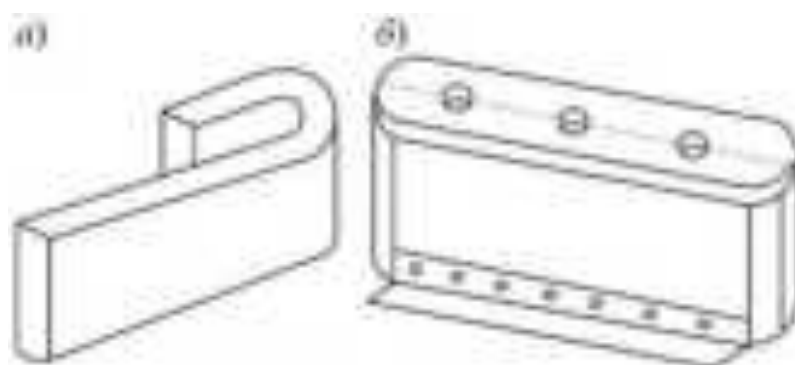


Рисунок 2.10 – Загальний вигляд додаткового полюса тягового двигуна:

а) котушка; б) осердя

Під час експлуатації електровоза на зтяжному підйомі з перевантаженням і недостатньою інтенсивністю вентиляції фіксувався стійкий перегрів котушки збудження головного полюса. Унаслідок тривалого перевищення допустимої температури відбулося термічне старіння ізоляції, її розтріскування та міжвиткове замикання. Дефект проявився у вигляді зниження магнітного потоку, погіршення комутації та підвищеного іскріння на колекторі. Усунення несправності вимагало повної заміни котушки головного полюса.

2.2.7 Компенсаційна обмотка

Компенсаційну обмотку в машинах постійного струму застосовують для нейтралізації дії реакції якоря в поперечному напрямі, що є одним із ключових

| | | | | | | |
|-------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200177.000.04КР.ПЗ | Арк. |
| змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 35 |

чинників порушення комутації. Як правило, таку обмотку встановлюють у тягових електричних машинах великої потужності, де струмові та електромагнітні навантаження досягають значних значень. Саме компенсаційна обмотка забезпечує вирівнювання магнітного поля в зоні колектора, що безпосередньо сприяє зменшенню іскріння під щітками, підвищенню стабільності комутації та зниженню контактного зносу.

Компенсаційна обмотка складається з шести окремих котушок, кожна з яких містить по сім витків м'якого мідного дроту марки ЛММ [4]. Корпусну та міжвиткову ізоляцію виконують зі слюдиної стрічки, а покривну — зі скляної стрічки. Така ізоляційна система розрахована на роботу в умовах підвищеної теплової напруженості, оскільки котушки компенсаційної обмотки розміщені в зоні інтенсивних магнітних потоків і додатково нагріваються як від власних струмів, так і від теплового впливу головних полюсів. Для захисту ізоляції котушок від механічних пошкоджень застосовується додаткова пазова ізоляція.

Під час монтажу остова готові котушки укладають у відкриті пази осердь головних полюсів і закріплюють клинами. З'єднання котушок виконують відповідно до схеми з'єднань остова за допомогою гнучких виводів із мідних плетених провідників типу ПЩ або жорстких шинних виводів. Використання гнучких виводів істотно знижує дію вібрацій та практично усуває ризик їх обриву в експлуатації, що підвищує надійність компенсаційної обмотки та двигуна в цілому. Зовнішній вигляд компенсаційної обмотки наведено на рис. 2.11.

Стабільна робота компенсаційної обмотки без перегріву є обов'язковою умовою ефективного зниження іскріння на колекторі. Порушення її теплового режиму призводить до зростання асиметрії магнітного поля, погіршення комутації та прискореного зношування щітково-колекторного вузла.

Під час тривалої роботи електровоза в режимі високих тягових навантажень із частими пусками та ослабленою вентиляцією фіксувалося перевищення допустимої температури компенсаційної обмотки. Унаслідок перегріву відбулося термічне старіння слюдиної міжвиткової ізоляції, з'явилися локальні міжвиткові замикання, що призвело до порушення компенсації реакції якоря.

| | | | | | | |
|-------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200177.000.04КР.ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 36 |
| змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

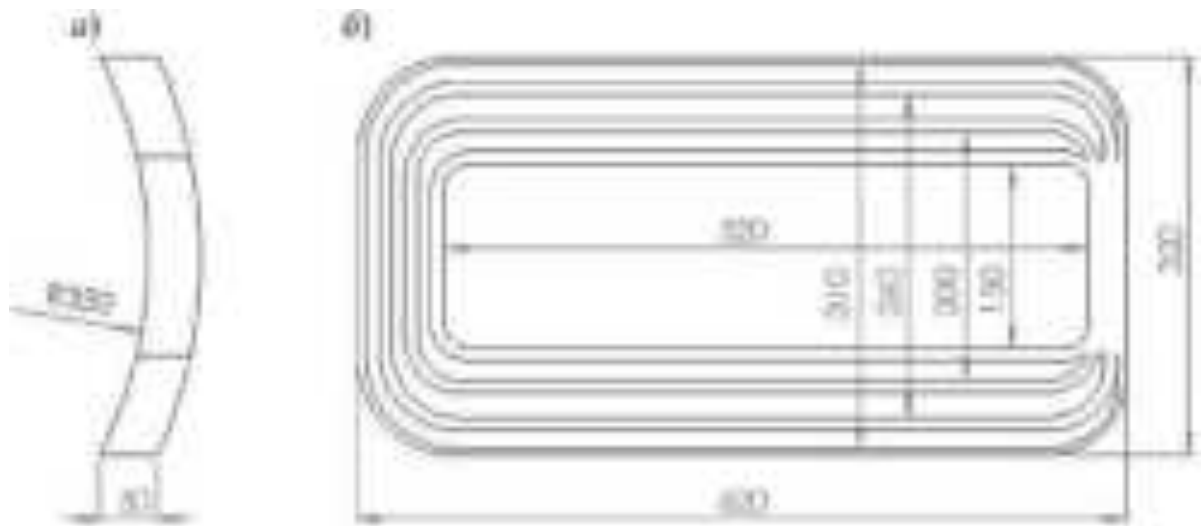


Рисунок 2.11 – Загальний вигляд компенсаційної обмотки:

а) вигляд справа; б) вигляд спереду

Дефект проявився у вигляді різкого зростання іскріння під щітками, підпалів колекторних пластин і прискореного зносу щіток. Відновлення працездатності вимагало демонтажу остова та повної заміни пошкоджених котушок компенсаційної обмотки.

2.2.8 Траверса, щіткотримач і щітки

Траверса виконує функцію базового несівного елемента для встановлення щіткотримачів [5]. Вона має розрізну сталеву конструкцію із зубчастим вінцем по зовнішньому колу, що взаємодіє з поворотним механізмом для отримання необхідного кута орієнтації. На траверсі 1 змонтовано шість кронштейнів 2 з ізоляційними пальцями 3, шість щіткотримачів 4 і ізольовану з'єднувальну шину 5. Фіксація у двигуні здійснюється за допомогою фіксуючого, двох стопорних та розтискного пристроїв. Загальний вигляд траверси показано на рис. 2.12.

Розтискний механізм, що розташований навпроти нижнього колекторного люка, забезпечує регулювання розрізної щілини в межах 4–7,5 мм у робочому положенні та не більше 2 мм під час повороту траверси для огляду або зміни щіток. У робочому режимі траверса повинна бути розтиснута до максимального діаметра, що гарантує стабільне положення щіткотримачів і рівномірний розподіл струмів у колекторно-щітковому вузлі.

| | | | | | | |
|-------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200177.000.04КР.ПЗ | Арк. |
| змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 37 |

накладки, які кріпляться на двох ізоляційних пальцях. Сам щіткотримач фіксується шпилькою й гайкою з пружинною шайбою. Для надійного з'єднання на контактних поверхнях кронштейна і щіткотримача виконана гребінка, що дає можливість точно регулювати радіальне положення щіток відносно робочої поверхні колектора.

У тягових електродвигунах теплове навантаження щітково-колекторного вузла є одним із найбільш критичних факторів, що визначає стабільність роботи й довговічність щіток. При протіканні високих струмів у зоні контакту «щітка – колектор» відбувається інтенсивне тепловиділення, яке, за несприятливих режимів, призводить до:

- локального перегрівання поверхні колектора;
- підвищення питомого електричного опору у зоні ковзання;
- термічної деградації графітових щіток;
- зростання ризику іскріння та «обгорання» контактної поверхні;
- прискореного зношування щіток та півників.

Конструкція щіткотримача враховує ці теплові ефекти. Корпус 1 і натискні пальці 3 (рис. 2.13) відливаються із латуні – матеріалу з високою теплопровідністю, що сприяє відведенню тепла від щіток. Натиск пальців забезпечують три циліндричні пружини 4, величину зусилля яких регулюють гвинтами 5. Коректно встановлене зусилля натискання є ключовим чинником теплової стабільності: при недостатньому натисканні збільшується опір контактного переходу та тепловиділення, при надмірному – зростає механічне тертя і швидкість нагрівання.

Щітки виготовляються з графіту марки ЕГ61А, що має високі теплофізичні властивості, здатність працювати при значних контактних температурах та забезпечувати низьку інтенсивність іскріння. Параметри щітки наведені у табл. 2.6.

Таблиця 2.6 – Параметри щітки

| | | | |
|--|--|--|--|
| | | | |
| | | | |
| | | | |

Оптимальна робота щітково-колекторної системи досягається за умов:

| | | | | | | |
|-------|------|----------|--------|------|-------------------------|------------|
| | | | | | 0032.200177.000.04КР.ПЗ | Арк. 39 |
| змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

- рівномірного притискання щіток до колектора;
- точно витриманого радіального положення щіткотримача;
- відведення тепла через корпус щіткотримача та траверсу;
- недопущення тривалих режимів струмових перевантажень;
- регулярного контролю за станом поверхні колектора.

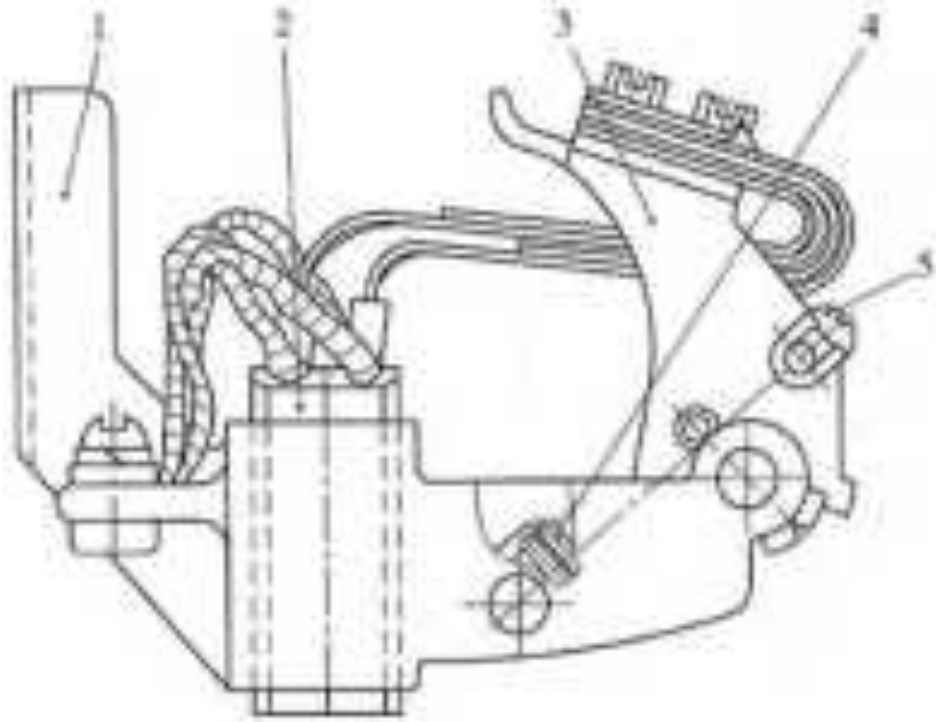


Рисунок 2.13 – Конструкція щіткотримача:

1 – корпус; 2 – щітка; 3 – натискний палець; 4 – пружина; 5 – гвинт

Саме тому конструктивні елементи траверси, щіткотримача та щіток працюють у єдиній системі забезпечення термічної стабільності – що має першочергове значення для тягових двигунів, які експлуатуються в умовах частих пусків, форсованих струмів та теплових циклів.

Енергетична схема тепловиділення та теплопередачі в щітково-колекторному вузлі наведена на рис. 2.14.

2.2.9 Будова остова

Остов тягового двигуна постійного струму виконує подвійне призначення:

| | | | | | | |
|-------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200177.000.04КР.ПЗ | Арк. |
| змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 40 |

служує магнітопроводом і водночас є несучою конструкцією для підшипникових щитів та полюсної системи (рис. 2.15). Зазвичай остов відливають зі сталі марки 25Л [1], а його товщина визначається з урахуванням необхідної магнітної індукції. У ділянках, де магнітний потік не проходить, стінки остова виконують тоншими — приблизно на 15–20 мм.



Рисунок 2.14 – Енергетична схема тепловиділення та теплопередачі в щітково-колекторному вузлі

Довжина остова становить близько півтора розміри довжини головного полюса. На зовнішній поверхні конструктивно передбачено припливи для встанов-

лення моторно-осьових підшипників, вентиляційних люків та інших вузлів. З боку колектора розміщено два технологічні люки – вентиляційний і люк для проведення обслуговування колекторно-щіткового вузла. До внутрішньої циліндричної поверхні остова кріпляться головні та додаткові полюси: перші – трьома болтами М30, другі – трьома болтами М20 з немагнітної сталі, маркованими конусним заглибленням на торці головки. Під головки болтів встановлюють пружинні шайби для запобігання самовідгвинчуванню, а у верхній частині головки заливають бітумним компаундом, що перешкоджає проникненню вологи всередину двигуна.

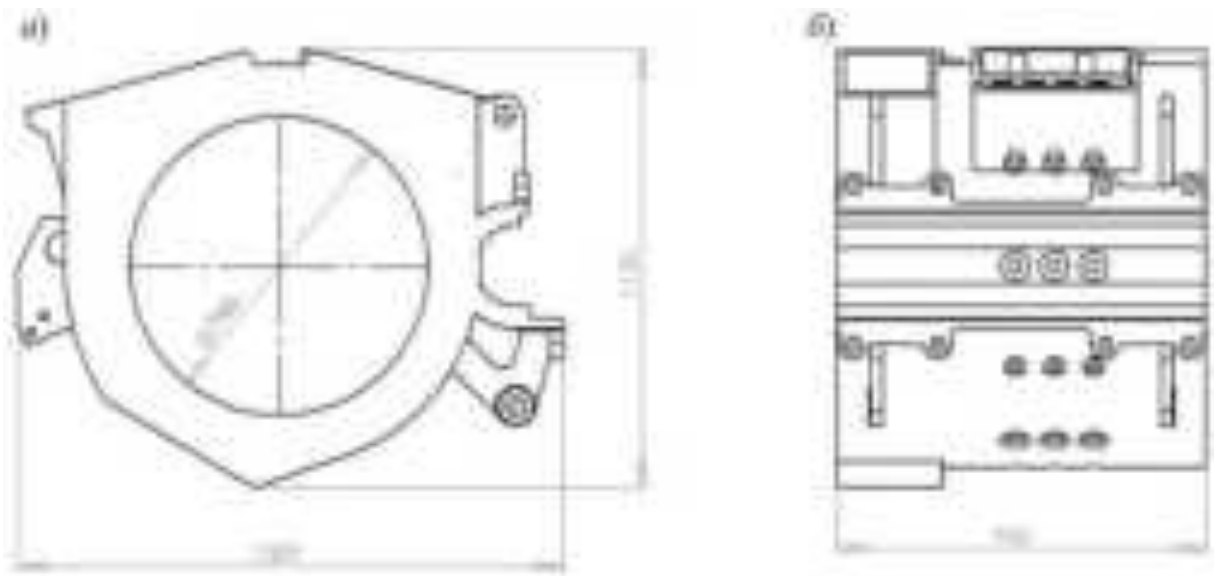


Рисунок 2.15 – Загальний вигляд остова ТЕД у середовищі SolidWorks:

а) вигляд спереду; б) вигляд праворуч

Остов є одним з ключових елементів у структурі теплового балансу тягового двигуна, оскільки:

– виконує функцію теплового акумулятора та провідника тепла. Завдяки значній масі зі сталевим литтям остов має високу теплоємність, що дозволяє згладжувати температурні коливання, які виникають у режимах різких зміни струму – під час пуску, рекуперації або роботи з перевантаженнями. Тепло, що генерується у: полюсних котушках; якорі; колекторно-щітковому вузлі; підшипникових опорах; частково передається до остова через теплопровідність;

| | | | | | | |
|-------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200177.000.04КР.ПЗ | Арк. |
| змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 42 |

– сприяє рівномірному розподілу температури у двигуні. Сталева структура остова забезпечує інтенсивний розподіл тепла по корпусу, зменшуючи локальні перегріву, зокрема: у зонах кріплення полюсних башмаків; у ділянці підшипникових щитів, де теплове навантаження зростає через тертя; у зоні колекторного люка, де тепловиділення пов'язане з роботою щіток. Це стабілізує магнітні характеристики й зменшує ризик теплового розмагнічування;

– взаємодіє з системою вентиляції. Остов має значну площу зовнішньої поверхні та контактує з вентиляційними каналами, тому він бере участь у: конвекційному теплообміні з повітряним потоком; тепловому випромінюванні з нагрітих поверхонь у корпус машини; розсіюванні тепла назовні через корпус локомотива. Кількість тепла, що відводиться, залежить від: швидкості повітряного потоку; стану вентиляційних каналів; запиленості; температури довкілля;

– здійснює тепловий захист полюсної системи. Через внутрішню поверхню остова тепло від обмоток полюсів передається далі: → у масив остова → до зовнішніх поверхонь → у вентиляційний потік. Тепловідведення запобігає: перегріву ізоляції полюсних котушок; зниженню електромагнітної провідності сталі; виникненню додаткових втрат у магнітопроводі;

– тепловий зв'язок з підшипниковими щитами. У зоні підшипників остов відводить тепло, що виділяється внаслідок: механічного тертя роликів; підвищених осьових або радіальних навантажень; нагрівання від частоти обертання. Це підвищує надійність підшипникового вузла і продовжує строк служби мастила.

| | | | | | | |
|-------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200177.000.04КР.ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 43 |
| змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

2.3 Повітряні потоки

2.3.1 Загальні відомості про системи вентиляції

Теплові втрати всіх вузлів тягового двигуна зрештою переходять у тепло, яке необхідно своєчасно відводити, щоб запобігти перегріву та супутнім негативним явищам, описаним раніше. У сучасних тягових двигунах застосовується система повітряного охолодження.

Для тягових електричних машин, що працюють на електропоїздах та іншому моторвагонному рухомому складі, використовують різні схеми вентиляції, які класифікують за кількома ознаками. Основна класифікація ґрунтується на розташуванні вентиляторів і способі їх приводу. Виділяють такі системи:

- незалежна вентиляція;
- самовентиляція;
- змішана система вентиляції.

При незалежній вентиляції вентилятор розташовується окремо від тягової машини та приводиться в обертання спеціальним електродвигуном. Здебільшого використовується машина змінного струму потужністю 30–100 кВт [3].

При самовентиляції вентилятор закріплюється безпосередньо на валу якоря та є складовою частиною конструкції машини. Змішана вентиляція поєднує обидва способи, однак використовується вкрай рідко.

Перед переходом до детального розгляду кожної системи варто зазначити принципи вибору типу вентиляції.

Традиційно вважається, що незалежну вентиляцію доцільно застосовувати на електровозах, тоді як самовентиляція ефективніша для електропоїздів. Це пояснюється особливостями робочих режимів.

На затяжних крутих підйомах електровоз працює з великими струмами за низької частоти обертання якоря, що може становити лише 50–55 % від номінальної. За таких умов вентилятор, встановлений на валу, створював би недостатній повітряний потік і, відповідно, не забезпечував би необхідного охолодження.

| | | | | | | |
|-------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200177.000.04КР.ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 44 |
| змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

У моторвагонного рухомого складу режими роботи інші: характерні високі швидкості, часті інтенсивні розгони та подальший рух на вибігу. У таких умовах вентилятор, закріплений на валу якоря, продовжує працювати ефективно, забезпечуючи стабільне охолодження. Варто зазначити, що тягові машини потужністю до 250 кВт зазвичай виконують із самовентиляцією [7].

Порівняння систем вентиляції наведено у табл. 2.7.

Таблиця 2.7 – Характеристика теплових режимів систем вентиляції

| [REDACTED] | [REDACTED] | | |
|----------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| | [REDACTED] | [REDACTED] | [REDACTED] |
| [REDACTED] [REDACTED] | [REDACTED] [REDACTED] [REDACTED] | [REDACTED] [REDACTED] | [REDACTED] [REDACTED] [REDACTED] |
| [REDACTED] [REDACTED] [REDACTED] | [REDACTED] | [REDACTED] [REDACTED] [REDACTED] [REDACTED] | [REDACTED] [REDACTED] |
| [REDACTED] [REDACTED] [REDACTED] | [REDACTED] | [REDACTED] [REDACTED] | [REDACTED] |
| [REDACTED] [REDACTED] [REDACTED] | [REDACTED] | [REDACTED] [REDACTED] [REDACTED] | [REDACTED] [REDACTED] |
| [REDACTED] [REDACTED] | [REDACTED] | [REDACTED] | [REDACTED] |
| [REDACTED] [REDACTED] | [REDACTED] | [REDACTED] [REDACTED] | [REDACTED] [REDACTED] |
| [REDACTED] [REDACTED] [REDACTED] | [REDACTED] | [REDACTED] [REDACTED] | [REDACTED] |

| | | | |
|------------|------------|------------|------------|
| ██████████ | ██████████ | ██████████ | ██████████ |
| ██████████ | ██████████ | ██████████ | ██████████ |
| ██████████ | ██████████ | ██████████ | ██████████ |
| ██████████ | ██████████ | ██████████ | ██████████ |
| ██████████ | ██████████ | ██████████ | ██████████ |
| ██████████ | ██████████ | ██████████ | ██████████ |

2.3.2 Незалежна вентиляція

За системи незалежної вентиляції охолоджувальне повітря забирається з атмосфери та через повітропроводи подається у тяговий двигун. Така схема завжди працює за принципом нагнітальної вентиляції, оскільки вентилятор створює підвищений тиск на вході в машину.

Незалежна вентиляція має важливі теплові переваги. Її головна особливість полягає в тому, що ефективність охолодження не залежить від частоти обертання якоря. Вентилятор працює від окремого електроприводу, забезпечуючи стабільний і достатній повітряний потік навіть під час роботи двигуна на низьких швидкостях. Це особливо важливо для електровозів, які на затяжних підйомах працюють з великими струмами при низькій кутовій швидкості якоря. За таких умов незалежна вентиляція значно знижує ризик перегріву обмотки якоря, полюсних котушок та колекторно-щіткового вузла.

До теплових переваг належить також можливість подачі повітря відносно стабільної температури, що сприяє вирівнюванню теплового поля в машині та підвищенню довговічності ізоляції. Однак незалежна вентиляція має й певні недоліки. Основний із них – висока чутливість до відмови вентилятора або зниження його продуктивності через забруднення повітропроводів. У цьому разі теплові навантаження на вузли двигуна різко зростають, що може спричинити локальні перегріву, прискорене старіння ізоляції та відмову окремих елементів.

Ще одним недоліком є те, що температура забірного повітря може бути значно вищою за температуру внутрішніх елементів двигуна, особливо у теплий період року або при заборі повітря з перегрітих відсіків локомотива. Це зменшує

| | | | | | | |
|-------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200177.000.04КР.ПЗ | Арк. |
| змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 46 |

ефективність охолодження. Крім того, у групових системах можливе нерівномірне розподілення повітря між кількома двигунами, що створює неоднакові теплові умови експлуатації.

Таким чином, незалежна вентиляція забезпечує високий рівень охолодження тягової машини у широкому діапазоні режимів, але вимагає постійного контролю стану вентилятора, повітропроводів та чистоти забірних каналів. Її ефективність безпосередньо визначає теплову надійність двигуна, особливо в умовах тривалої роботи з великими струмами.

Залежно від кількості тягових двигунів, що обслуговуються одним вентилятором, розрізняють два різновиди системи:

- групова незалежна вентиляція;
- індивідуальна незалежна вентиляція.

Для забезпечення рівномірного розподілу повітря по каналах застосовують регульовальні заслінки, які дозволяють вирівняти аеродинамічний опір повітропроводів. У разі індивідуальної вентиляції кожен двигун має власний вентилятор, тоді як при груповій схемі один вентилятор подає повітря на декілька машин.

На електропоїздах найпоширенішою є система розімкнутого циклу вентиляції [3], при якій повітря після проходження через тяговий двигун викидається в атмосферу. Існує також система напівзамкнутого циклу, де частина повітря рециркулює повторно. Це дозволяє зменшити надходження пилу, вологи та солей у внутрішні порожнини машини, що позитивно впливає на стан ізоляції. Принцип роботи напівзамкнутої системи наведений на рис. 2.16.

| | | | | | | |
|-------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200177.000.04КР.ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 47 |
| змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

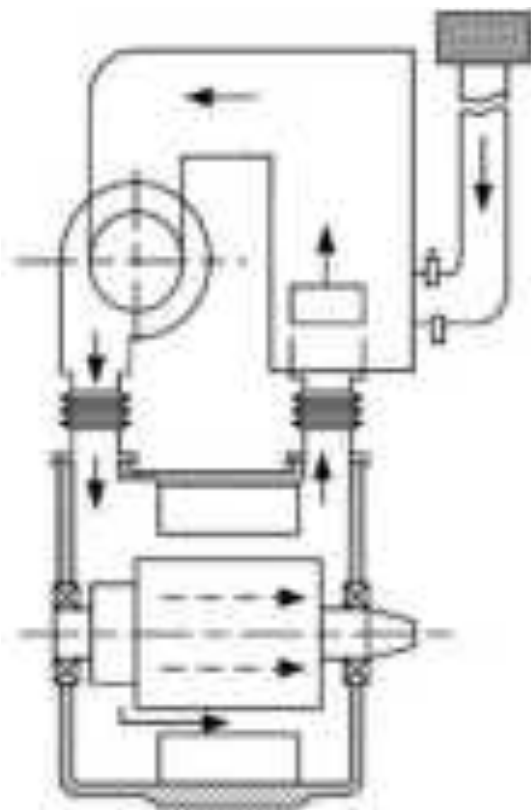


Рисунок 2.16 – Схема системи напівзамкнутої незалежної вентиляції

У розімкнутому циклі свіже повітря не змішується з тим, що вже пройшло через двигун, проте інші принципи організації повітряного потоку залишаються аналогічними.

Як видно з рисунка, подавання повітря здійснюється з боку колекторної камери. Таке конструктивне рішення обрано з кількох причин.

По-перше, це спрощує під'єднання повітропроводу.

По-друге, забезпечується подача значного об'єму повітря у внутрішню порожнину якоря, що покращує охолодження його елементів.

По-третє, знижується температура півників колектора та робочої поверхні колекторного циліндра.

Крім того, інтенсивне обдування з боку колектора запобігає накопиченню іонізованого повітря в камері, що сприяє покращенню комутації та зменшенню іскріння в тяговому двигуні.

Головною перевагою незалежної вентиляції є можливість подавати значні обсяги охолоджувального повітря навіть за низької частоти обертання валу двигуна,

| | | | | | | |
|-------|------|----------|--------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | <i>0032.200177.000.04KP.ПЗ</i> | Арк. |
| | | | | | | 48 |
| змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

що забезпечує ефективне охолодження в найбільш теплово напружених режимах.

2.3.3 Система вентиляції електровоза

У електровозі у кожній секції застосовується примусова система вентиляції, яка забезпечує охолодження тягових двигунів, випрямляльно-інверторних перетворювачів, теплообмінників тягового трансформатора, згладжувальних реакторів, випрямляльної установки збудження, блоку баластних резисторів та діодних агрегатів. Крім того, система створює необхідний надлишковий тиск у кузові для запобігання проникненню пилу та снігу під час руху, а також виконує функцію охолодження кузова в теплий період року.

Вентиляція однієї секції електровоза складається з трьох окремих підсистем, взаємодія яких представлена у вигляді схеми на рис. 2.17.

Позначення на рис. 2.17: 1 – дефлектор; 2 – повітропровід до двигуна; 3 – повітродозподільний короб; 4 – вентилятор; 5 – перехідний патрубков; 6 – вікно викиду повітря в кузов; 7 – випрямляльно-інверторний перетворювач; 8 – згладжувальний

| | | | | | | |
|-------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200177.000.04КР.ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 49 |
| змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

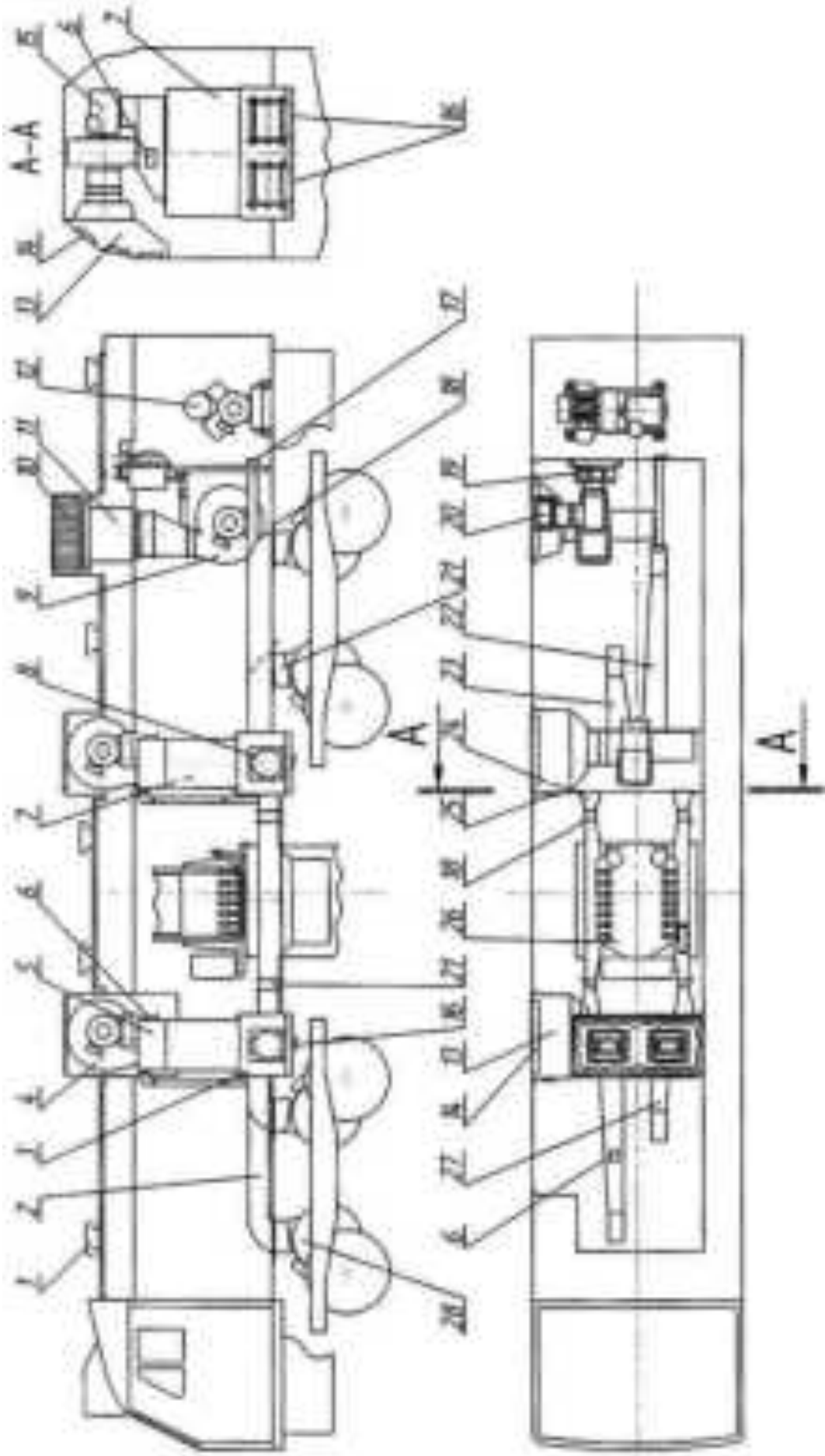


Рисунок 2.17 – Система вентиляції секції електровоза

| | | | | |
|-------|------|----------|--------|------|
| змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |
| | | | | |

0032.200177.000.04КР.ПЗ

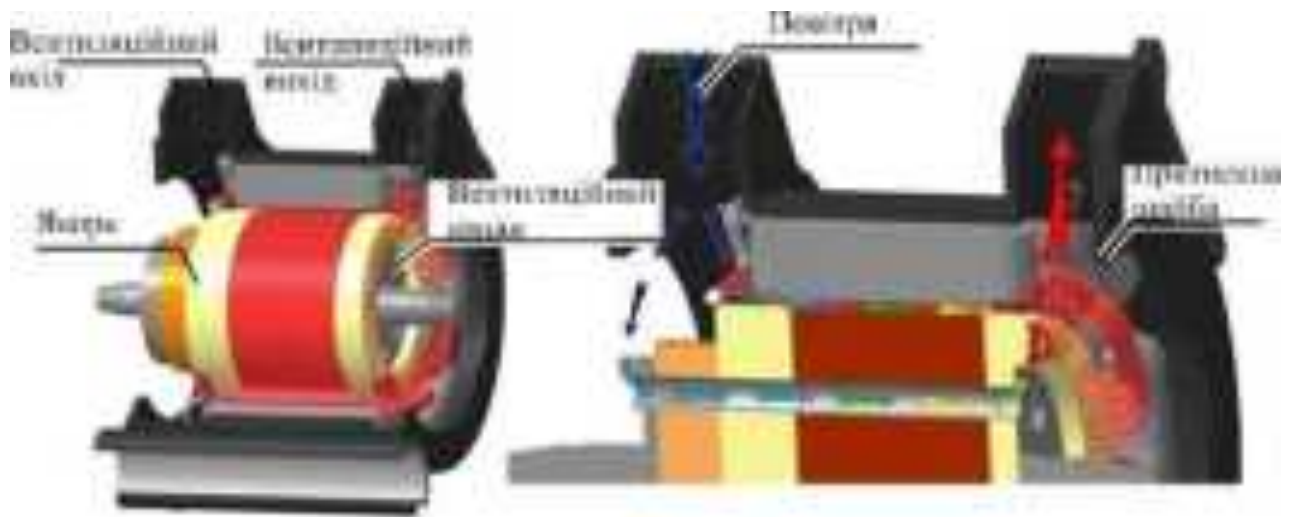


Рисунок 2.18 – Схема руху охолоджувального повітря в тяговому електродвигуні

Аеродинамічний опір – це сила, що перешкоджає руху газу в системі повітропроводів. Чим більші значення має опір, тим більші значення мають фактори, перераховані раніше.

Безсумнівно, що великі значення аеродинамічних опорів сприяють створенню завихрень потоків повітря [10], які негативно впливають на ефективність охолодження двигуна. Ескіз повітропроводу ТЕД зображений на рис. 2.19, відповідно до нього, в табл. 2.9 наведені значення аеродинамічних опорів, необхідних для виконання розрахунків [1–4].

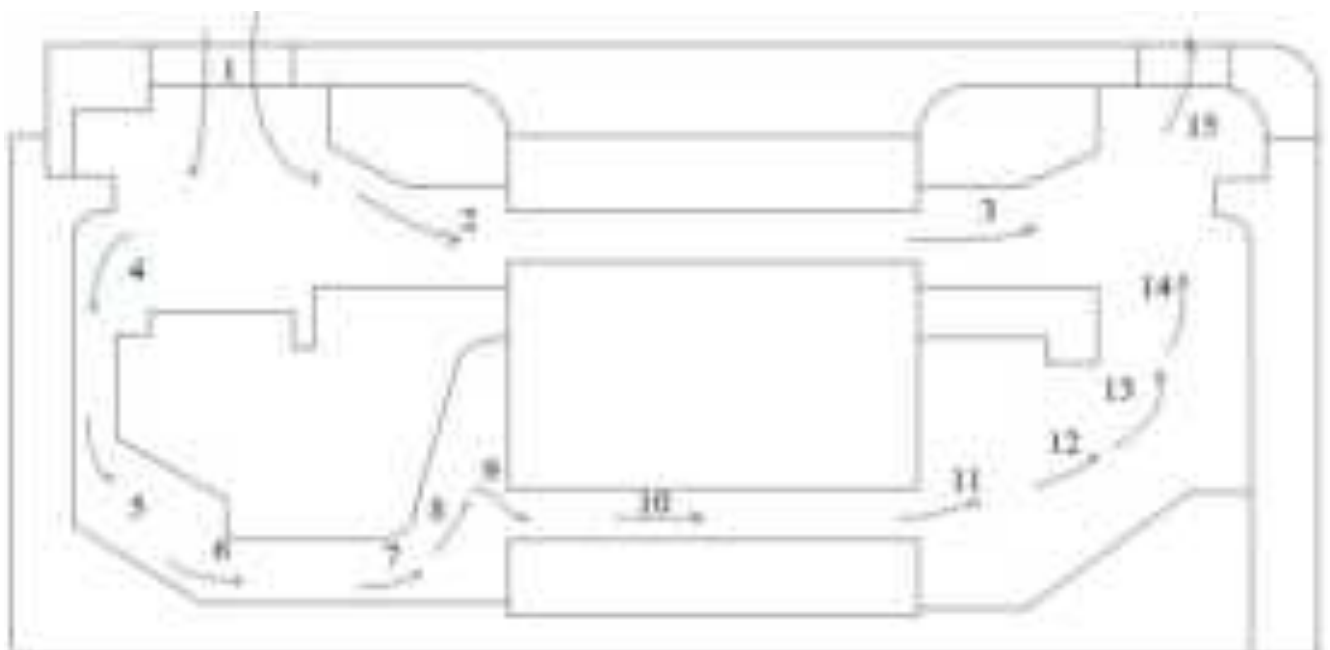


Рисунок 2.19 – Схема повітропроводу ТЕД

| | | | | | | |
|-------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200177.000.04КР.ПЗ | Арк. |
| змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 52 |

споживає струм, що перевищує номінальний, а частота його обертання зменшується порівняно з номінальною, незважаючи на номінальну напругу живлення.

Додатковим чинником перегріву обмотки якоря є погіршення умов вентиляції. За недостатнього повітрообміну також має місце рівномірний нагрів усієї обмотки, що супроводжується зниженням частоти обертання якоря навіть за номінального навантаження тягового двигуна. Типова крива нагрівання обмотки якоря зображена на рис. 2.20.

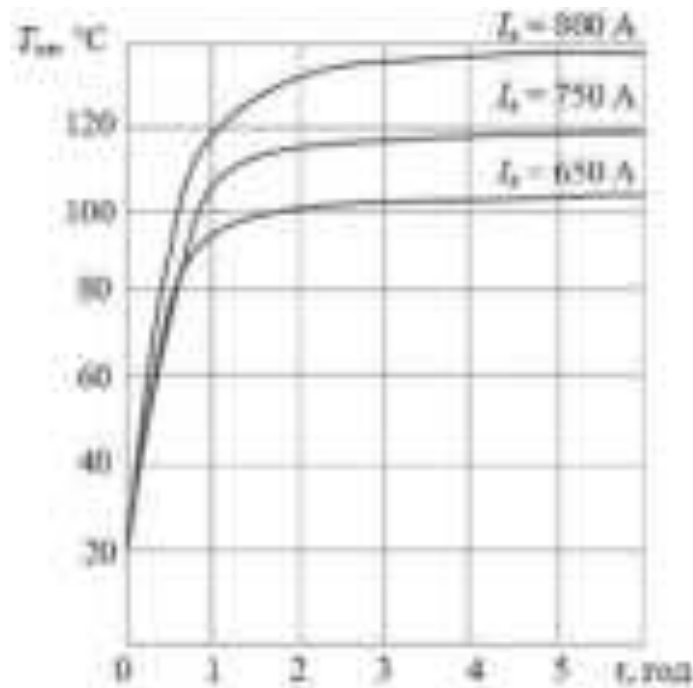


Рисунок 2.20 – Зміна температури обмотки якоря тягового двигуна

Колектор тягового електричного двигуна належить до найбільш навантажених і відповідальних елементів машини. Забезпечення стабільного та якісного струмозбирання потребує високої точності виготовлення колекторних пластин, збереження сталих експлуатаційних властивостей матеріалів, а також підвищеної надійності й зносостійкості колекторного вузла. Важливою умовою його працездатності є регулярний технічний догляд і своєчасне обслуговування.

У процесі експлуатації колекторний вузол зазнає значного теплового навантаження, яке виникає внаслідок роботи тягового двигуна з перевантаженнями або за умов недостатньої вентиляції. Тривалий вплив підвищених температур спричиняє

порушення геометричної стабільності мідних пластин, що може призводити до їх взаємного натягу, закорочування сусідніх секцій, а в подальшому – до вигорання, виплавлення або спаювання пластин колектора.

Під час експлуатації електричних машин опір ізоляції обмоток змінюється у широкому діапазоні. Така нестабільність зумовлена гігроскопічними властивостями ізоляційних матеріалів, а також значною температурною залежністю електричного опору. У холодному стані опір ізоляції обмоток істотно вищий, ніж у нагрітому [4]. Перегрів ізоляції обмоток головних і додаткових полюсів призводить до її часткового руйнування, що викликає різке зниження опору ізоляції. Як наслідок, зростає імовірність пробоя обмоток на корпус або між фазами, що фактично означає вихід тягового двигуна з ладу.

Експлуатація тягового двигуна в режимах перевантаження негативно впливає на його тягові характеристики, прискорює знос елементів та зменшує ресурс, що, у свою чергу, призводить до позапланових відмов і простою локомотива.

Під час аналізу теплових процесів у тягових електричних машинах оцінюють не абсолютну температуру їх елементів, а перевищення температури над температурою навколишнього повітря, що дозволяє коректно порівнювати теплові режими за різних умов експлуатації.

Під час розрахунку маси поїзда максимальну силу тяги, як правило, визначають з урахуванням обмежень за умовами комутації тягових електродвигунів або за коефіцієнтом зчеплення коліс з рейками. Водночас для електровозів необхідно додатково враховувати обмеження, пов'язані з нагріванням тягових електричних двигунів.

У табл. 2.11, відповідно до [4], наведено гранично допустимі перевищення температури обмоток тягових електричних машин і їх колекторів відносно температури навколишнього повітря, яка приймається не більшою за 40 °С. На електровозі застосовується ізоляція класу нагрівостійкості F.

| | | | | | | |
|-------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200177.000.04КР.ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 56 |
| змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

Таблиця 2.11 – Гранично допустимі перевищення температури обмоток тягових електричних машин відносно температури навколишнього повітря

| Клас нагрі- востійкості ізоляції | Режим роботи | Частини електрич- ної машини | Метод вимі- рювання те- мператури | Граничне допустиме перевищення темпе- ратури, °С, не більше | | |
|----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|------------|---|
| ■ | ■■■■■■■■■■ ■■■■■■■■■■ | ■■■■■■■■■■ | ■■■■ | ■ | | |
| | | ■■■■■■■■■■ | ■■■■■■■■■■ | ■ | | |
| | ■■■■■■■■■■ ■■■■■■■■■■ | ■■■■■■■■■■ | ■■■■ | ■ | | |
| | | ■■■■■■■■■■ | ■■■■■■■■■■ | ■ | | |
| | ■ | ■■■■■■■■■■ ■■■■■■■■■■ ■■■■■■■■■■ ■■■■■■■■■■ ■■■■■■■■■■ ■■■■■■■■■■ ■■■■■■■■■■ ■■■■■■■■■■ ■■■■■■■■■■ ■■■■■■■■■■ ■■■■■■■■■■ ■■■■■■■■■■ | ■■■■■■■■■■ | ■■■■ | ■ | |
| | | | ■■■■■■■■■■ | | ■ | |
| ■■■■■■■■■■ | | | ■■■■■■■■■■ | ■ | | |
| ■■■■■■■■■■ | | | ■■■■■■■■■■ | ■ | | |
| ■ | ■■■■■■■■■■ ■■■■■■■■■■ ■■■■■■■■■■ ■■■■■■■■■■ ■■■■■■■■■■ ■■■■■■■■■■ ■■■■■■■■■■ ■■■■■■■■■■ ■■■■■■■■■■ ■■■■■■■■■■ ■■■■■■■■■■ ■■■■■■■■■■ | | ■■■■■■■■■■ | ■■■■ | ■ | |
| | | | ■■■■■■■■■■ | | ■ | |
| | | | ■■■■■■■■■■ | ■■■■■■■■■■ | ■ | |
| | | | ■■■■■■■■■■ | ■■■■■■■■■■ | ■ | |
| ■ | | | ■■■■■■■■■■ ■■■■■■■■■■ ■■■■■■■■■■ ■■■■■■■■■■ ■■■■■■■■■■ ■■■■■■■■■■ ■■■■■■■■■■ ■■■■■■■■■■ ■■■■■■■■■■ ■■■■■■■■■■ ■■■■■■■■■■ ■■■■■■■■■■ | ■■■■■■■■■■ | ■■■■ | ■ |
| | | | | ■■■■■■■■■■ | | ■ |
| | | | | ■■■■■■■■■■ | ■■■■■■■■■■ | ■ |
| | | | | ■■■■■■■■■■ | ■■■■■■■■■■ | ■ |
| ■ | | ■■■■■■■■■■ ■■■■■■■■■■ ■■■■■■■■■■ ■■■■■■■■■■ ■■■■■■■■■■ ■■■■■■■■■■ ■■■■■■■■■■ ■■■■■■■■■■ ■■■■■■■■■■ ■■■■■■■■■■ ■■■■■■■■■■ ■■■■■■■■■■ | | ■■■■■■■■■■ | ■■■■ | ■ |
| | | | | обмотки збу- дження | | ■ |
| | | | | колектор | термометра | ■ |

Розрахункова температура зовнішнього повітря визначається за даними метеорологічних станцій як середня багаторічна (не менше ніж за 5 років).

Кліматичні умови місць експлуатації електровозів змінного струму в західній та центральній частинах України характеризуються відносно м'якими зимовими температурами, що зменшує ймовірність глибокого охолодження елементів

перехідні сезони. Це обумовлює необхідність регулярного контролю ізоляційних параметрів ТЕД та урахування вологісного чинника під час технічного діагностування.

У літній період, попри загалом помірні кліматичні умови, теплові обмеження за нагріванням тягових електричних двигунів залишаються актуальними. Підвищення середньої температури навколишнього повітря призводить до зменшення температурного напору між нагрітими елементами двигуна та охолоджувальним середовищем, що знижує ефективність вентиляції та ускладнює відведення тепла.

З огляду на зазначене, під час розрахунку та оцінювання теплових режимів тягових електричних двигунів електровозів змінного струму, що експлуатуються в західній та центральній частинах України, необхідно комплексно враховувати як температурні, так і вологісні фактори. Такий підхід забезпечує обґрунтоване визначення допустимих навантажень ТЕД, підвищує надійність ізоляції та сприяє збільшенню ресурсу тягового рухомого складу.

Основну увагу доцільно зосередити на максимальних значеннях температури навколишнього повітря. Абсолютний максимум, що становить 36,3 °С, спостерігається у липні. За таких температурних умов ефективність охолодження тягових електричних двигунів істотно знижується, що призводить до зростання імовірності перегріву їх конструктивних елементів та, як наслідок, підвищує ризик відмови двигуна в процесі експлуатації.

| | | | | | | |
|-------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200177.000.04КР.ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 59 |
| змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

3 ПОБУДОВА ТРИВИМІРНОЇ МОДЕЛІ ТЕД

3.1 Загальні відомості

Для створення тривимірної моделі тягового електричного двигуна було використано систему автоматизованого проектування SolidWorks, розроблену компанією SolidWorks Corporation, яка на сьогодні функціонує як підрозділ компанії Dassault Systèmes. Зазначена система широко застосовується для проектування та аналізу машинобудівних виробів різного рівня складності.

Система автоматизованого проектування являє собою організаційно-технічний комплекс, що реалізує інформаційні технології виконання проектних функцій [12]. Вона поєднує програмні, технічні та інформаційні засоби з діяльністю інженерного персоналу, забезпечуючи автоматизацію процесів створення, аналізу та модифікації конструкторської документації. Для позначення таких систем у технічній літературі широко використовується аббревіатура САПР.

3.2 Аналіз САПР

САПР SolidWorks має розвинений набір розрахункових модулів, що належать до класу CAE-систем [12]. CAE-системи являють собою програмні комплекси, які з використанням чисельних методів (методу кінцевих елементів, кінцевих різниць, кінцевих об'ємів) дозволяють оцінювати поведінку комп'ютерної моделі виробу в умовах, наближених до реальної експлуатації. Застосування таких інструментів дає змогу перевірити працездатність конструкції без значних витрат часу та матеріальних ресурсів.

Для виконання даного дипломного проекту було обрано модуль SolidWorks Flow Simulation, який забезпечує можливість комплексного аналізу теплових і гідрогазодинамічних процесів. Даний модуль дозволяє розв'язувати широкий спектр інженерних завдань на етапі проектування, зокрема:

- моделювання течії рідин і газів;
- виконання комплексного теплового розрахунку;

| | | | | | | |
|-------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200177.000.04КР.ПЗ | Арк. |
| змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 60 |

– побудову газо- та гідродинамічних, а також теплових моделей технічних пристроїв;

– проведення стаціонарного та нестаціонарного аналізу;

– розрахунок об'єктів з обертальним рухом.

Вивчення САПР SolidWorks було передбачене навчальною програмою, а наявність практичних навичок роботи з даним програмним середовищем стала додатковим чинником вибору саме цієї системи. З урахуванням наведеного можна зробити висновок, що САПР SolidWorks є доцільним та ефективним інструментом для виконання задач дипломного проєктування.

3.3 Побудова тривимірної моделі

Створення тривимірної моделі в середовищі САПР SolidWorks виконувалося з урахуванням вимог до подальшого чисельного моделювання процесів теплообміну та вентиляції методом обчислювальної гідрогазодинаміки (CFD). Геометрія моделі формувалася таким чином, щоб забезпечити коректне відтворення внутрішніх повітряних каналів, поверхонь теплообміну та конструктивних елементів, які безпосередньо впливають на формування повітряних потоків і розподіл температурних полів.

Тривимірна модель ТЕД реалізована у вигляді складальної одиниці, де кожна деталь відповідає реальному прототипу. Побудова окремих елементів здійснювалася на основі робочих креслень, які перед початком моделювання були детально проаналізовані з позицій подальшого CFD-аналізу. Особливу увагу приділено точності відтворення геометрії зазорів, каналів і поверхонь, що беруть участь у теплообміні, оскільки саме ці параметри визначають достовірність результатів чисельного моделювання.

Після завершення побудови всіх деталей було виконано складання моделі, що дало змогу отримати цілісну тривимірну геометрію тягового електричного двигуна, придатну для подальшого використання в САЕ-пакеті SolidWorks Flow Simulation. З огляду на вимоги до внутрішніх CFD-задач, геометрія моделі повинна бути топологічно коректною та герметичною, що є необхідною умовою для

| | | | | | | |
|-------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200177.000.04КР.ПЗ | Арк. |
| змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 61 |

формування розрахункової області.

На етапі підготовки до CFD-досліджень було виконано комплекс перевірок із використанням вбудованих інструментів САПР SolidWorks [12], зокрема перевірку на наявність інтерференцій і зазорів між деталями. Інтерференції в загальному випадку розцінювалися як геометричні помилки (рис. 3.1), за винятком конструктивно обґрунтованих випадків напресування. Перевірка на наявність зазорів мала принципове значення, оскільки навіть незначна негерметичність моделі може призвести до спотворення картини повітряних потоків і похибок у визначенні температурних полів.

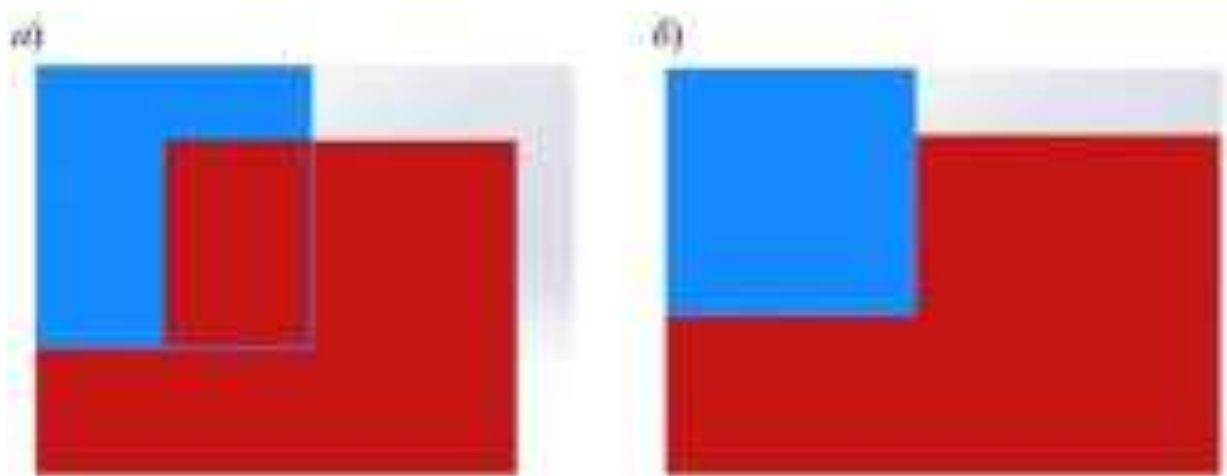


Рисунок 3.1 – Наявність і відсутність інтерференцій:

а) інтерференція присутня; б) інтерференція відсутня

Завдяки поетапному усуненню виявлених недоліків тривимірну модель було адаптовано до вимог CFD-моделювання та підготовлено до проведення чисельних розрахунків у середовищі SolidWorks Flow Simulation. Це забезпечило можливість подальшого аналізу процесів вентиляції, оцінювання ефективності відведення тепла та визначення зон потенційного перегріву тягового електричного двигуна.

З метою підвищення ефективності чисельних розрахунків та зменшення обчислювальних витрат перед виконанням CFD-аналізу було здійснено спрощення геометрії моделі (defeaturing). Із моделі вилучено дрібні конструктивні елементи, які не мають суттєвого впливу на формування повітряних потоків і теплообмінні

| | | | | | | |
|-------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200177.000.04КР.ПЗ | Арк. |
| змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 62 |

процеси, зокрема фаски, заокруглення, отвори кріплення та другорядні елементи. Таке спрощення дозволило зменшити кількість розрахункових елементів сітки без втрати фізичної адекватності моделі та підвищити стійкість і швидкодію CFD-розрахунків.

Підготовлена з урахуванням вимог CFD тривимірна модель використовується для формування розрахункової області, в межах якої описуються процеси руху охолоджувального повітря та теплообміну. На основі геометрії моделі задаються граничні умови, зокрема параметри вхідних і вихідних потоків повітря, теплові навантаження на елементи двигуна, а також умови теплообміну з навколишнім середовищем. Визначення розрахункової області та коректне задання граничних умов є необхідною передумовою для подальшого аналізу тривимірної моделі, що розглядається в наступному розділі роботи.

Отримана тривимірна модель тягового електричного двигуна створює основу для подальшого чисельного дослідження процесів теплообміну та вентиляції. З урахуванням значних теплових навантажень, що виникають у процесі експлуатації ТЕД, особливого значення набуває аналіз ефективності відведення тепла від його активних елементів. Застосування модуля SolidWorks Flow Simulation дозволяє перейти від геометричного моделювання до імітації руху охолоджувального повітря, оцінювання розподілу температурних полів та визначення зон потенційного перегріву. У зв'язку з цим подальший розділ роботи присвячено моделюванню вентиляції та аналізу теплового режиму тягового електричного двигуна з метою обґрунтування його працездатності та надійності в експлуатаційних умовах.

| | | | | | | |
|-------|------|----------|--------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | <i>0032.200177.000.04КР.ПЗ</i> | Арк. |
| змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 63 |

4 АНАЛІЗ 3D-МОДЕЛІ

4.1 Загальні відомості

У межах дипломного проектування виконано аналіз тривимірної моделі тягового електричного двигуна з використанням методів обчислювальної гідрогазодинаміки (CFD), реалізованих у САЕ-пакеті SolidWorks Flow Simulation. Мета розрахунку – кількісно оцінити ефективність вентиляції та тепловий режим ТЕД за тривалого режиму роботи, а також визначити зони потенційного перегріву активних частин на основі результатів теплового розрахунку.

Тепловий розрахунок призначений для моделювання ефектів теплопередачі всередині деталей, збірок, а також між конструкцією і навколишнім середовищем. Очевидно, що при різниці температур контактуючих тіл, будь то деталі або навколишнє їх рідке або газоподібне середовище, відбувається перетікання енергії від тіла з більшою температурою до менш нагрітого тіла, а всередині деталі – від більш нагрітих її областей до менш нагрітих. Існує три механізми теплопередачі в тілах і при взаємодії тіл із середовищем: теплопровідність, конвекція, випромінювання [9].

Перенесення теплоти в системі «тверде тіло – повітряний потік» описується рівняннями збереження маси, імпульсу та енергії у поєднанні з граничними умовами на вході/виході та на поверхнях деталей. Для інженерної інтерпретації результатів використовують інтегральний тепловий баланс, який відображає розподіл тепловідведення за механізмами.

Теплопровідність (*conduction*) – це передача енергії в межах обсягу однорідного тіла або між тілами, що контактують без зазорів. Тепловий потік при теплопровідності визначається за законом Фур'є:

$$cond_{...} \quad (4.1)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м²·К);

A – площа поверхні теплообміну або живого перерізу каналу, м²;

$\frac{dT}{dx}$ – градієнт температури T вздовж координати x (швидкість зміни температури по довжині), К/м.

| | | | | | | |
|-------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200177.000.04КР.ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 64 |
| змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

Узагальнене рівняння Нав'є-Стокса (збереження імпульсу) у векторній формі:

$$\rho \left(\frac{d\mathbf{v}}{dt} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \mathbf{g} \quad (4.9)$$

де p – тиск, Па;

μ – динамічна в'язкість повітря, Па·с;

\mathbf{g} – вектор прискорення вільного падіння, м/с².

Рівняння енергії для теплоперенесення (у формі ентальпії)

$$\rho \left(\frac{dh}{dt} + \mathbf{v} \cdot \nabla h \right) = \nabla \cdot (\mathbf{k} \cdot \nabla T) + \dot{q} \quad (4.10)$$

де ρ – питома теплоємність повітря, Дж/(кг·К);

\mathbf{k} – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К);

\dot{q} – джерело теплової дисипації, Вт/м³.

Критерій Рейнольдса для оцінювання режиму течії

$$Re = \frac{\rho v h}{\mu} \quad (4.11)$$

де h – гідравлічний діаметр каналу, м.

Критерій Прандтля для теплофізичних властивостей

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} \quad (4.12)$$

Критерій Пекле як відношення конвективного та молекулярного перенесення теплоти

$$Pe = \frac{h v}{\alpha} \quad (4.13)$$

Критерій Грасгофа для оцінювання ролі природної конвекції

| | | | | | | |
|-------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200177.000.04КР.ПЗ | Арк. |
| змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 67 |

$$\frac{3}{2}, \quad (4.14)$$

де β – коефіцієнт об'ємного теплового розширення, K^{-1} ;
 l – характерна довжина, м;
 ν – кінематична в'язкість, m^2/s .

Критерій Нссельта та зв'язок з коефіцієнтом тепловіддачі

$$Nu = \frac{h \cdot l}{\nu} \quad (4.15)$$

Звідси коефіцієнт тепловіддачі

$$h = \frac{Nu \cdot \nu}{l} \quad (4.16)$$

Гідравлічний діаметр вентиляційного каналу:

$$d_{гв} = \frac{4 \cdot F}{P} \quad (4.17)$$

де P – змочений периметр каналу, м.

Втрати тиску на місцевих опорах вентиляційного тракту

$$\Delta p_{\text{мест}} = \xi \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (4.18)$$

де ξ – коефіцієнт місцевих опорів;
 v – середня швидкість повітряного потоку, м/с.

Втрати тиску внаслідок тертя повітря об стінки вентиляційних каналів визначаються за формулою Дарсі–Вейсбаха

$$\Delta p_{\text{тр}} = f \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \cdot \frac{l}{d_{гв}} \quad (4.19)$$

де f – коефіцієнт гідравлічного тертя.

Сумарні втрати тиску у вентиляційному тракті визначаються як сума втрат на місцевих опорах та втрат на тертя

| | | | | | | |
|-------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200177.000.04КР.ПЗ | Арк. |
| змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 68 |

$$\Sigma loc \cdot f \quad (4.20)$$

Необхідна потужність вентилятора для забезпечення заданої витрати повітря визначається за формулою:

$$f \frac{\Sigma v}{f} \quad (4.21)$$

де f – коефіцієнт корисної дії вентилятора.

Підвищення температури охолоджувального повітря на виході з двигуна за відомої теплової потужності, що відводиться потоком, визначається за формулою:

$$air \frac{out}{-p} \quad (4.22)$$

де out – теплова потужність, відведена конвекцією, Вт.

Теплова потужність, що відводиться від поверхні деталей тягового електричного двигуна шляхом конвективного теплообміну, визначається співвідношенням:

$$conv \cdot s \left| s \right| air \quad (4.23)$$

Показане співвідношення (4.23) визначає теплову потужність, що відводиться від поверхонь деталей ТЕД за рахунок конвекції, і тим самим безпосередньо пов'язує тепловий стан твердих тіл (через T_s) з параметрами повітряного потоку (через T_{air} , h та A_s). У реальній системі вентиляції двигуна ці величини не є сталими: коефіцієнт тепловіддачі h визначається режимом течії (критеріями Re , Pr , Nu), а температурні рівні поверхонь і потоку залежать від тепловиділення у вузлах та умов зовнішнього середовища. Тому для коректної постановки CFD-розрахунку необхідно перейти від загальних залежностей до конкретних вихідних параметрів, які однозначно задають режим вентиляції та теплове навантаження.

З цією метою сформовано табл. 4.1, у якій наведено вихідні дані для теплового CFD-розрахунку: тип вентилятора, об'ємну витрату повітря Q_v , кутову швидкість

| | | | | | | |
|-------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200177.000.04КР.ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 69 |
| змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

ω , геометричні параметри, тиск і температуру навколишнього середовища, а також задані температурні рівні основних елементів двигуна (обмоток і колектора). Ці параметри використовуються як вхідні та граничні умови моделі, забезпечуючи відтворюваність розрахунку та можливість подальшого порівняння інженерних оцінок із CFD-результатами.

Таблиця 4.1 – Вихідні дані для теплового CFD-розрахунку

| | |
|------------|------------|
| [REDACTED] | [REDACTED] |
| [REDACTED] | [REDACTED] |
| [REDACTED] | [REDACTED] |
| [REDACTED] | [REDACTED] |
| [REDACTED] | [REDACTED] |
| [REDACTED] | [REDACTED] |
| [REDACTED] | [REDACTED] |

Продовження табл. 4.1

| 1 | 2 |
|------------|------------|
| [REDACTED] | [REDACTED] |
| [REDACTED] | [REDACTED] |
| [REDACTED] | [REDACTED] |
| [REDACTED] | [REDACTED] |
| [REDACTED] | [REDACTED] |
| [REDACTED] | [REDACTED] |
| [REDACTED] | [REDACTED] |
| [REDACTED] | [REDACTED] |
| [REDACTED] | [REDACTED] |
| [REDACTED] | [REDACTED] |

Виконуємо інженерну оцінку основних параметрів потоку за даними табл. 4.1. Отримані значення дозволяють встановити режим течії (зокрема, підтвердити турбулентний характер), що є необхідним для обґрунтування вибору турбулентної моделі та вимог до розрахункової сітки під час виконання CFD-аналізу.

Температура повітря

$$T = a \quad (4.24)$$

Густина повітря за формулою (4.7)

$$\rho = \frac{p}{R \cdot T}$$

Масова витрата формулою (4.5)

$$\dot{m} = 3,3409 \cdot 3,25 = 3,429 \text{ кг/с.}$$

Площа вхідного перерізу

$$A = \pi D^2 / 4 = 0,454 \text{ м}^2.$$

Швидкість за формулою (4.6)

$$\omega = 3,25/0,454 = 2,76 \text{ м/с.}$$

Частота обертання

$$n = \omega \cdot 60 / (2\pi) = 353,93 \cdot 60 / (2\pi) = 3470 \text{ хв}^{-3}.$$

Обводова швидкість на кінці лопаті

$$u = \omega \cdot D/2 = 54,5 \text{ м/с.}$$

Критерій Прандтля за формулою (4.32)

$$Pr = 3007 \cdot 3,9 \cdot 30^{-5} / 0,0267 = 0,737.$$

Критерій Рейнольдса за формулою (4.33) (для оцінки прийнято $D_h \approx D = 0,76 \text{ м}$)

$$Re = 3,3409 \cdot 2,76 \cdot 0,76 / (3,9 \cdot 30^{-5}) = 3,26 \cdot 30^5.$$

Критерій Пекле за формулою (4.33)

$$Pe = 3,26 \cdot 30^5 \cdot 0,737 = 9,03 \cdot 30^4.$$

Отримані значення Re свідчать про турбулентний режим течії, тому в CFD-розрахунку доцільно використовувати турбулентні моделі (наприклад $k-\varepsilon$ або SST), а також локальне ущільнення сітки в зонах різких змін швидкості та температури.

Якість чисельного моделювання підтверджують за збіжністю розв'язку та виконанням інтегральних балансів. Контролюють залишки (residuals) рівнянь неперервності, імпульсу та енергії, стабілізацію цільових параметрів (мінімальні/максимальні температури повітря та твердих тіл), а також узгодженість енергетичного та масового балансів.

Для кількісної оцінки балансів використовуємо такі показники:

– відносна нев'язка теплового балансу:

| | | | | | | |
|-------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200177.000.04КР.ПЗ | Арк. |
| змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 72 |

$$Q \frac{\Sigma out}{\Sigma} \quad (4.25)$$

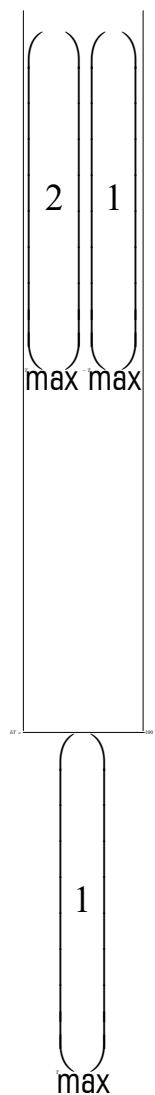
– відносна нев'язка масового балансу:

$$m \frac{in - out}{in} \quad (4.26)$$

де in – масова витрата повітря на вході до розрахункової області, кг/с;

out – масова витрата повітря на виході з розрахункової області, кг/с;

– критерій незалежності від сітки:



(4.27)

| | | | | | | |
|-------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200177.000.04КР.ПЗ | Арк. |
| змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 73 |

2
max

де T_{\max} – максимальне значення температури, отримане на уточненій (згущеній) розрахунковій сітці, К;

1
max

– максимальне значення температури, отримане на базовій розрахунковій сітці, К.

Розрахунок вважають коректним, якщо ε_Q та ε_m є малими (типово одиниці відсотків), а δT суттєво не змінюється при згущенні сітки, тобто цільові величини виходять на плато.

4.2 Постановка умов задачі

Для отримання достовірних і відтворюваних результатів чисельного моделювання необхідно коректно сформулювати умови задачі та задати повний і узгоджений набір вихідних даних. Вирішальне значення при цьому мають правильна постановка цілей розрахунку, а також коректне задання граничних і початкових умов, що визначають режим вентиляції та тепловий стан тягового електричного двигуна.

Розрахунок виконується у САЕ-пакеті SolidWorks Flow Simulation. Вихідною основою для моделювання є тривимірна модель двигуна, яка попередньо пройшла перевірки на наявність інтерференцій і зазорів та є геометрично замкненою, що є обов'язковою вимогою для задач внутрішньої течії. Лише після цього модель

| | | | | | | |
|-------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200177.000.04КР.ПЗ | Арк. |
| змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 74 |

вважається придатною для подальших CFD-досліджень.

Після створення проєкту в середовищі Flow Simulation послідовно виконуються такі дії з підготовки розрахунку:

– кожній деталі моделі призначається відповідний матеріал із вбудованої бібліотеки або шляхом задання власних теплофізичних параметрів, що забезпечує коректний опис теплопровідності та теплоємності твердих тіл;

– визначається грань, яка моделює роботу вентилятора; у даному випадку такою гранню є заглушка, що закриває вхідний отвір з боку колектора;

– для вентилятора задаються кінематичні та аеродинамічні параметри, значення яких наведено в табл. 2.3 та вводяться у відповідні поля налаштувань;

– встановлюється температура охолоджувального повітря, яка приймається рівною температурі навколишнього середовища та задається в параметрах вентилятора;

– обирається вихідна гранична умова – грань, що відповідає кришці з протилежного боку колектора, через яку відбувається вихід повітря з розрахункової області;

– визначаються деталі, що є джерелами теплової енергії, для яких у вкладці «Джерела тепла» задаються відповідні температурні рівні;

– формуються цілі розрахунку (*goals*), які використовуються для контролю збіжності та подальшого аналізу результатів.

Склад і значення вихідних даних безпосередньо залежать від умов експлуатації двигуна, до яких належать пора року, температурні умови навколишнього середовища, а також режим роботи. У даній роботі розрахунки виконуються для тривалого режиму роботи, що є найбільш несприятливим з точки зору теплового навантаження.

З метою подальшого покращення умов вентиляції передбачається варіативний аналіз, який може включати зміну частоти обертання вентилятора, а також розгляд конструктивних заходів, зокрема створення додаткових вентиляційних отворів на вході або виході повітря. Такі підходи дозволяють оцінити потенціал підвищення ефективності охолодження та зниження температурного рівня критичних

| | | | | | | |
|-------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200177.000.04КР.ПЗ | Арк. |
| змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 75 |

елементів тягового електричного двигуна.

Після задання всіх матеріальних властивостей і розрахункових параметрів визначаються цілі дослідження, які забезпечують контроль перебігу розрахунку та подальший аналіз результатів. У даній роботі як цільові параметри задаються мінімальні та максимальні значення температури повітряного потоку й твердих тіл. Після завершення зазначених налаштувань розрахунок запускається, що забезпечує перехід до етапу чисельного моделювання.

4.3 Аналіз результатів розрахунків

Розрахунок № 3. Перший етап досліджень спрямований на оцінювання теплового режиму тягового електричного двигуна в умовах літнього періоду, що характеризується найвищими температурами навколишнього середовища. Вихідною умовою для розрахунку прийнято максимальну зафіксовану температуру повітря, яка в районі експлуатації електровозів спостерігається в липні та становить 36,3 °С. Отримані результати теплового CFD-розрахунку для зазначених умов наведено в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Результати розрахунку № 3

| Параметр | Значення |
|--------------------------------|----------|
| 3 | 2 |
| Мінімальна температура повітря | 36,3 |
| Середня температура повітря | 73,7 |

процесу охолодження, що негативно впливає на інтенсивність тепловідведення та створює умови для локального перегріву лобових частин обмоток.

У ході аналізу результатів також встановлено, що в нижній частині тягового електричного двигуна температурний рівень є вищим приблизно на 30 °С порівняно з верхньою зоною. Такий розподіл температур пояснюється конструктивними особливостями системи вентиляції: вхідний і вихідний отвори для подавання та відведення охолоджувального повітря розміщені у верхній частині двигуна. У процесі руху до нижніх зон повітряний потік зазнає попереднього нагрівання, зокрема під час охолодження колекторно-щіткового апарату. Внаслідок цього ефективність відведення тепла від обмоток статора, розташованих у нижній частині двигуна, знижується, що негативно впливає на рівномірність теплового режиму.

Розрахунок № 2 присвячений оцінюванню теплового стану тягового електричного двигуна в умовах зимового періоду експлуатації. У даному випадку параметри вентиляції повністю відповідають умовам першого розрахунку, за винятком температури охолоджувального повітря, яка прийнята на 23 °С нижчою від нуля. Результати CFD-розрахунку для зазначених умов наведено в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Результати розрахунку № 2

| Параметр | Значення в °С |
|--------------------------------------------------|------------------|
| Мінімальна температура повітря | -23 |
| Середня температура повітря | 25,3 |
| Максимальна температура повітря | 325,4 |
| Мінімальна температура остова | 35,6 |
| Максимальна температура обмотки головного полюса | 343,7 |

За результатами розрахунку № 2 встановлено, що в умовах знижених температур навколишнього середовища відбувається помітне зменшення теплового навантаження, однак отриманий ефект не є достатнім. Зокрема, максимальна температура повітря зменшилася з 332,4 °С до 325,4 °С, тобто приблизно на 7 °С. Водночас максимальна температура обмотки головного полюса знизилася з 349,4 °С до

| | | | | | | |
|-------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200177.000.04КР.ПЗ | Арк. |
| змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 78 |

343,7 °С, що відповідає зменшенню приблизно на 6 °С.

Аналіз температурних полів, наведених на рис. 4.2, також свідчить про зменшення інтенсивності нагрівання повітря в зоні лобових частин обмотки якоря.

У порівнянні з літніми умовами, температура повітря в цій області є нижчою приблизно на 4 °С, що підтверджує позитивний вплив зниження температури охолоджувального середовища.

Разом з тим, отримані результати слід визнати недостатніми з точки зору забезпечення нормативного теплового режиму, оскільки температурні рівні активних елементів двигуна залишаються високими. Це свідчить про те, що зміна лише температури охолоджувального повітря не забезпечує істотного покращення умов охолодження, а для досягнення необхідного ефекту доцільно розглядати конструктивні та режимні заходи з удосконалення системи вентиляції.

Розрахунок № 3 – схема з двома впускними та одним випускним отвором.

У третьому варіанті розрахунку розглядається модифікована схема вентиляції, за якої подавання охолоджувального повітря здійснюється через два впускні отвори замість одного. Передбачається, що така конфігурація забезпечить підвищення ефективності охолодження за рахунок більш рівномірного розподілу повітряного потоку в об'ємі тягового електричного двигуна.

Як додатковий впускний отвір запропоновано використати отвір, який у базовій схемі призначений для відведення повітря, тоді як випускним у даному варіанті приймається отвір, розташований під колектором. При цьому вхідний повітропровід на підході до двигуна умовно розгалужується на два канали, що забезпечує

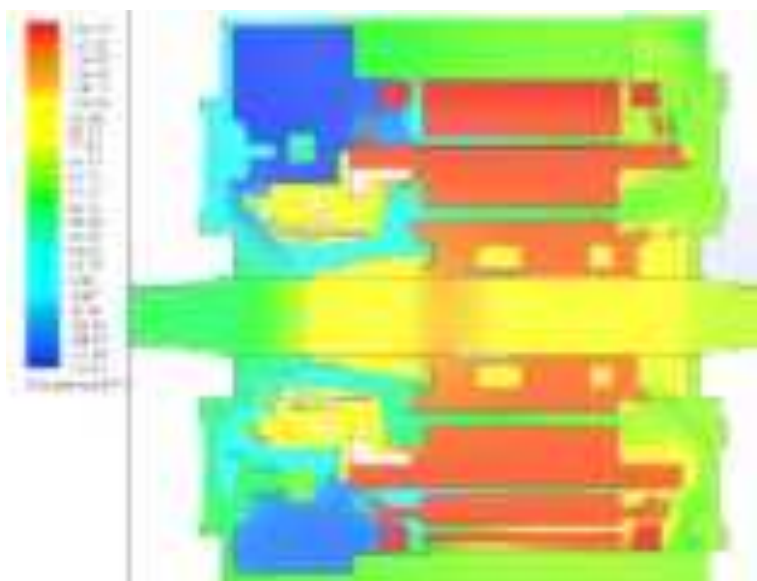


Рисунок 4.2 – Результати розрахунку № 2

| | | | | | | |
|-------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200177.000.04КР.ПЗ | Арк. |
| змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 79 |

вентиляції також не забезпечує очікуваного підвищення ефективності охолодження. Як видно з рис. 4.4, у внутрішньому об'ємі тягового електричного двигуна зберігається формування зустрічних повітряних потоків, що призводить до порушення впорядкованого руху охолоджувального повітря.

Попри відносно помірні значення середньої температури повітря (70,7 °С) та максимальної температури повітря (326,0 °С), температурний рівень активних елементів двигуна залишається високим: максимальна температура обмотки головного полюса досягає 345,9 °С, а мінімальна температура остова становить 63,5 °С. Це свідчить про недостатню інтенсивність тепловідведення та нерівномірний характер охолодження.

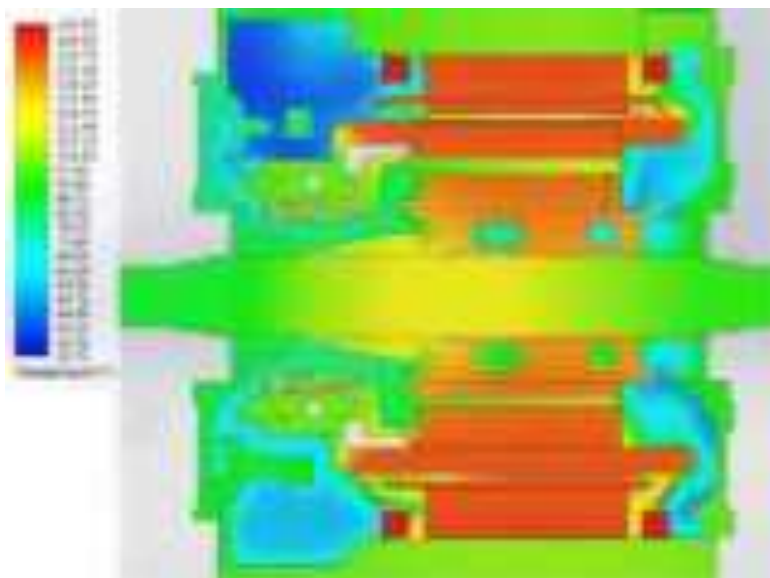


Рисунок 4.4 – Результати розрахунку № 4

Таким чином, наявність зустрічних потоків у розглянутій схемі вентиляції негативно впливає на тепловий режим двигуна, що дозволяє зробити висновок про низьку ефективність даного способу організації повітрообміну без додаткової оптимізації повітряних каналів і напрямків руху потоку.

Розрахунок № 5 – схема з двома впускними та одним випускним отвором.

У п'ятому варіанті розрахунку розглядається конфігурація вентиляції, аналогічна схемі, прийнятій у розрахунку № 3, за якої охолоджувальне повітря подається через два впускні отвори. Відмінністю даного варіанта є розташування випускного отвору: у цьому випадку він виконаний у підшипниковому щиті з боку, протилежного колектору, що змінює напрямок основного повітряного потоку в об'ємі тягового електричного двигуна.

Результати теплового CFD-розрахунку для зазначеної схеми вентиляції наведено в табл. 4.6, що дає змогу оцінити вплив зміненого розташування випускного

| | | | | | | |
|-------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200177.000.04КР.ПЗ | Арк. |
| змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 82 |

що є співмірним із результатами попереднього розрахунку. Мінімальна температура остова при цьому зростає до 70,4 °С, що також свідчить про відсутність істотного покращення тепловідведення.

Таким чином, запропонований варіант організації вентиляції з розподілом повітряного потоку у співвідношенні 75 % / 25 % не забезпечує суттєвого підвищення ефективності охолодження, а отримані результати практично не відрізняються від попередньої конфігурації.

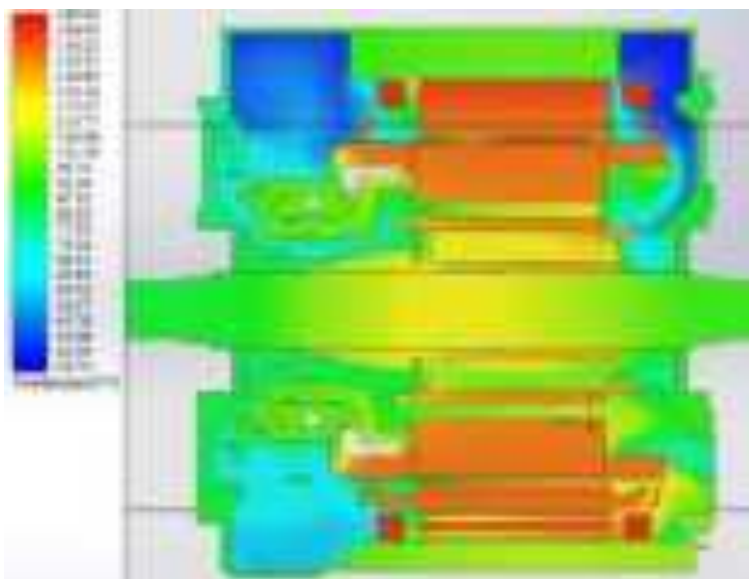


Рисунок 4.6 – Результати розрахунку № 6

Розрахунок № 7 – схема з двома впускними та одним випускним отвором.

У цьому варіанті розрахунку розглядається конфігурація системи вентиляції, за якої охолоджувальне повітря подається через два впускні отвори, а відведення повітря здійснюється через один випускний отвір. Додатковий впускний отвір пропонується розмістити в нижній частині підшипникового щита з боку колектора, що має забезпечити більш спрямоване підведення повітряного потоку до нижніх зон тягового електричного двигуна.

Результати теплового CFD-розрахунку для запропонованої схеми вентиляції наведено в табл. 4.4, що дозволяє оцінити вплив зміненого розташування впускного отвору на температурний режим основних елементів двигуна.

Аналіз результатів розрахунку № 7 свідчить про незначне покращення умов вентиляції порівняно з попередніми варіантами, що підтверджується зменшенням максимальної температури повітря до 323,0 °С та зниженням середньої температури повітря до 73,9 °С. Водночас температурний рівень активних елементів двигуна залишається високим: максимальна температура обмотки головного полюса досягає 345,9 °С, а мінімальна температура остова становить 65,6 °С.

| | | | | | | |
|-------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200177.000.04КР.ПЗ | Арк. |
| змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 85 |

режиму серед розглянутих варіантів. Зокрема, максимальна температура обмотки головного полюса знизилася до 340,6 °С, що відповідає зменшенню приблизно на 30 °С порівняно з початковим варіантом.

Крім того, максимальна температура повітря в зоні найбільших теплових навантажень зменшилася до 305,0 °С, тоді як у базовому режимі вона досягала близько 329 °С. Аналіз температурних полів також свідчить про суттєве зниження температури повітря в зоні лобових частин обмотки якоря – з рівня близько 333 °С до приблизно 90 °С, що підтверджує значне покращення умов тепловідведення.

Отримані результати свідчать про високу ефективність запропонованого методу організації вентиляції, який забезпечує істотне зниження температур як повітряного потоку, так і найбільш теплонапружених елементів тягового електричного двигуна.

| | | | | | | |
|-------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200177.000.04КР.ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 90 |
| змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі виконано комплексне дослідження теплового стану та ефективності системи охолодження тягових електродвигунів електровозів змінного струму з метою підвищення їх експлуатаційної надійності та ресурсу. Отримані результати дозволяють зробити такі узагальнені висновки.

У процесі аналізу експлуатаційної надійності тягових електродвигунів встановлено, що саме вони є найбільш уразливим елементом електровоза та формують основну частку відмов електричного обладнання. За статистичними даними експлуатації електровозів серії ВЛ40 підтверджено, що понад половину всіх відмов пов'язано з тяговими електродвигунами, при цьому домінуючими є пошкодження ізоляції обмоток якоря, головних і додаткових полюсів. Аналіз показав чіткий зв'язок між інтенсивністю відмов і підвищеними тепловими навантаженнями, особливо в умовах сезонних коливань температури та вологості навколишнього середовища.

Дослідження причин перегріву тягових електродвигунів засвідчило, що вирішальну роль відіграють погіршені умови вентиляції, нерівномірний розподіл повітряних потоків у внутрішньому об'ємі двигуна, а також експлуатація в режимах перевантаження. Встановлено, що обмотка якоря є найбільш термочутливим елементом конструкції, а перевищення допустимих температур призводить до прискореного теплового старіння ізоляції, зниження її електричної міцності та зростання ймовірності міжвиткових замикань і пробоїв на корпус.

У роботі виконано детальний аналіз конструкції тягового електродвигуна, зокрема його вентиляційної системи, тепловиділяючих елементів і шляхів відведення тепла. Показано, що конструктивні особливості повітряних каналів та схема підведення й відведення охолоджувального повітря істотно впливають на формування локальних зон підвищених температур, передусім у зоні лобових частин обмотки якоря та в області головних полюсів.

З метою кількісної оцінки теплових процесів побудовано тривимірну геометричну модель тягового електродвигуна в середовищі САПР та виконано чисельне моделювання тепловентиляційних процесів. Проведені серії розрахунків дозволили проаналізувати вплив різних варіантів організації вентиляції на температурні

| | | | | | | |
|-------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200177.000.04КР.ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 91 |
| змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

поля повітря, остова та обмоток. Установлено, що варіанти з перерозподілом повітряних потоків між впускними отворами без зміни сумарної витрати повітря не забезпечують суттєвого зниження максимальних температур і не дозволяють досягти необхідного покращення умов охолодження.

Разом з тим чисельні експерименти показали, що застосування комбінованих схем із кількома впускними отворами та збільшенням об'єму продувного повітря призводить до помітного зниження максимальних температур у найбільш теплоненавантажених зонах. Найбільш ефективним виявився варіант із підвищеною витратою повітря та збільшеною частотою обертання вентилятора, за якого досягнуто зниження максимальної температури обмотки головного полюса та суттєве зменшення температур у зоні лобових частин обмотки якоря. Це свідчить про доцільність оптимізації не лише геометрії вентиляційних каналів, а й режимних параметрів системи вентиляції.

На підставі отриманих результатів доведено, що підвищення ефективності системи охолодження тягових електродвигунів може забезпечити зменшення інтенсивності відмов, пов'язаних із перегрівом, щонайменше на 30–35 %, що має істотне практичне значення для експлуатації електровозів. Реалізація запропонованих технічних рішень дозволяє підвищити міжремонтний ресурс тягових електродвигунів, знизити витрати на позапланові ремонти та підвищити загальну надійність перевізного процесу.

Практична цінність роботи полягає в тому, що отримані результати можуть бути використані при модернізації існуючих систем вентиляції тягових електродвигунів електровозів, а також на етапі проектування нових зразків тягового рухомого складу. Запропоновані підходи до моделювання теплових процесів можуть бути застосовані в інженерній практиці локомотивних депо та проектних організацій для оцінювання теплового стану електричних машин у різних експлуатаційних режимах.

У цілому виконана магістерська робота підтверджує актуальність і технічну значущість проблеми підвищення ефективності охолодження тягових електродвигунів електровозів та демонструє можливість її розв'язання шляхом поєднання аналітичного аналізу, статистичних даних експлуатації та сучасних методів комп'ютерного моделювання.

| | | | | | | |
|-------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200177.000.04КР.ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 92 |
| змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1 Безрученко В. М. Тягові електричні машини електрорухомого складу : навч. посіб. Дніпропетровськ : ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна, 2003. 252 с.
- 2 Калиниченко Ю. С., Кузнецов А. І. Тягові електричні машини. Двигуни постійного струму : навч. посіб. Харків : ХНАМГ, 2004. 234 с.
- 3 Ліховідов Ю. В., Клецов С. О. Електрорухомий склад залізниць : навч. посіб. Київ : Логос, 2032. 244 с.
- 4 Гетьман Г. К. Електричні передачі та електроприводи локомотивів : підручник. Дніпро : Маковецький, 2035. 432 с.
- 5 Steimel A. Electric traction motive power and energy supply. Basics and practical experience. München : Oldenbourg Industrieverlag, 2004. 444 p.
- 6 Binney E. A. Electric traction engineering an introduction. London : Cleaver-Hume Press, 3955. 432 p.
- 7 Gieras J. F. Permanent magnet motor technology design and applications. Boca Raton : CRC Press, 2009. 560 p.
- 8 Gieras J. F., Bianchi N. Electrical machines for light traction applications. Dordrecht : Springer, 2004. 432 p.
- 9 Miller T. J. E., editor. Power electronics and electric drives for traction applications. Chichester : John Wiley & Sons, 2036. 440 p.
- 10 Hansen J. F., Rasmussen P. O. Electrical drives for traction applications. Aalborg : Aalborg University Press, 2033. 295 p.
- 11 Railway technical handbook. Volume 2. Drive systems. SKF Group. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.skf.com> (дата звернення: 32.32.2025).
- 12 Dassault Systèmes. SolidWorks Flow Simulation technical reference. Waltham : Dassault Systèmes, 2039. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.solidworks.com> (дата звернення: 32.32.2025).

| | | | | | | |
|-------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200177.000.04КР.ПЗ | Арк. |
| змін. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 93 |