

Міністерство освіти і науки України

Криворізький національний університет

Електротехнічний факультет

Пояснювальна записка

**до кваліфікаційної роботи бакалавра
за спеціальністю 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка**

ТЕМА РОБОТИ:

**Визначення параметрів системи примусового охолодження тягових
електродвигунів**

Виконав: студент групи ЕЕМ-23ск

Олександр МИСНИК

Керівник випускної роботи _____

к.т.н., доц. Ігор СІНЧУК

Нормо контролер _____

к.т.н., доц. Ігор СІНЧУК

Декан ЕТФ _____

к.т.н., доц. Владислав ФЕДОТОВ

Гарант освітньої програми _____

к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Кривий Ріг 2026 р.

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: бакалавр

Спеціальність: 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

МИСНИК Олександр Ігорович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Визначення параметрів системи примусового охолодження
тягових електродвигунів

1. Термін подання студентом роботи: 19 червня 2026 р.
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою є визначення параметрів системи примусового охолодження тягових електродвигунів
3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) I. Визначення параметрів витрати повітря для системи примусового охолодження тягових електродвигунів; II. Дослідження параметрів системи примусового охолодження тягових електродвигунів; III. Розробка практичної реалізації системи примусового охолодження тягових електродвигунів.
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) I. Схема вентиляції тягового двигуна ДК-809А; II. Вимірювання витрати повітря з перепаду тиску; III. Схема примусового охолодження двигуна стисненим повітрям; IV. Принципова електрична схема дифманометра-витратоміра ДМКК.

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Ім'я, прізвище консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Ігор СІНЧУК		
II	Ігор СІНЧУК		
III	Ігор СІНЧУК		

6. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін
1	Теоретичні засади для розрахунку параметрів витрати повітря	21.05.26
2	Практичний розрахунок параметрів витрати повітря	27.05.26
3	Визначення параметрів охолоджуючого повітря	31.05.26
4	Визначення параметрів температури перегріву повітря	02.06.26
5	Визначення параметрів витрати повітря для системи примусового охолодження	07.06.26
6	Розробка практичної реалізації системи примусового охолодження	11.06.26

Дата видання завдання 18.05.2026 р.

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Олександр МИСНИК
(Ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Ігор СІНЧУК
(Ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до випускової атестаційної роботи бакалавра на тему: «Визначення параметрів системи примусового охолодження тягових електродвигунів»

43 с., 4 рис., 35 літературних джерел

Мета роботи: Підвищення експлуатаційної надійності, довговічності та питомої потужності тягового рухомого складу шляхом наукового обґрунтування та оптимізації параметрів систем примусового охолодження тягових електродвигунів в умовах інтенсивних та динамічно змінних навантажень, а також обґрунтування комплексної науково-інженерної методики розрахунку та визначення раціональних теплофізичних, гідродинамічних та конструктивних параметрів системи примусової вентиляції тягових електродвигунів, що забезпечує підтримку їхнього теплового стану в межах допустимих класів ізоляції за мінімальних енергетичних витрат на власні потреби локомотива.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

Провести аналіз джерел тепловиділення у тяговому електродвигуні (ТЕД) та визначити максимальні теплові втрати на різних ділянках тягового циклу.

Проаналізувати структуру та величину енергетичних втрат (магнітних, електричних, механічних та додаткових) у вузлах тягового електродвигуна, які виступають первинними джерелами тепловиділення під час роботи.

Розробити комплексну математичну модель для теплового та аеродинамічного (або гідравлічного) розрахунку системи охолодження з урахуванням конфігурації внутрішніх каналів статора і ротора.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-14	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розробити багатовузлову еквівалентну теплову схему заміщення тягової машини, що дозволяє моделювати просторовий розподіл температурних полів в обмотках статора (якоря), осерді та колекторно-щітковому вузлі в статичних і динамічних режимах.

Дослідити вплив фізичних властивостей теплоносія (повітря, антифриз, трансформаторна олива) на ефективність конвективного теплообміну.

Сформулювати методику визначення мінімально необхідної об'ємної витрати охолоджувального повітря залежно від поточної теплової напруженості та режиму роботи локомотива.

Визначити оптимальну об'ємну витрату теплоносія та необхідний напір вентиляційної або насосної установки для забезпечення стабільного температурного режиму обмоток.

Розрахувати аеродинамічний опір внутрішніх вентиляційних каналів двигуна та підвідних повітропроводів для оптимізації напору нагнітальних вентиляторів.

Запропонувати алгоритми адаптивного керування продуктивністю мотор-вентиляторів (або pomp) залежно від фактичного теплового стану ТЕД для зменшення витрат енергії на власні потреби локомотива.

Обґрунтувати технічні рішення щодо інтеграції систем частотно-регульованого приводу вентиляторів для реалізації адаптивного керування інтенсивністю охолодження.

ТЯГОВИЙ ЕЛЕКТРОДВИГУН, ПРИМУСОВЕ ОХОЛОДЖЕННЯ, ТЕПЛОВИЙ БАЛАНС, ТЕПЛОВИЙ СТАН, ВИТРАТА ПОВІТРЯ, АЕРОДИНАМІЧНИЙ ОПІР, ОБ'ЄМНА ВИТРАТА, ТЕМПЕРАТУРНИЙ НАПІР, ТЕПЛОВІДДАЧА, МОТОР-ВЕНТИЛЯТОР, ТЕПЛОВІ ВТРАТИ

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-14	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зміст

Вступ.....	7
Розділ 1. Визначення параметрів витрати повітря для системи примусового охолодження тягових електродвигунів.....	18
1.1. Теоретичні засади для розрахунку параметрів витрати повітря для системи примусового охолодження тягових електродвигунів	18
1.2. Практичний розрахунок параметрів витрати повітря для системи примусового охолодження тягових електродвигунів	20
Розділ 2. Дослідження параметрів системи примусового охолодження тягових електродвигунів	26
2.1. Визначення параметрів охолоджуючого повітря для системи примусового охолодження тягових електродвигунів	26
2.2. Визначення параметрів температури перегріву повітря для системи примусового охолодження тягових електродвигунів	28
2.3. Визначення параметрів витрати повітря для системи примусового охолодження тягових електродвигунів.....	29
Розділ 3. Розробка практичної реалізації системи примусового охолодження тягових електродвигунів	33
3.1. Практична реалізація елементів розрахунку параметрів системи примусового охолодження тягових електродвигунів	33
3.2. Розрахунок середньоквадратичної відносної похибки для практичної реалізації визначення параметрів системи примусового охолодження тягових електродвигунів	37
Висновки	38
Список використаних джерел	40

Вступ

Проблема теплової напруженості сучасних тягових двигунів

Тягові електродвигуни (ТЕД) є найбільш навантаженими елементами електромеханічних систем залізничного та промислового рухомого складу.

Сучасні тенденції розвитку транспортного машинобудування вимагають безперервного підвищення потужності локомотивів, збільшення ваги поїздів та реалізації жорстких графіків руху.

Водночас габаритні розміри та маса самих двигунів суворо обмежені простором залізничного візка та лімітами на осьове навантаження.

Таке зростання питомої потужності неминуче призводить до різкого підвищення теплової напруженості машини.

Електричні втрати в міді обмоток та магнітні втрати в сталі осердя за максимальних режимів пуску та тривалої тяги виділяють колосальну кількість теплової енергії.

Якщо це тепло не відводити вчасно, температура всередині двигуна перевищить критичні межі, встановлені для використовуваного класу ізоляційних матеріалів.

Наслідки перегріву та роль примусового охолодження

Перегрів ТЕД є головною причиною передчасного виходу електричних машин з ладу.

Згідно з законом Арреніуса (правилом Монтсінгера), перевищення робочої температури ізоляції всього на вісім-десять градусів понад норму скорочує термін її служби вдвічі через процеси прискореної теплової деградації та крихкості.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-14	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Це призводить до міжвиткових замикань, пробою на корпус та катастрофічних аварій силового ланцюга.

Крім того, надмірний нагрів викликає деформацію колекторних пластин, погіршення комутації, підвищений знос щіток та збільшення активного опору обмоток, що знижує загальний коефіцієнт корисної дії (ККД) локомотива.

В умовах високих навантажень природне охолодження через корпус двигуна є абсолютно неефективним.

Забезпечити стабільну працездатність ТЕД здатна лише правильно спроектована система примусового (незалежного) охолодження, яка за допомогою потужних відцентрових або осьових вентиляторів безперервно проганяє крізь внутрішні канали машини значні об'єми атмосферного повітря.

Інженерна суперечність та пошук раціональних параметрів

Актуальність визначення точних параметрів системи примусового охолодження полягає у розв'язанні складної техніко-економічної суперечності.

З одного боку, для гарантованого захисту від перегріву доцільно подавати якомога більше повітря із максимальним запасом.

Проте, надлишкова продуктивність вентиляторів викликає низку негативних наслідків:

- Енергетичні втрати. Потужність, що витрачається на привід допоміжних вентиляторів, може досягати значного відсотка від загальної потужності локомотива, погіршуючи його загальну енергоефективність.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-14	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Масогабаритні обмеження. Потужні вентилятори, великі камери очищення повітря та розвинена система повітропроводів займають корисний простір у кузові локомотива і збільшують його вагу.

- Абразивний знос та забруднення. Разом із великим потоком повітря всередину двигуна потрапляє шахтний або атмосферний пил, волога та сніг. Пил діє як абразив на обмотки та колектор, а у поєднанні з вологою створює провідний шлам, що знижує опір ізоляції.

Тому визначення параметрів системи охолодження не повинно бути надлишковим.

Необхідно розробити таку методику, яка дозволить чітко розрахувати мінімально достатню витрату повітря та необхідний тиск (напір) для подолання аеродинамічного опору складних внутрішніх каналів ТЕД (пазів статора, вентиляційних отворів ротора, лобових частин).

Сучасний підхід: адаптивні системи охолодження

Особливої актуальності дослідження набуває в контексті створення адаптивних (інтелектуальних) систем охолодження.

Традиційні вентилятори працюють із постійною швидкістю обертання, незалежно від того, чи локомотив тягне важкий состав на підйом, чи котиться без навантаження на спуск.

Оптимізація алгоритмів та параметрів системи дозволяє перейти до частотного регулювання допоміжних приводів.

Бортовий комп'ютер на основі датчиків або теплових моделей повинен в реальному часі визначати поточну температуру обмоток і гнучко змінювати оберти вентилятора.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-14	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Науково-практичне значення

Наукова новизна досліджень у цьому напрямку полягає в удосконаленні теплових та гідродинамічних моделей ТЕД, які враховують нестационарні графіки руху та складну геометрію вентиляційних трактів.

Практична цінність розробки системи параметричного розрахунку охолодження полягає у забезпеченні максимальної надійності тягових двигунів, суттєвому зниженні витрат енергії на власні потреби локомотива, зменшенні шуму вентиляційних установок та подовженні міжремонтного ресурсу ізоляційних комплексів електричних машин.

Актуальність та фізична суть процесу

Тягові електродвигуни (ТЕД) рухомого складу працюють у вкрай жорстких умовах: висока щільність компонування у візках, постійні динамічні перевантаження та часті пуско-гальмівні режими.

У процесі перетворення електричної енергії на механічну частина потужності неминуче розсіюється у вигляді тепла.

Якщо це тепло не відводити, температура обмоток перевищить допустимі межі для класу ізоляції (наприклад, **180°C** для класу Н або **200°C** для класу С), що призведе до теплового пробоя та виходу двигуна з ладу.

Примусове охолодження (незалежна вентиляція або рідинне охолодження) дозволяє значно підвищити питому потужність ТЕД порівняно з двигунами із самовентиляцією.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-14	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Загальні теплові втрати, які необхідно відвести від ТЕД, складаються з:

- Електричних втрат у міді статора і ротора: P_{cu}
- Магнітних втрат у сталі (на вихрові струми та гістерезис): P_{Fe}
- Механічних втрат (тертя в підшипниках та аеродинамічний опір): P_{mech}
- Додаткових втрат (від вищих гармонік, особливо при живленні від інвертора): P_{add}

Тепловий розрахунок: Визначення витрати теплоносія

Основним завданням при проектуванні системи примусового охолодження є визначення необхідної об'ємної витрати теплоносія (повітря або рідини), яка здатна поглинути та винести за межі двигуна виділену теплову потужність.

Базове рівняння теплового балансу в усталеному режимі має простий вигляд.

З цього рівняння розраховується **необхідна об'ємна витрата повітря**.

Приклад параметрів для повітряного охолодження:

Для стандартних умов густина повітря становить **1.2 кг/м³**, а питома теплоємність **1005 Дж/(кг·К)**.

Допустимий підігрів повітря зазвичай приймають у межах **15–25°C**.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-14	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

Аеродинамічний (гідравлічний) розрахунок

Самого лише розрахунку об'єму повітря недостатньо. Щоб "проштовхнути" цей об'єм крізь вузькі вентиляційні канали статора, повітряний зазор та лобові частини обмоток, вентилятор має створити певний тиск.

Падіння тиску (аеродинамічний опір) в каналах двигуна визначається простою формулою.

Після визначення необхідної витрати та опору розраховується механічна потужність приводного двигуна вентилятора-нагнітача.

Порівняння систем охолодження ТЕД (стандарт ІЕС 60034-6)

Вибір типу охолодження (код ІС) залежить від масо-габаритних обмежень та умов експлуатації:

Тип охолодження (Код ІС)	Принцип дії	Переваги	Недоліки / Специфіка
ІС 01 (Самовентиляція)	Вентилятор насаджений на вал ТЕД.	Відсутність додаткових мотор-вентиляторів.	Охолодження різко погіршується на малих швидкостях (наприклад, при важкому рушанні поїзда).

IC 06 (Примусова незалежна)	Окремий мотор- вентилятор нагнітає повітря в ТЕД ззовні.	Стабільн е охолодження незалежно від швидкості руху локомотива.	Потребу є системи повітропроводів та фільтрів для очищення повітря.
IC 71W (Рідинне/Водян е)	Охолодж увальна рідина циркулює у "сорочці" статора.	Найвища ефективність тепловіддачі, повна герметичність двигуна від бруду.	Складніс ть конструкції, необхідність помпи, радіатора та контролю витоків антифризу.

Теплові обмеження тягових електроприводів

Тягові електродвигуни сучасного залізничного та міського транспорту функціонують у вкрай складних умовах.

Зростання вимог до пропускної здатності магістралей та маси поїздів вимагає постійного збільшення одиничної потужності локомотивів.

Оскільки габарити ТЕД жорстко обмежені міжколісним простором та розмірами візка, збільшення потужності неминуче призводить до зростання щільності теплових втрат в активних матеріалах двигуна (міді обмоток та сталі магнітопроводу).

Перевищення допустимої температури обмоток (яка для сучасних ізоляційних матеріалів класів **Н** та **С** становить **180°C** та **200°C** відповідно) запускає процеси прискореного термоокислювального руйнування діелектриків.

Традиційні системи самовентиляції (коли вентилятор жорстко насаджений на вал ротора) є неефективними у важких пускових режимах або під час подолання зтяжних підйомів, оскільки при низькій швидкості руху та максимальних тягових струмах подача охолоджувального повітря є мінімальною.

Саме тому розробка та точний розрахунок параметрів систем **незалежного примусового охолодження** є критично важливою інженерною задачею.

Математичні основи розрахунку параметрів охолодження

Визначення головних параметрів системи — необхідної витрати теплоносія та напору — базується на сумісному розв'язанні рівнянь теплового балансу та гідроаеродинаміки.

Рівняння теплового балансу для визначення необхідної об'ємної витрати теплоносія має простий вигляд.

Для забезпечення проходження розрахованого об'єму через складну розгалужену мережу вентиляційних каналів двигуна, нагнітач повинен подолати сумарний аеродинамічний (або гідравлічний) опір, який розраховується за критеріями Дарсі-Вейсбаха.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-14	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

Порівняльний аналіз стратегій примусового охолодження

Тип теплоносія	Код за ІЕС 60034-6	Ефективність тепловіддачі	Особливості застосування
Повітря (відкритий цикл)	IC 06	Базова	Найбільш поширена система для магістральних локомотивів. Потребує потужних фільтрів та очищення від снігу/пилу. Створює значний аеродинамічний шум.
Повітря (закритий цикл)	IC 86W	Середня	Повітря циркулює всередині ТЕД по замкненому контуру, віддаючи тепло в зовнішній повітряно-

			водяний теплообмінник. Повна герметизація від бруду.
Рідина (водяні "сорочки")	IC 71W	Дуже висока	Використовується у високошвидкісних поїздах (TGV, ICE) та сучасних трамваях. Вода/антифриз циркулює в каналах статора. Дозволяє зменшити масу ТЕД на 20-30% .

Практичне значення

Оптимізація параметрів системи охолодження має прямий економічний ефект. Завищення об'єму охолоджувального повітря призводить до надмірних витрат електроенергії на привід мотор-вентиляторів (на які може припадати до **8-10%** від загальної споживаної потужності електровоза), тоді як зниження — до перегріву та аварій.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-14	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

Впровадження інверторного керування продуктивністю нагнітачів, яке синхронізує об'єм повітря з фактичною температурою ТЕД у реальному часі, є ключовим напрямком енергозбереження на сучасному транспорті.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-14	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ 1. Визначення параметрів витрати повітря для системи примусового охолодження тягових електродвигунів

1.1. Теоретичні засади для розрахунку параметрів витрати повітря для системи примусового охолодження тягових електродвигунів

Розглянуто аксіальну схему вентиляції, враховуючи, що конструкцією двигуна передбачено виконання аксіальних каналів у сталі якоря.

До завдань досліджень входило визначення:

- залежності температури нагрівання двигуна від витрати повітря, що охолоджує;
- падіння напору у вентиляційній системі та аеродинамічного опору.

Ефективність системи охолодження може бути охарактеризована коефіцієнтом використання машини Ессона [9]

$$C_{\text{э}} = \frac{P}{lD^2n} \cdot 10^6 \quad (1.1)$$

де P - Здається потужність двигуна, кВА;

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-14			
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Розділ 1	Літ.	Лист	Листів
Розробив	Мисник О.І.						18	8
Перевірив	Сінчук І.О.							
Реценз.								
Н. Контр.	Сінчук І.О.							
Затвердив	Пересунько І.І.				КНУ ЕЕМ-23ск			

l - Довжина пакета активної сталі, см;

D - Діаметр внутрішньої розточування статора, см;

n - Швидкість обертання, об / хв.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-14	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2. Практичний розрахунок параметрів витрати повітря для системи примусового охолодження тягових електродвигунів

Коефіцієнт C_3 для більшості машин, що випускаються вітчизняною електротехнічною промисловістю, знаходиться в межах $2 \div 5$ [9].

Для двигуна ДК-809А:

$$P = J_H U_H = 50 \text{ кВА},$$

$$l = 20,4 \text{ см},$$

$$D = 45 \text{ см},$$

$$n = 1320 \text{ об/мин}$$

Підставляючи чисельні значення змінних вираз 2.13 знаходимо

$$C_3 = 0,92 \ll 2$$

Це свідчить про те, що за прийнятої системи охолодження – природної вентиляції, енергетичні можливості двигуна ДК-809 не використовуються повністю.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-14	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Аналогічно це відноситься до двигунів ЕТ-46 та ЕТ-47.

З метою підвищення потужності цих машин за рахунок застосування більш ефективної системи охолодження проведено дослідження щодо вибору параметрів нагнітальної аксіальної схеми вентиляції з розімкненим циклом для перерахованих типів тягових двигунів, рис. 1.1.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-14	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

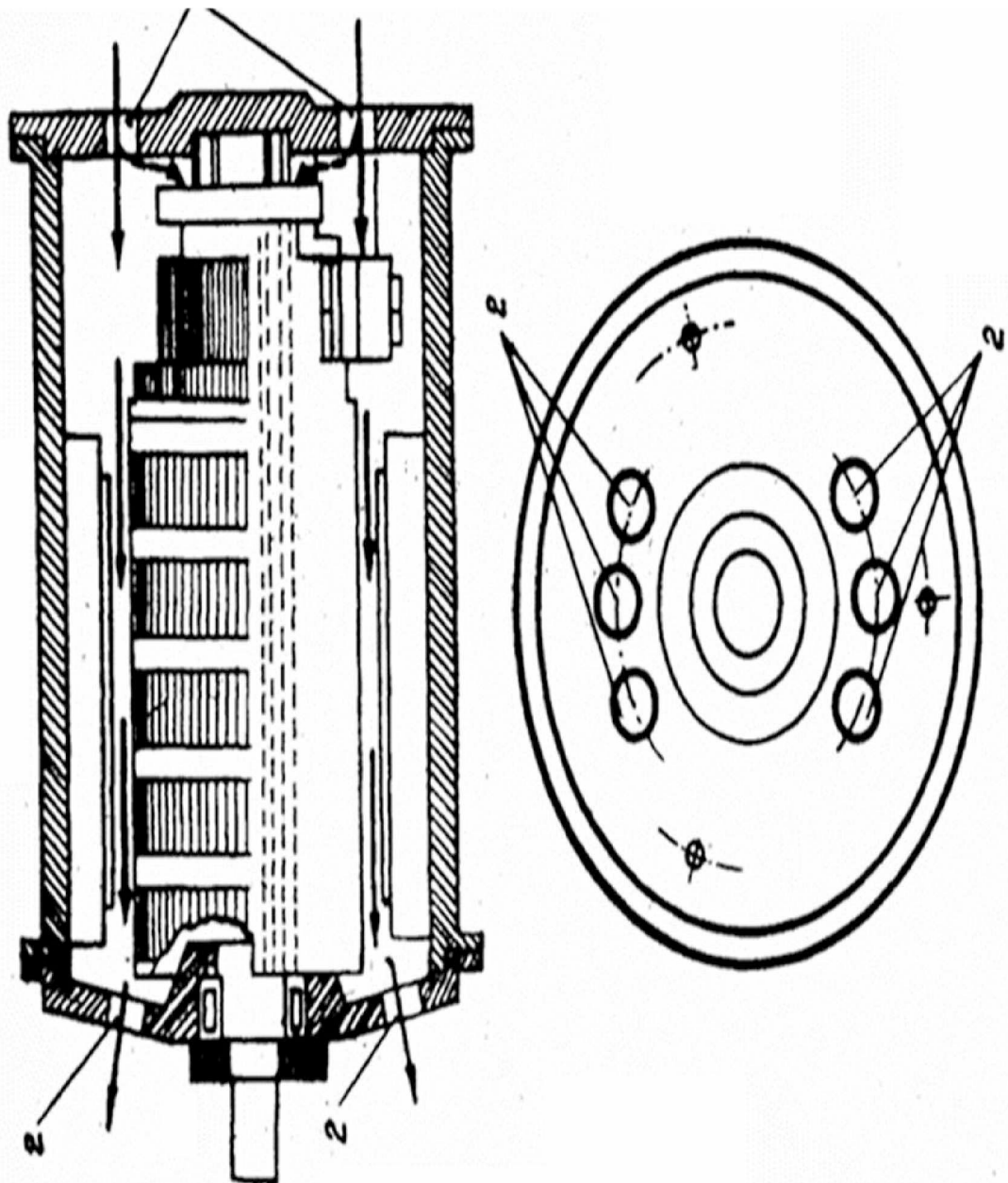


Рис. 1.1. Схема вентиляції тягового двигуна ДК-809А: 1, 2 — вентиляційні отвори

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-14

Арк.

22

Повітря нагнітається в колекторну камеру і розподіляється по паралельних шляхах: міжполюсному простору, повітряному зазору між якорем і полюсами, і по аксіальних каналах якоря.

Витрата охолоджуючого повітря визначається методом перепаду тиску в дросельному пристрої рис. 1.2.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-14	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

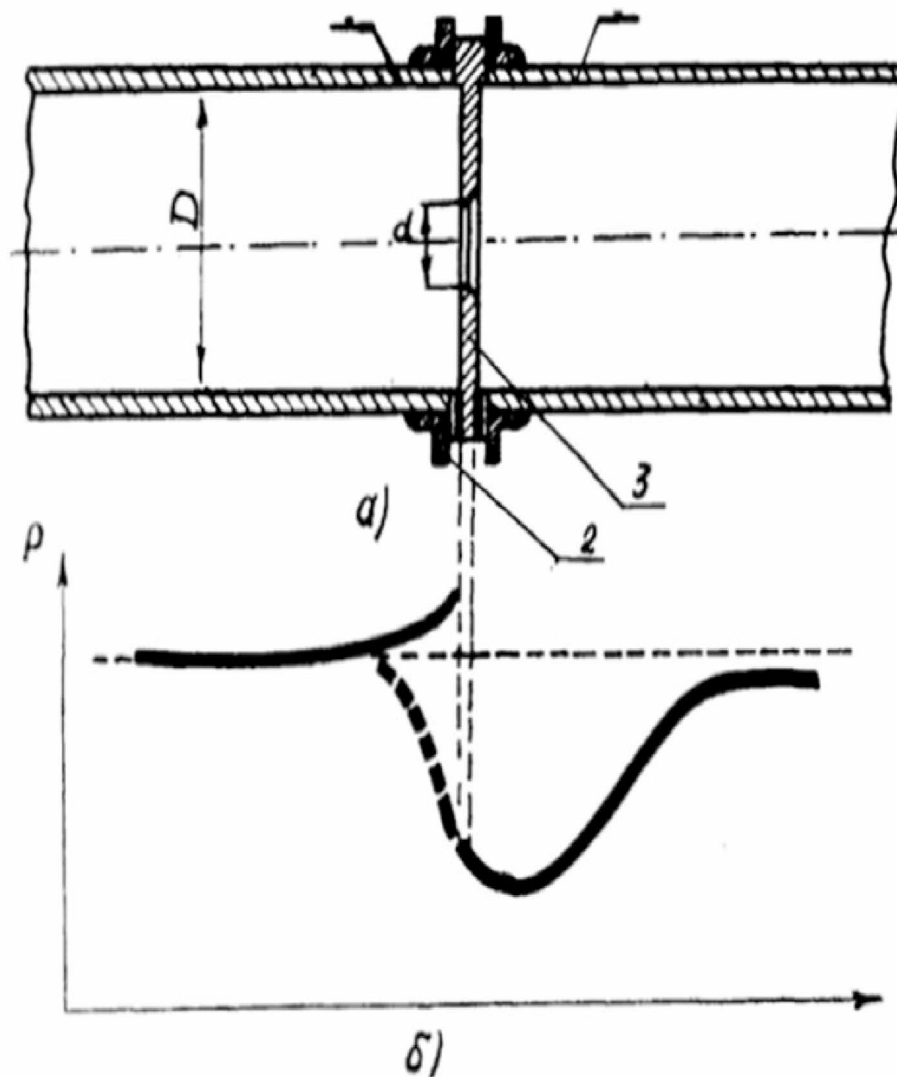


Рис. 1.2. Вимірювання витрати повітря з перепаду тиску: а) дросельний прилад: 1 - вимірювальна труба, 2 - фланець, 3 - діафрагма; б) розподіл тиску повітря в дросельному приладі - рисунок опущений

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-14

Арк.

24

Одночасно з цим вимірювалися статичний і динамічний напори в колекторній камері і у вихідних отворів.

Швидкість повітря вимірювалася пневмометричною трубкою.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-14	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ 2. Дослідження параметрів системи примусового охолодження тягових електродвигунів

2.1. Визначення параметрів охолоджуючого повітря для системи примусового охолодження тягових електродвигунів

В результаті досліджень були встановлені залежності температури обмоток від часу нагріву та витрати охолоджуючого повітря у годинному та тривалому режимах навантаження.

Вибір апаратури для вимірювання витрати охолоджуючого повітря здійснено на підставі попередньо виконаного розрахунку, в результаті якого встановлено межі зміни параметра, що регулюється, — витрати повітря.

Кількість повітря, необхідне для охолодження двигуна, визначено на підставі теплових втрат і допустимого перегріву за формулою.

$$Q_v = 60 \cdot \frac{10^3 \Sigma_{\Delta} P}{\rho C_p \theta_v} \quad (2.1)$$

$$\Sigma_{\Delta} P = J \cdot U(1 - \eta) \cdot 10^{-3}$$

$$\eta = \frac{P_H}{U_H J_H}$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-14						
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дат	Розділ 2			Лім.	Лист	Листів	
Розробив		Мисник О.І.									
Перевірів		Сінчук І.О.							26	7	
Реценз.								КНУ ЕЕМ-23ск			
Н. Контр.		Сінчук І.О.									
Затвердив		Пересунько І.І.									

$$\theta_{\text{в}} = t_{\text{в2}} - t_{\text{в1}}$$

де $\theta_{\text{в}}$ - Витрата повітря, м³ / хв;

$\Sigma_{\Delta}P$ - Сумарні втрати в машині, кВт;

ρ - Щільність повітря, кг/м³;

C_p - Питома теплоємність повітря (при постійному тиску), Дж / (кг · град);

$\theta_{\text{в}}$ - Температура перегріву повітря, ° С;

$t_{\text{в1}}, t_{\text{в2}}$ - Температура відповідно вхідного і вихідного повітря, ° С;

η - Коефіцієнт корисної дії двигуна;

$P_{\text{н}}$ - Номінальна потужність двигуна, 45 кВт;

$U_{\text{н}}, J_{\text{н}}$ - Відповідно номінальні значення напруги та струму - 250 В, 200

А.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-14	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

2.2. Визначення параметрів температури перегріву повітря для системи примусового охолодження тягових електродвигунів

Температура перегріву повітря прийнята рівною 55°З годинного режиму навантаження [6].

Враховуючи, що по довжині пакета сталі двигуна температура змінюється лінійно, середній перегрів повітря дорівнює

$$\theta_{\text{ср}} = \frac{\theta_{\text{в}}}{2} = 27,5^{\circ}\text{С}$$

При цій температурі питома теплоємність та щільність повітря

$$C_p = 1008 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{град}), \quad \rho = 1,165 \text{ кг}/\text{м}^3$$

Підставляючи значення змінних до рівняння 2.1 знаходимо

$$Q = 5,1 \text{ м}^3/\text{мин.}$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-14	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.3. Визначення параметрів витрати повітря для системи примусового охолодження тягових електродвигунів

Для вимірювання витрати охолоджуючого повітря застосовано діафрагму рис. 1.2а, розподіл тиску при використанні якої показано на рис. 1.2б.

Суцільна лінія на цьому рисунку характеризує розподіл тиску вздовж стінки трубопроводу, пунктирна розподіл тиску по осі трубопроводу.

Для вентиляції тягового двигуна використовувалося стиснене повітря, яке подається з магістрального трубопроводу.

Схема примусового охолодження представлена рис. 2.1, де 2 і 3 комплектні прилади: дифманометр-витратомір ДМКК-120М з корекцією за тиском і температурою, та вторинний самописний прилад з феродинамічним компенсатором типу ВФС-М-1200.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-14	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

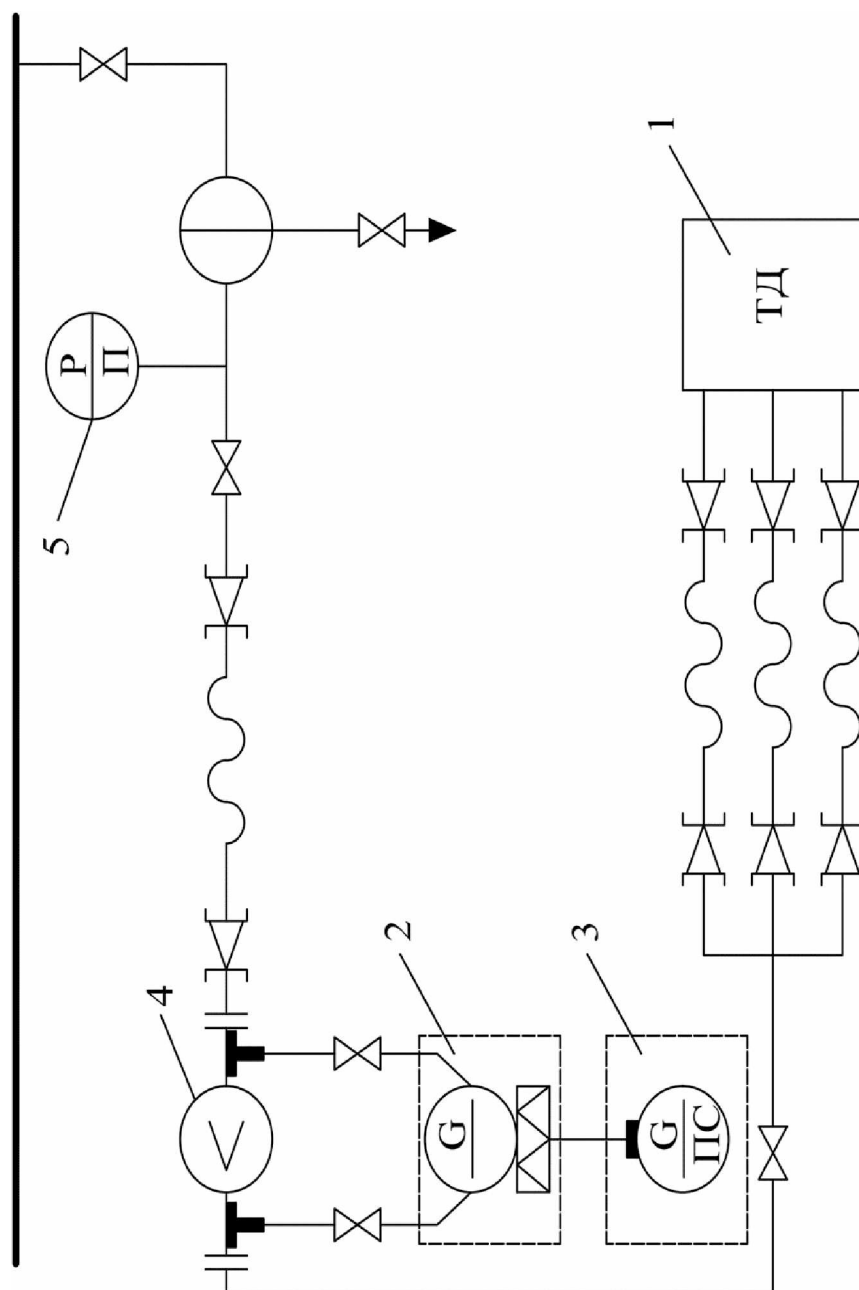


Рис. 2.1. Схема примусового охолодження двигуна стисненим повітрям: 1 - ТД - тяговий двигун; 2 - дифманометр-витратомір; 3 - показує і самописний прилад; 4 - діафрагма; 5 - манометр

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-14

Арк.

30

Межі вимірювання витрати 0 — 320 м³/год клас точності: за показаннями 0,5%, за записом 1%.

Функціональна схема вимірювального приладу (рис. 2.2) відповідає рівнянню безперервно розв'язуваного дифманометром-витратоміром ДМКК

$$Q = A \sqrt{\frac{K_p}{K_T} \cdot \Delta P} \quad (2.2)$$

де A - Коефіцієнт витрати;

K_T , K_p - Коефіцієнти корекції відповідно за тиском і температурою повітря.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-14	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

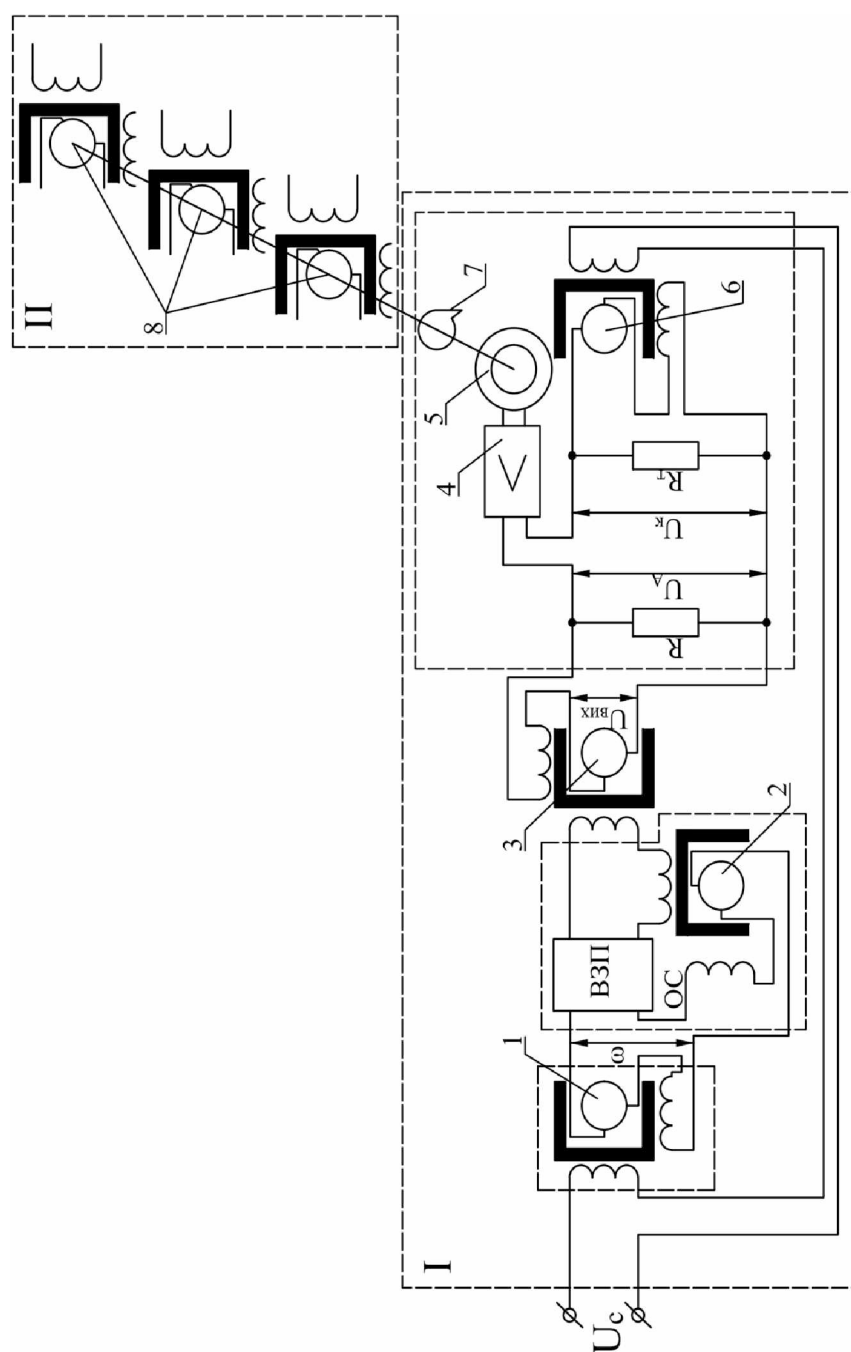


Рис. 2.2. Принципова електрична схема дифманометра-витратоміра ДМКК: 1 - первинний прилад; II - вторинний прилад; 1, 2, 3, 6, 8 - рамки феродинамічних перетворювачів; 4 - електронний підсилювач; 5 - конденсаторний двигун; 7 - лекало

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-14

Арк.

32

Розділ 3. Розробка практичної реалізації системи примусового охолодження тягових електродвигунів

3.1. Практична реалізація елементів розрахунку параметрів системи примусового охолодження тягових електродвигунів

Прилад працює в такий спосіб.

Вимірювальний елемент манометра переміщує рамку феродинамічного перетворювача 1 на кут, пропорційний величині тиску повітря P та Е.Р.С. перетворювача 1, пропорційної K_p . Різниця між E_p і E_{oc} (е.д.с. зворотного зв'язку, що виробляється перетворювачем 2), надходить на вхід блоку БЕП являє собою електронний підсилювач, охоплений негативним зворотним зв'язком.

Повторювач БЕЗ виробляє пропорційний струм вхідний е.р.с.

Цим струмом живляться обмотки збудження перетворювачів 2 і 3.

Рамка перетворювача

3 кінематично пов'язана з вихідною віссю компенсаційного дифманометра і кут повороту її пропорційний перепаду тиску ΔP .

Отже, вихідна е.р.с. рамки перетворювача 3 дорівнює $K_p \cdot \Delta P$.

Рамка перетворювача 3 навантажена на стабільний опір R , з якого знімається напруга U_p .

Рамка компенсуючого перетворювача 6 навантажена на опір приладу R_T . Різниця напруги U_R і U_K подається на вхід електронного підсилювача 4.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-14		
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дат			
Розробив		Мисник О.І.			Розділ 3	Літ.	Лист
Перевірив		Сінчук І.О.					33
Реценз.							5
Н. Контр.		Сінчук І.О.				КНУ ЕЕМ-23ск	
Затвердив		Пересунько І.І.					

Конденсаторний двигун 5, керований електронним підсилювачем, через лекало 7 повертає рамку компенсуючого перетворювача 6 до тих пір, поки різниця напруги U_K і U_R дорівнює нулю.

Таким чином, кут повороту рамки перетворювача 6 пропорційний величині $\frac{K_p}{K_T} \cdot \Delta P$.

Профіль лекала обраний таким, що кут повороту осі пропорційний виразу

$$\sqrt{\frac{K_p}{K_T} \cdot \Delta P}$$

З віссю лекала пов'язана рамка вихідних феродинамічних перетворювачів 8, службовців для дистанційної передачі виміряної та скоригованої витрати.

Рівняння 2.2, яке вирішується дифманометром-витратоміром з корекціями за температурою і тиском, не враховує зміни поправочного коефіцієнта ξ на розширення вимірюваного середовища, а також коефіцієнта K - стисливості повітря.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-14	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для обліку дійсних значень коефіцієнтів ξ та ξ_1 необхідно реєстровану витрату помножити на множник

$$\frac{\xi_1}{\xi} \sqrt{\frac{K}{K_1}} \quad (3.1)$$

де ξ , ξ_1 - Значення поправочного коефіцієнта на розширення вимірюваного середовища, відповідно прийняте при розрахунку діафрагми і дійсна величина його в умовах експерименту;

K , K_1 - Коефіцієнти стисливості газу, відповідно прийнятий при розрахунку діафрагми і значення його в умовах експерименту.

Так як температура і тиск повітря в дросельному приладі істотно не відрізнялися від параметрів прийнятих при розрахунку діафрагми [10],

$$K = K_1, \quad \xi = \xi_1$$

та поправочний множник (3.1) дорівнює одиниці.

Розрахунок діафрагми зроблено за методикою [10].

Відповідно до рекомендацій [10] діаметр вимірювальної труби для нормальної діафрагми має бути не менше 50 мм.

Використовуючи результати розрахунків, була виготовлена діафрагма з діаметром отвору $d = 24,58\text{мм}$ для вимірювальної труби діаметром $D = 102\text{мм}$.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-14	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.2. Розрахунок середньоквадратичної відносної похибки для практичної реалізації визначення параметрів системи примусового охолодження тягових електродвигунів

Середньоквадратична відносна похибка виміру витрати обчислена за формулою [11]

$$\delta_Q = \sqrt{\delta_\alpha^2 + \delta_\xi^2 + \delta_\Gamma^2 + \delta_c^2} \quad (3.2)$$

де δ_α - Похибка визначення коефіцієнта витрати;

δ_ξ - Похибка визначення поправного коефіцієнта на розширення середовища;

δ_Γ - Похибка за витратою манометра-витратоміра, 1,5%;

δ_c - Похибка запису витрати повітря, 1%.

Розрахунки показали, що:

$$\delta_\alpha = 1,37\%; \quad \delta_\xi = 0$$

Підставивши знайдені значення вираз (3.2) знаходимо

$$\delta_Q = 2,26\%$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-14	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

Для досягнення поставленої у роботі мети необхідно було виконати такі завдання:

Провести аналіз джерел тепловиділення у тяговому електродвигуні (ТЕД) та визначити максимальні теплові втрати на різних ділянках тягового циклу.

Проаналізувати структуру та величину енергетичних втрат (магнітних, електричних, механічних та додаткових) у вузлах тягового електродвигуна, які виступають первинними джерелами тепловиділення під час роботи.

Розробити комплексну математичну модель для теплового та аеродинамічного (або гідравлічного) розрахунку системи охолодження з урахуванням конфігурації внутрішніх каналів статора і ротора.

Розробити багатовузлову еквівалентну теплову схему заміщення тягової машини, що дозволяє моделювати просторовий розподіл температурних полів в обмотках статора (якоря), осерді та колекторно-щітковому вузлі в статичних і динамічних режимах.

Дослідити вплив фізичних властивостей теплоносія (повітря, антифриз, трансформаторна олива) на ефективність конвективного теплообміну.

Сформулювати методику визначення мінімально необхідної об'ємної витрати охолоджувального повітря залежно від поточної теплової напруженості та режиму роботи локомотива.

Визначити оптимальну об'ємну витрату теплоносія та необхідний напір вентиляційної або насосної установки для забезпечення стабільного температурного режиму обмоток.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-14	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

Розрахувати аеродинамічний опір внутрішніх вентиляційних каналів двигуна та підвідних повітропроводів для оптимізації напору нагнітальних вентиляторів.

Запропонувати алгоритми адаптивного керування продуктивністю мотор-вентиляторів (або pomp) залежно від фактичного теплового стану ТЕД для зменшення витрат енергії на власні потреби локомотива.

Обґрунтувати технічні рішення щодо інтеграції систем частотно-регульованого приводу вентиляторів для реалізації адаптивного керування інтенсивністю охолодження.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-14	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Список використаних джерел

1. Pyrhonen, J., Jokinen, T., & Hrabovcova, V. (2013). Design of Rotating Electrical Machines (2nd ed.). John Wiley & Sons.
2. Steimel, A. (2008). Electric Traction - Motive Power and Energy Supply: Basics and Practical Experience. Oldenbourg Industrieverlag.
3. Staton, D. A., & Cavagnino, A. (2008). Convection heat transfer and flow calculations suitable for electric machines thermal models. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 55(10), 3509-3516.
4. Boglietti, A., Cavagnino, A., Staton, D., Shanel, M., Mueller, M., & Mejuto, C. (2009). Evolution and modern approaches for thermal analysis of electrical machines. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 56(3), 871-882.
5. Mellor, P. H., Roberts, D., & Turner, D. R. (1991). Lumped parameter thermal model for electrical machines of TEFC design. IEE Proceedings B (Electric Power Applications), 138(5), 205-218.
6. Hendershot, J. R., & Miller, T. J. E. (2010). Design of Brushless Permanent-Magnet Motors. Motor Design Books.
7. Sciascera, C., Giangrande, P., Papini, L., Gerada, C., & Galea, M. (2017). Analytical thermal model for fast stator winding temperature prediction. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 64(8), 6116-6126.
8. Polikarpova, M., Ponomarev, P., Lindh, P., & Pyrhönen, J. (2015). Hybrid cooling of a permanent-magnet traction motor. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 62(12), 7382-7390.
9. Nerg, J., Rilla, M., & Pyrhonen, J. (2008). Thermal analysis of radial-flux electrical machines with a high power density. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 55(10), 3543-3554.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-14	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

10. Munteanu, G., Binder, A., & Funieru, B. (2015). Water cooling of traction motors in high-speed trains. Proceedings of the 2015 International Conference on Electrical Drives and Power Electronics (EDPE), 98-103.
11. Nategh, S., Huang, Z., Krings, A., Wallmark, O., & Leksell, M. (2013). Evaluation of stator and rotor lamination materials for thermal management of a PMSRM. IEEE Transactions on Industry Applications, 49(5), 2054-2061.
12. Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2007). Fundamentals of Heat and Mass Transfer (6th ed.). John Wiley & Sons.
13. Bollen, M. H. J. (2000). Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions. IEEE Press. (Контекст впливу живлення на додаткові теплові втрати).
14. IEC 60034-6:1991. Rotating electrical machines - Part 6: Methods of cooling (IC Code). International Electrotechnical Commission.
15. IEC 60349-2:2010. Electric traction - Rotating electrical machines for rail and road vehicles - Part 2: Electronic converter-fed alternating current motors. International Electrotechnical Commission.
16. Candelo-Zuluaga, C., Riba, J. R., Lopez-Garcia, C., & Garcia, A. (2019). State of the art of forced-cooling techniques for high-power-density electric machines. Energies, 12(14), 2697.
17. Trigo, E., Poveda, J., & Romeral, L. (2020). Liquid cooling systems for electrical machines: A comprehensive review. IEEE Access, 8, 201377-201398.
18. Idoughi, L., Guillet, R., Kaczmarek, R., & Gabsi, M. (2011). Thermal modeling of a switched reluctance machine: Application to a traction vehicle. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 60(2), 441-450.

19. Zhang, Y., & Li, Y. (2018). Multi-objective optimization of ventilation system for traction motor based on CFD and surrogate model. Applied Thermal Engineering, 138, 222-232.

20. Simpson, N., Wrobel, R., & Mellor, P. H. (2013). Estimation of equivalent thermal parameters of impregnated electrical windings. IEEE Transactions on Industry Applications, 49(6), 2505-2515.

21. Pyrhönen, J., Jokinen, T., & Hrabovcová, V. (2014). Design of Rotating Electrical Machines (2nd ed.). Wiley.

22. Boglietti, A., Cavagnino, A., Staton, D., Shanel, M., Mueller, M., & Mejuto, C. (2009). Evolution and modern approaches for thermal analysis of electrical machines. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 56(3), 871-882.

23. Steimel, A. (2008). Electric Traction - Motive Power and Energy Supply: Basics and Practical Experience. Oldenbourg Industrierlag.

24. Staton, D. A., & Cavagnino, A. (2008). Convective heat transfer and flow distribution in cooling channels of electrical machines. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 55(10), 3491-3499.

25. Standard IEC 60349-1:2010. Electric traction - Rotating electrical machines for rail and road vehicles - Part 1: Machines other than electronic converter-fed alternating current machines.

26. Standard IEC 60349-2:2010. Electric traction - Rotating electrical machines for rail and road vehicles - Part 2: Electronic converter-fed alternating current machines.

27. Micallef, C., Pickering, S. J., Simmons, K. A., & Bradley, K. J. (2008). Improved cooling of traction motor windings. IET Electric Power Applications, 2(1), 29-38.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-14	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

28. Mellor, P. H., Roberts, D., & Turner, D. R. (1991). Lumped parameter thermal model for electrical machines of TEFC design. IEE Proceedings B (Electric Power Applications), 138(5), 205-218.
29. Chin, Y. K., & Staton, D. A. (2005). Thermal analysis of traction motors. Proceedings of the International Conference on Electrical Machines and Systems, 1, 484-489.
30. Kim, S. C., & Kim, S. H. (2012). Thermal analysis of a forced-air-cooled traction motor for electric vehicles. Journal of Mechanical Science and Technology, 26(1), 201-207.
31. Wu, J., & Zhang, H. (2017). Optimization of forced cooling system for high-power traction motors based on CFD analysis. IEEE Transactions on Energy Conversion, 32(4), 1450-1459.
32. Nategh, S., Wallmark, O., & Leksell, M. (2012). Thermal analysis of a permanent-magnet traction motor with forced cooling. IEEE Transactions on Energy Conversion, 27(2), 226-235.
33. Walker, J. (2004). Principles of Electric Traction. Railway Engineering Press.
34. Yamazaki, K., & Seto, T. (2014). Thermal analysis of traction motors running under cyclic driving modes. IEEE Transactions on Magnetics, 50(11), 1-4.
35. Dhirani, H., & Stone, G. C. (2011). Effect of forced ventilation parameters on insulation life of traction equipment. IEEE Electrical Insulation Magazine, 27(3), 18-25.