

УДК 621.3.017:621.331

**ПРОБЛЕМИ І ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ
МОНІТОРИНГУ ТЕПЛОВОГО СТАНУ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ ЛОКОМОТИВІВ**

Канд. техн. наук Д. Л. Сушко

**PROBLEMS AND PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF MODERN METHODS
AND MEANS OF MONITORING THE THERMAL STATE OF LOCOMOTIVE
TRACTION MOTORS**

PhD (Tech.) D. Sushko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.214.2025.351917>



Анотація. У статті розглянуто актуальні питання забезпечення надійної роботи тягових електродвигунів локомотивів в умовах підвищених теплових навантажень. Зазначено, що саме порушення теплового режиму є одним із головних чинників деградації ізоляції обмоток і зниження ресурсу двигуна. Стаття узагальнює існуючі наукові розробки та пропонує напрями подальших досліджень у сфері моніторингу теплового стану тягових двигунів локомотивів з урахуванням конструктивних особливостей, експлуатаційних умов і цифровізації систем управління.

Ключові слова: тяговий електродвигун, теплові втрати, тепловий моніторинг, температурна модель.

Abstract. This article examines the current challenges and future directions in monitoring the thermal state of locomotive traction electric motors, particularly in the context of increasing power

demands and operational reliability requirements. Thermal overload is identified as a key factor contributing to insulation degradation and motor failure. A classification of the main sources of heat loss in DC traction motors is provided, along with an analysis of their impact on cooling efficiency and thermal stability. The paper presents a comparative overview of modern monitoring approaches, including direct methods (temperature sensors) and indirect methods (temperature estimation via electrical parameters). The specific challenges of applying these methods to DC traction motors are highlighted, especially the technical limitations of installing sensors in rotating components. The study emphasizes the role of thermal modeling, such as equivalent thermal circuit models and the finite element method, which allow detailed visualization of temperature distribution within motor components and support the design of effective thermal control systems. Special attention is given to the use of artificial neural networks and Digital Twin technologies for predictive monitoring. These intelligent systems, trained on operational or laboratory data, can accurately estimate internal temperatures in inaccessible zones and enable early fault detection. The integration of ANN-based models with real-time data from sensors and simulation results forms a foundation for adaptive condition-based maintenance. This work generalizes the latest research trends and outlines future prospects for developing hybrid monitoring systems that combine classical models, sensor technologies, and machine learning algorithms, considering the structural and operational features of traction motors used in domestic locomotive fleets.

Keywords: traction motor; heat losses, thermal monitoring, temperature model.

Вступ. У сучасних умовах експлуатації залізничного транспорту суттєво зростають вимоги щодо надійності та енергоефективності тягових електродвигунів (ТЕД), які є основними елементами електроприводів локомотивів. Тяговий рухомий склад функціонує в умовах інтенсивних механічних і електричних навантажень, значних температурних коливань і перевантажень, що підвищує ризик виходу з ладу вузлів електрообладнання.

За статистичними даними, до 35 % усіх відмов електроустаткування локомотивів припадає саме на тягові двигуни. Найчастішими причинами несправностей ТЕД є пошкодження ізоляції (30 %), зниження її електричного опору (5 %), виникнення кругового вогню по колектору (15 %) і зношення якірних підшипників (15 %) [1]. Тобто надійність роботи ТЕД значною мірою визначена станом ізоляційної конструкції обмоток, яка в процесі експлуатації погіршується внаслідок дії термічних, електричних і механічних навантажень.

Одним із головних чинників, що обмежують ресурс ТЕД, є порушення

теплого режиму. Особливо вразливою залишається ізоляційна конструкція ТЕД, яка за умов перегріву швидко деградує. Надмірне підвищення температури спричиняє інтенсивне старіння ізоляційних матеріалів, зниження їхньої електричної міцності, що в підсумку призводить до електричного пробоя ізоляційної конструкції ТЕД.

За таких обставин актуальним є впровадження систем постійного моніторингу теплового стану ТЕД, які допомагають виявляти аномальні режими роботи, оперативно реагувати на відхилення та запобігати аварійним ситуаціям.

Отже, розроблення і удосконалення сучасних методів і технічних засобів моніторингу теплового стану тягових електродвигунів є важливим науково-практичним завданням, що має важливе значення для підвищення надійності, ефективності та безпеки експлуатації локомотивів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання моніторингу теплового стану тягових електродвигунів (ТЕД) уже тривалий час є предметом наукових досліджень у контексті

підвищення надійності та ефективності електротяги на залізничному транспорті. Серед широкого спектру підходів виділяють теплове моделювання, впровадження систем діагностики, сенсорні технології та інтелектуальні методи прогнозування стану електричних машин.

Серед вітчизняних публікацій потрібно зазначити дослідження [1], у якому обґрунтовано необхідність удосконалення методів контролю теплового стану ТЕД електровозів. У публікації проаналізовано переваги та недоліки як прямих, так і непрямих методів вимірювання температури обмоток. Автори підкреслюють доцільність побудови розрахункових моделей теплового балансу та використання даних струму, напруги і часу навантаження для оцінювання температурних характеристик у режимі реального часу.

Слід зазначити, що значна частка парку рухомого складу залізниць України обладнана тяговими електродвигунами постійного струму. Це обумовлює потребу у створенні та впровадженні таких систем моніторингу, які враховують особливості конструкції, теплоутворення та охолодження двигунів саме цього типу. Підходи, застосовані для асинхронних ТЕД, не завжди можуть бути ефективно перенесені на двигуни постійного струму без відповідної адаптації.

Серед зарубіжних досліджень заслуговує на увагу робота [2], у якій запропоновано двонаправлену електротермічну модель тягових двигунів, що враховує вплив електричного навантаження на тепловий стан, і навпаки. Такий підхід дає змогу підвищити точність оцінювання температури у внутрішніх вузлах, де неможливо встановити датчики, і реалізувати онлайн-прогнозування перегріву.

У дослідженні [3] подано фреймворк онлайн-моніторингу для високошвидкісних електропоїздів, що включає бездротові датчики температури, модулі обробки сигналів, хмарне сховище даних і засоби

візуалізації теплового навантаження в реальному часі. Така система дає змогу не лише діагностувати перегрів, а й управляти навантаженням для уникнення пікових режимів.

Варто також звернути увагу на роботу [4], присвячену застосуванню машинного навчання та нейронних мереж у задачах класифікації та прогнозування відмов електродвигунів. У цих дослідженнях розглянуто можливість комбінованої обробки температурних, вібраційних і електричних сигналів із метою створення універсальної системи діагностики технічного стану.

Отже, аналіз останніх публікацій свідчить про наявність значного наукового та прикладного зацікавлення щодо вдосконалення методів моніторингу теплового стану ТЕД. Проте більшість існуючих рішень або обмежені лабораторними умовами, або не враховують особливості експлуатації вітчизняного парку, зокрема широкого застосування двигунів постійного струму. Це відкриває перспективу для подальших досліджень у напрямі побудови адаптивних, точних і технологічно сумісних систем моніторингу.

Визначення мети та завдання дослідження: узагальнення сучасних підходів щодо моніторингу теплового стану тягових електродвигунів, виявлення основних проблем, що обмежують ефективність існуючих систем діагностики, а також визначення перспектив подальшого розвитку методів теплового контролю з урахуванням особливостей експлуатації тягового рухомого складу в Україні.

Основна частина дослідження. Як уже було зазначено, тягові електродвигуни локомотивів працюють в умовах підвищеного теплового навантаження. Основними зовнішніми чинниками є механічні навантаження, температурні коливання, вібрації та пил, що створюють несприятливі умови для тепловідведення. Однак головним джерелом нагріву є внутрішні втрати електричної енергії, що

виникають безпосередньо під час електромеханічного перетворення енергії.

Теплове навантаження у ТЕД формується саме внаслідок цих внутрішніх втрат, які мають суттєвий вплив як на температурний режим, так і довговічність ізоляції та загальну енергоефективність локомотива. Аналіз структури втрат є важливою передумовою для розроблення ефективних систем моніторингу та прогнозування технічного стану двигунів.

З урахуванням особливостей конструкції та режимів роботи основні типи втрат у тягових двигунах постійного струму (рис. 1) класифікують так [5]:

- втрати в обмотках (джоулеві втрати) – виникають внаслідок протікання струму через опір обмоток збудження та якоря і є основним джерелом нагріву обмоток та ізоляції;
- втрати в сталі (гістерезисні та вихрові струми) – зумовлені змінами

магнітного поля в осерді якоря під час обертання. Їхня величина залежить від частоти, магнітної індукції та властивостей матеріалу;

- механічні втрати – включають втрати на тертя в підшипниках і опір повітря під час вентиляції, знижують загальний ККД двигуна;

- щітково-колекторні втрати – пов'язані з контактним опором між щітками і ламелями колектора, посилюються внаслідок зносу, іскріння або поганого притискання щіток;

- додаткові (перехідні) втрати – виникають під час пуску, реверсу, зміни навантаження, їх важко точно розрахувати, але вони істотно впливають на тепловий стан у динаміці.

Розподіл втрат електричної енергії в ТЕД постійного струму локомотивів зображено на рис. 1.

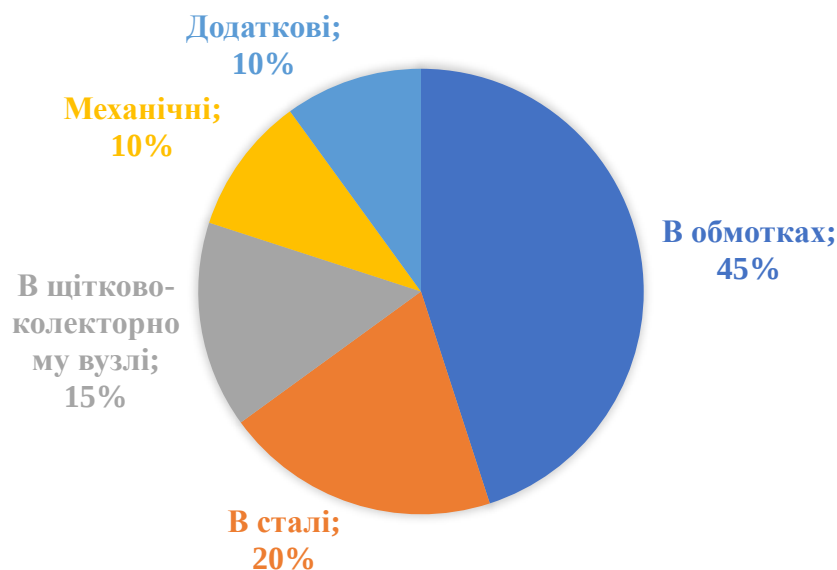


Рис. 1. Розподіл втрат електричної енергії в ТЕД постійного струму локомотивів

Особливості теплових втрат у ТЕД в умовах експлуатації мають важливе значення для побудови ефективних систем моніторингу:

- нерівномірний характер навантаження тягових двигунів, зокрема з рухом на ухилах або в умовах частих прискорень і гальмувань, призводить до зростання джоулевих і вихрових втрат;

- часті переходи між режимами (наприклад під час маневрової роботи або зміни напрямку руху) сприяють локальному перегріву щітково-колекторного вузла, що ускладнює теплову стабільність;

- неповне або непостійне навантаження викликає неефективне використання енергії, оскільки частина втрат не супроводжена корисною роботою, але створює теплове навантаження на двигун.

У цьому контексті аналіз втрат має важливе практичне значення для моніторингу теплового стану, оскільки:

- дає змогу точно моделювати тепловий баланс ТЕД, що необхідно для прогнозування граничних температур;
- сприяє оптимізації алгоритмів охолодження та адаптації режимів роботи для конкретних умов навантаження;
- стає основою для непрямих методів моніторингу температури, зокрема через розрахунок втрат за параметрами струму, напруги та часу навантаження.

Сучасні підходи щодо моніторингу теплового стану тягових електродвигунів поділяють на прямі, непрямі. Прямі методи передбачають безпосереднє вимірювання температури у вузлах електродвигуна за допомогою встановлених датчиків або зовнішніх засобів теплового контролю. Ці методи дають точну інформацію про локальні температурні значення та допомагають оперативно реагувати на критичні теплові навантаження.

До основних засобів прямого контролю температури належать термопари, термістори, RTD-датчики, а також інфрачервона термографія. Основним недоліком цих засобів є складність їх установлення у внутрішні вузли тягових електродвигунів.

Так, на електровозах серії ДСЗ, оснащених тяговими асинхронними двигунами типу СТА-1200У1, контролюють температуру обмоток статора за допомогою датчиків Pt100. Ці датчики належать до типу RTD (Resistance Temperature Detector) і

функціонують на основі зміни електричного опору платинового елемента залежно від температури (100 Ом за температури 0 °С).

Датчики встановлені безпосередньо в пази обмоток статора та з'єднані із загальною системою теплового захисту локомотива, яка виконує такі функції:

- реєстрація температури в режимі реального часу;
- подавання сигналу тривоги у випадку перегріву;
- автоматичне відключення живлення в аварійному режимі.

Інфрачервона термографія є безконтактною технологією вимірювання температури, що дає змогу оперативно візуалізувати розподіл теплових полів на поверхні об'єкта в режимі реального часу. У застосуванні для тягових електродвигунів інфрачервону термографію використовують насамперед для періодичного контролю температури зовнішніх елементів корпусу двигуна.

Це обмежує можливості методу щодо повноцінного контролю внутрішніх температурних зон, де, власне, і виникає найбільше теплових навантажень.

Цю методику можна застосовувати як допоміжний засіб контролю температури для проведення стендових випробувань ТЕД.

На вітчизняних електровозах серії ДЕ1 моніторинг теплового стану тягових електродвигунів постійного струму реалізовано за допомогою датчиків температури типу ТСП-0287. Ці датчики забезпечують вимірювання температури повітря на вході та виході з охолоджувального каналу ТЕД, а також температури навколишнього середовища.

Отже, система не контролює безпосередньо температуру внутрішніх вузлів двигуна, проте дає змогу опосередковано оцінювати ефективність тепловідведення та виявляти перегрів у динамічних режимах роботи.

Застосування вбудованих температурних датчиків у конструкції

тягових електродвигунів постійного струму суттєво ускладнене через конструктивні особливості цих машин. Зокрема, обмотка якоря є рухомим елементом, що обертається, тому вмонтувати датчик безпосередньо в її пази практично неможливо. Це пов'язано з відсутністю технологічно прийнятних способів надійного зчитування температурного сигналу з обертової частини без застосування складних телеметричних або контактних рішень.

Крім того, навіть у статичних частинах конструкції встановлення температурних датчиків потребує:

- високої точності інтеграції в зону максимального теплового навантаження;
- дотримання електричної ізоляції та надійності з'єднань;
- стійкості до вібрацій і динамічних навантажень;
- технологічної сумісності зі збіркою двигуна.

Через це пряме вимірювання температури в обмотках якоря ТЕД постійного струму в умовах експлуатації є технічно складним і обмеженим, що обумовлює необхідність застосування непрямих або комбінованих методів моніторингу, що базовані на опосередкованому оцінюванні температурного стану за допомогою електричних параметрів або математичних теплових моделей.

Непрямі методи контролю температури не передбачають встановлення датчиків безпосередньо в зонах нагріву, а використовують залежності між температурою і такими параметрами, як струм, напруга або тривалість навантаження. Це дає змогу оцінювати температуру навіть у важкодоступних або рухомих зонах двигуна. Основою таких підходів є побудова моделей теплового балансу, які дають змогу відстежувати динаміку нагріву в реальному часі.

Серед непрямих методів контролю температури, що застосовують в умовах експлуатації тягових електродвигунів, найбільш поширеним є метод оцінювання

температури за зміною електричного опору обмоток [5, 6]. Знаючи початкову температуру та фіксуючи зміни опору, можна обчислити значення перегріву обмотки за допомогою температурного коефіцієнта опору:

$$\Delta\Theta = \left(\frac{R_2 - R_1}{R_1}\right) \cdot (k + \Theta_1) + \Theta_1 - \Theta_\alpha, \quad (1)$$

де Θ_1 – температура, °C, холодної обмотки в першому моменті температурних вимірювань;

Θ_α – температура, °C, обмотки наприкінці температурних вимірювань;

R_1 – опір обмотки за температури Θ_1 (холодної);

R_2 – опір обмотки наприкінці температурних вимірювань;

k – величина, обернена до температурного коефіцієнта опору за температури 0 °C матеріалу провідника, для міді $k = 235$, алюмінію $k = 225$.

Такий метод широко використовується завдяки простоті реалізації, можливості інтеграції з існуючими системами контролю та відсутності потреби в безпосередньому встановленні датчиків у важкодоступних зонах. Однак його недоліком є те, що він дає усереднене значення температури всієї обмотки, не враховуючи локальних перегрівів, які можуть виникати в пазах або лобових частинах. Це знижує точність діагностики потенційно небезпечних температурних зон, особливо за нерівномірного теплового навантаження.

Для більш повного і гнучкого аналізу теплового стану ТЕД застосовують методи моделювання теплового балансу, які дають змогу враховувати різні джерела втрат, умови охолодження, інерційність теплових процесів і параметри навантаження. Такі моделі дають змогу не лише оцінювати температуру в недоступних зонах, а й реалізовувати прогностичний моніторинг і алгоритми попередження перегріву двигуна.

Для більш повного та гнучкого аналізу теплового стану тягових електродвигунів (ТЕД) застосовують методи моделювання теплового балансу. Вони дають змогу враховувати численні чинники: джерела теплових втрат, умови охолодження, інерційність теплових процесів, а також режими навантаження. Використання таких моделей дає змогу оцінювати температурні поля навіть у недоступних для встановлення датчиків зонах, реалізовувати прогнозний моніторинг, а також створювати алгоритми превентивного керування перегрівом двигуна.

Основою математичного опису є рівняння теплового балансу, яке відображає

зміну температури тіла в часі як результат надходження та відведення теплової енергії:

$$C \cdot \frac{dT}{dt} = P_{\text{вх}} - P_{\text{втр}} , \quad (2)$$

де C – теплова ємність об'єкта;

dT/dt – швидкість зміни температури;

$P_{\text{вх}}$ – теплова потужність, що надходить;

$P_{\text{втр}}$ – потужність тепловідведення.

На основі цього підходу можна формувати різні типи теплових моделей – від простих однозонних до складних багатозонних схем, зокрема таких, що описують теплові зв'язки всередині якоря. Одним із прикладів є еквівалентна теплова схема заміщення, зображена на рис. 2 і 3.

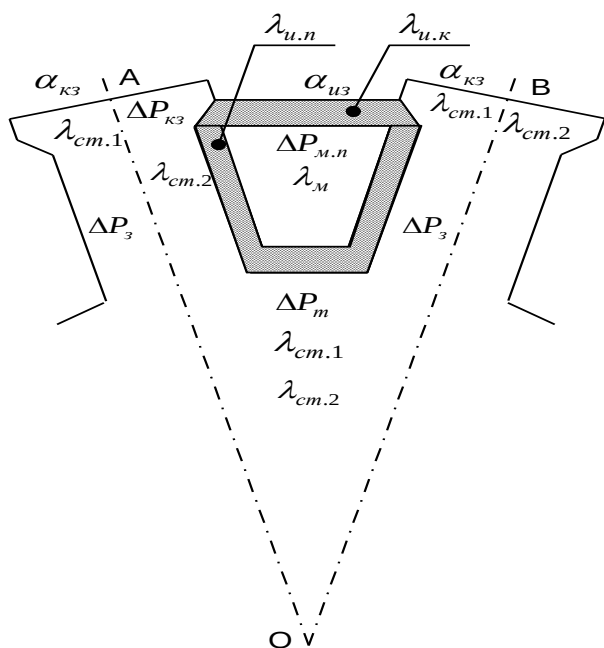


Рис. 2. Переріз якоря

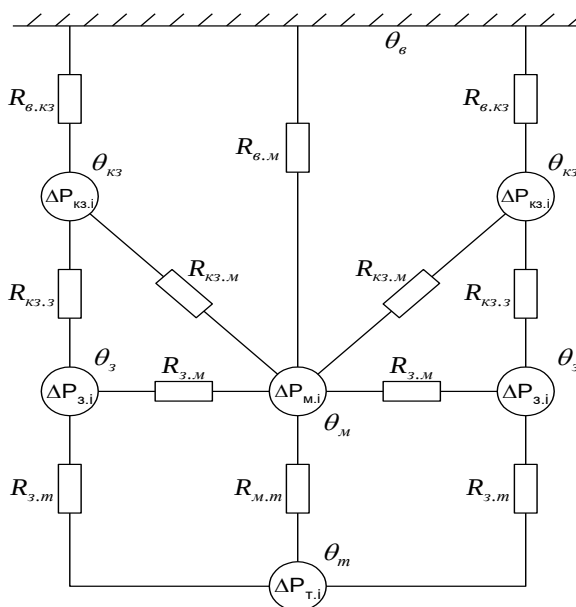


Рис. 3. Двовірна теплова схема перерізу якоря

За особливостями теплових процесів у ТЕД можна розглядати теплові процеси з урахуванням таких джерел тепла [7]:

- втрати в пазовій міді обмотки якоря $\Delta P_{\text{м.п}}$;
- втрати в лобовій міді обмотки якоря $\Delta P_{\text{м.л}}$;

- втрати в сталі коронок зубців $\Delta P_{\text{κ.з}}$;
- втрати в сталі зубців $\Delta P_{\text{з}}$;
- втрати в тілі пакета стали якоря $\Delta P_{\text{т}}$;
- втрати на поверхні колектора $\Delta P_{\text{κ}}$;

теплопровідність:

– теплопровідність пакета сталі уздовж листів $\lambda_{ст.1}$;

– теплопровідність пакета сталі поперек листів $\lambda_{ст.2}$;

– теплопровідність міді λ_m ;

– теплопровідність пазового клина $\lambda_{i,k}$;

– теплопровідність пазової ізоляції $\lambda_{i,p}$;

тепловіддачі:

– тепловіддача від коронок зубців до повітря $\alpha_{к.з}$;

– тепловіддача від пазового клина до повітря α_z .

Аналіз теплової схеми виконано матричним методом, при цьому розв'язок системи рівнянь (матриця температур) має вигляд [8]

$$\Theta = -\Lambda^{-1}P, \quad (3)$$

де Λ – матриця теплових провідностей;

P – матриця потужності втрат і тепловіддачі до повітря в зазорі.

Із метою підвищення точності опосередкованого оцінювання температури в активних зонах ТЕД застосовують методи скінченних елементів (МСЕ), які допомагають детально розрахувати температурні поля в обмотках, сталевому магнітопроводі та елементах охолодження. Модель побудована на основі теплопровідності, теплоємності та джерел внутрішніх теплових втрат з урахуванням реальних граничних умов. Отримані розподіли температур є основою для ідентифікації критичних зон перегріву та оптимізації систем охолодження.

Основними етапами для побудови МСЕ-моделі є:

– геометричне моделювання елементів конструкції тягових двигунів – створення 2D- або 3D-моделі з урахуванням реальної конструкції;

– задавання теплових властивостей матеріалів – теплопровідність (λ), теплоємність (C), густина (ρ);

– визначення джерел тепла – втрати в обмотках, втрати в сталі, щітково-колекторні втрати;

– задавання граничних умов – температура охолоджувача, коефіцієнти тепловіддачі, симетрія;

– сітка скінченних елементів – дискретизація моделі для точного розрахунку;

– розв'язання рівняння теплопровідності;

– аналіз результатів – візуалізація температурних полів, виявлення перегрітих зон.

Переваги МСЕ:

– можливість моделювання складної геометрії;

– висока точність із правильним налаштуванням;

– урахування теплової інерції та реальних умов охолодження;

– поєднання з електромагнітними чи механічними аналізами.

Як приклад застосування методу скінченних елементів для теплового аналізу в роботах зарубіжних авторів можна навести дослідження, подане в публікації [9]. У цій роботі було змодельовано розподіл температурного поля в асинхронному електродвигуні за нормального режиму та за наявності міжвиткового замикання в обмотці статора.

На рис. 4 показано результати тривимірної аналізу температурного поля, отриманого за допомогою ANSYS, з урахуванням реальної конструкції двигуна, типу охолодження і теплових граничних умов [9]. Симуляція дала змогу виявити локальні зони перегріву, що відповідають місцям потенційних пошкоджень.

Із розвитком цифрових технологій з'являються інноваційні підходи щодо теплового моніторингу. Серед них концепція цифрових двійників (Digital Twin), що передбачає створення віртуальної копії тягового електродвигуна з постійним оновленням даних у реальному часі. Такі

моделі дають змогу не лише відслідковувати поточний стан, а і прогнозувати майбутні теплові перевантаження. На додачу застосування штучних нейронних мереж забезпечує можливість виявлення аномалій і прогнозування перегріву на основі накопичених і поточних експлуатаційних

даних, що суттєво підвищує ефективність технічного обслуговування.

Також активно розвиваються інтелектуальні методи, що використовують штучні нейронні мережі, машинне навчання та цифрові твіни для оцінювання температури внутрішніх вузлів двигуна.

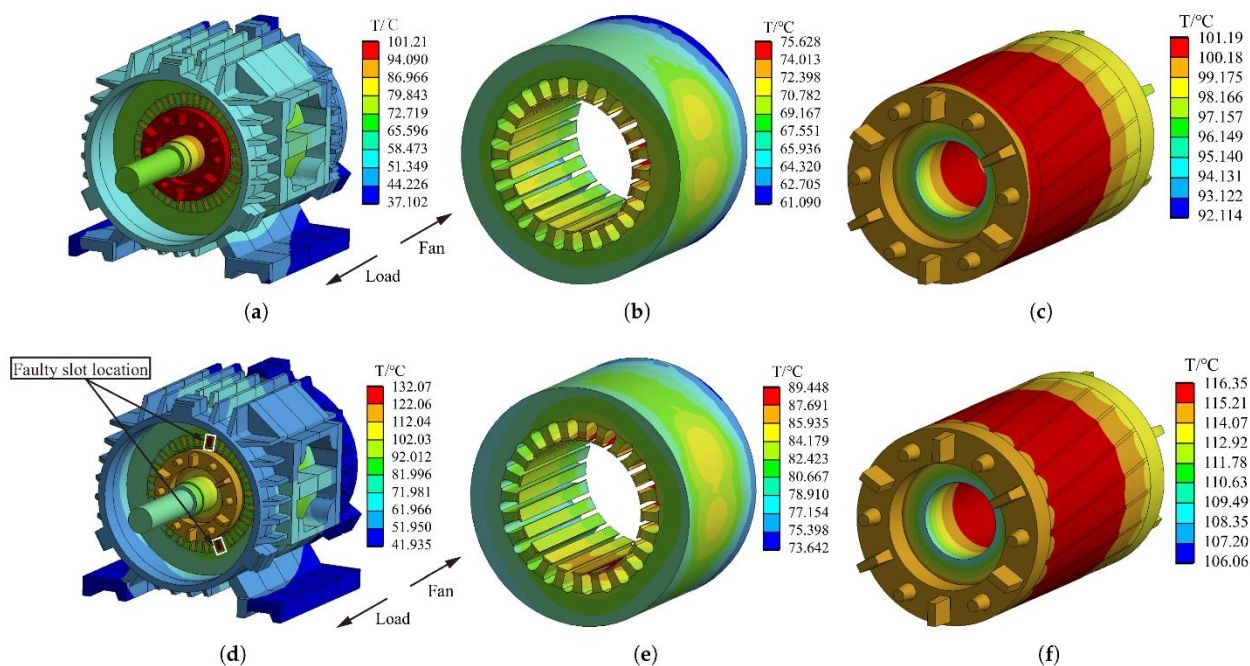


Рис. 4. Результати моделювання теплового поля:
а-с – нормальний режим роботи;
d-f – режим із міжвитковим замиканням

У дослідженні [10] було продемонстровано доцільність використання нейромережевих алгоритмів для прогнозування температури обмоток і підшипників асинхронного двигуна. Застосування глибоких нейронних мереж дало змогу досягти високої точності навіть в умовах перехідних режимів. Моделі були навчені на експериментальних даних з урахуванням струму, напруги, частоти обертання та інших параметрів.

Штучні нейронні мережі є не лише інструментом для оцінювання або прогнозування температурних режимів у тягових електродвигунах, але й важливим елементом у формуванні цифрових

двійників (Digital Twin). Завдяки здатності обробляти великі масиви експлуатаційних даних і навчатися на історичних профілях навантаження, ШНМ інтегровані в архітектуру цифрових моделей двигунів, допомагаючи створювати адаптивні системи моніторингу в реальному часі.

У низці сучасних робіт [11] зазначено, що нейромережеві алгоритми, поєднані з фізичними моделями, є основою концепції Digital Twin для тягових машин. Зокрема, у роботі [12] подано цифровий двійник електропривода електровоза з можливістю виявлення несправностей і моделювання теплових режимів у динаміці, а в роботі [13] реалізовано ієрархічний підхід щодо

побудови Digital Twin електродвигуна, у якому ШНМ відповідають за оцінювання складних параметрів, таких як внутрішня температура або втрати, на основі сигналів із мінімальною кількістю датчиків.

Отже, ШНМ є перспективним інструментом для створення систем інтелектуального теплового моніторингу тягових електродвигунів, які можуть не лише відслідковувати поточний тепловий стан, а й прогнозувати перегрів на ранніх етапах.

Висновки. У роботі проведено комплексний аналіз сучасних методів моніторингу теплового стану тягових електродвигунів (ТЕД) локомотивів.

Розглянуто можливості моделювання теплових процесів у ТЕД із використанням еквівалентних теплових схем і методу скінченних елементів (FEM). Ці підходи забезпечують більш глибоке уявлення про розподіл температури в конструктивних елементах двигуна і дають змогу точно оцінювати теплові навантаження в реальних умовах експлуатації.

Окрему увагу приділено перспективам застосування інтелектуальних методів, зокрема штучних нейронних мереж, які відкривають нові можливості для прогнозування перегрівів і створення цифрових двійників електричних машин. Такий підхід дає змогу підвищити надійність, ефективність і адаптивність систем обслуговування електрорухомого складу.

Системи теплового моніторингу ТЕД мають важливе значення для забезпечення надійності та довговічності тягових електродвигунів. Основні труднощі пов'язані з неможливістю безпосереднього контролю температури у критичних вузлах та обмеженнями традиційних моделей у динамічних умовах.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на вдосконалення цифрових моделей, розроблення нових датчиків та інтеграцію систем моніторингу в структури управління технічним обслуговуванням за станом.

Список використаних джерел

1. Жалкін Д. С., Таран А. В. Удосконалення методів контролю теплового стану тягових електричних двигунів електровозів. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* Харків: УкрДУЗТ, 2015. Вип. 158, т. 2. С. 74-82.
2. Nguyen T., Yang H., Park J. Bi-directional Coupled Electro-Thermal Behaviors of Traction Motors for High-Speed Railway Distributed Traction System. *Applied Thermal Engineering*. 2023. Vol. 220. https://www.researchgate.net/publication/372089818_Bi-directional_coupled_electro-thermal_behaviors_of_traction_motor_for_high-speed_railway_distributed_traction_system.
3. Dong H., Ma H., Wang Z., Man J., Jia L., Qin Y. An Online Health Monitoring Framework for Traction Motors in High Speed Trains Using Temperature Signals. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2022. Vol. 19. P. 1389-1400. <https://www.researchgate.net/publication/362865401>.
4. Huan WANG, Yan-Fu LI, Jianliang REN. Machine learning for fault diagnosis of high-speed train traction systems: A review. *Front. Eng.* 2024. 11(1): 62–78. DOI: 10.1007/s42524-023-0256-2. <https://doi.org/10.1007/s42524-023-0256-2>.
5. ДСТУ ІЕС 60034-1:2019. Машини електричні обертові. Ч. 1. Номінальні та робочі характеристики (ІЕС 60034-1:2017, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. 76 с.
6. Безрученко В. М., Варченко В. К., Чумак В. В. Тягові електричні машини електрорухомого складу. Дніпропетровськ: Вид-во ДНУЗТ, 2003. 252 с.
7. Сінчук О. М., Сушко Д. Л. Побудова математичної теплової моделі тягового електричного двигуна постійного струму. *Вісник Східноукраїнського національного*

університету ім. В. Даля. Технічні науки. Серія Транспорт. Луганськ: СНУ ім. В. Даля, 2005. № 8 (90). Ч. 2. С. 50-54.

8. Сінчук О. М., Устенко О. В., Сушко Д. Л. Удосконалення системи післяремонтних випробувань тягових двигунів електрорухомого складу. *Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп.* Харків: УкрДАЗТ, 2008. Вип. 97. С. 50-59.

9. Chen P., Xie Y, Li D. Thermal Field and Stress Analysis of Induction Motor with Stator Inter-Turn Fault. *Machines*. 2022. 10(7). 504. <https://doi.org/10.3390/machines10070504>.

10. Li D., Kakosimos P. Temperature Estimation in Induction Motors using Machine Learning. *arXiv*. 2025. № arXiv:2504.18105. <https://doi.org/10.1109/APEC43580.2023.10131273>.

11. Hu J., Xiao H., Ye Z., Luo N., Zhou M. Research and Prospects of Digital Twin-Based Fault Diagnosis of Electric Machines. *Sensors*. 2025. Vol. 25 (8). Art. 2625. DOI:10.3390/s25082625. <https://doi.org/10.3390/s25082625>.

12. Cherifi K., Schulze P., Mehrmann V. et al. Hierarchical modeling for an industrial implementation of a Digital Twin for electrical drives. *arXiv preprint*. 2022. arXiv:2207.02171. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2207.02171>.

13. Boscaglia L., Boglietti A., Nategh S., Scema C. Numerically Based Reduced-Order Thermal Modeling of Traction Motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2021. 57(4). <http://dx.doi.org/10.1109/TIA.2021.3077553>.

Сушко Дмитро Леонідович, кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-9747-3263. Тел.: +38 (066) 121-60-10. E-mail: dimals80@i.ua.

Sushko Dmytro, PhD (Tech). Associate Professor, department of maintenance and repair of rolling stock, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-9747-3263. Tel.: +38 (066) 121-60-10. E-mail: dimals80@i.ua.

Статтю прийнято 25.12.2025 р.