

УДК 621.333.001.4

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ТЕПЛОВОГО СТАНУ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ ЕЛЕКТРОВОЗІВ**

Д-р техн. наук Д.С. Жалкін, магістрант А.В. Таран

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОВОЗОВ**

Д-р техн. наук, профессор Д.С. Жалкин, магистрант А.В. Таран

**IMPROVING METHODS OF MONITORING THE THERMAL STATE ELECTRIC LOCOMOTIVES TRACTION ELECTRIC MOTORS**

Doct. of techn. sciences D. Zhalkin, master's degree A. Taran

*У статті проведено аналіз відмов тягових електродвигунів електровозів. Запропоновано систему заходів та обладнання для контролю теплового стану, що створює умови організації ремонту за фактичним технічним станом.*

**Ключові слова:** тяговий двигун, технічний стан, випробування, нагрів, діагностування, контроль, параметри, температура.

*В статье проведен анализ отказов тяговых электродвигателей электровозов. Предложена система мероприятий и оборудование для контроля теплового состояния, создающих условия для организации ремонта по фактическому техническому состоянию.*

**Ключевые слова:** тяговый двигатель, техническое состояние, испытания, нагрев, диагностика, контроль, параметры, температура.

*Completion of the review of methods and tools for monitoring the technical condition of traction electric motors (TM) has shown that existing technologies do not provide fully reliable results. Should be considered the most promising thermal control, has been widely used in transportation, energy, construction, medicine.*

*Purpose of the article - the development of thermal control and predict the remaining life of the winding insulation of motors based on the systematic thermal overload, which gives an opportunity to increase the efficiency of the locomotives as a whole and to reduce the breakdown of the number of motors.*

*Most frequently the traction motors to be repaired due to damage to the insulation (30 %), its low resistance (5 %), the occurrence of the fire by the circular collector (15 %), damage the anchor bearing (15 %).*

*The technology assessment of the technical condition of the anchors TM with thermal control method comprising:*

- Of the operations of preparation and testing of TM by mutual load after repair;*
- Operative measurement of temperature fields on the outer surface of the armature using a portable temperature recorder;*
- Mathematical processing of thermography;*
- Issue a report on the quality of repair of motor armature.*

*Thermal control system and predict the remaining life of the winding insulation TM allows you to limit the amount of thermal overloads, and thus reduce the number of failures of electric locomotives and stops.*

**Keywords:** drive motor, the technical condition, testing, heating, diagnostics, control, parameters, temperature.

**Вступ.** Дослідження відносяться до галузі ресурсозбереження та енергоефективності й спрямовані на вирішення важливої науково-

технічної проблеми – удосконалення післяремонтних випробувань тягових двигунів та стратегії впровадження одержаних результатів.

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями.** Важкі умови експлуатації викликають систематичні теплові перевантаження і, як наслідок, передчасний вихід з ладу електродвигунів [1,2,4].

Підвищити ефективність експлуатації електродвигунів локомотивів можливо за рахунок комплексного підходу до вирішення цього завдання, що полягає у впровадженні засобів теплового контролю та прогнозування терміну роботи ізоляції.

В цих умовах особливої уваги до себе, а точніше до оцінки технічного стану, потребує електроустаткування і, зокрема, тягові двигуни (ТД) постійного струму, оскільки на їх частку припадає 30-35 % відмов у роботі електроустаткування локомотивів від загального їх числа.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Параметри тягового двигуна, у тому числі і номінальні, з часом експлуатації і кількістю ремонтів погіршуються [6,10]. Виконаний огляд методів і засобів контролю технічного стану дає змогу вважати, що існуючі технології безрозбірного контролю не забезпечують повною мірою отримання високої достовірності результатів контролю. Найбільш перспективним у системі діагностування слід вважати тепловізійний контроль, що одержав значне поширення на транспорті, в енергетиці, будівництві, медицині.

Основними недоліками існуючих систем післяремонтних випробувань [7,8] є:

- відсутність інформації для повної ідентифікації електромеханічних параметрів ТД, що при такому підході до післяремонтних випробувань призведе до повторних ремонтів, особливо в тих умовах, коли тягові двигуни працюють при послідовно-паралельному з'єднанні і в результаті чого здійснюють значний вплив один на одного;

- системи навантаження статичного типу не дають повної інформації про післяремонтний стан тягового двигуна, насамперед режим статичного навантаження не відповідає реальним експлуатаційним режимам, тому статичне навантаження не дає уявлення про стан ТД при реальних режимах.

У пристроях непрямого контролю теплового стану, що виконуються на

резисторах та ємностях, суттєвим недоліком є нестабільність характеристик ємностей та неможливість автоматичного вибору параметрів моделі в залежності від режиму роботи. Відомі методики прогнозування залишкового строку служби ізоляції двигунів використовувалися лише для сталих режимів, а не в системах безперервного контролю.

**Визначення мети та задачі дослідження.** Мета дослідження – розроблення системи теплового контролю та прогнозування залишкового строку служби ізоляції обмоток електродвигунів з урахуванням систематичних теплових перевантажень, що дає змогу підвищити ефективність функціонування локомотивів у цілому та зменшити вихід з ладу кількості електродвигунів.

Завдання дослідження:

- аналіз та систематизація теоретичних методів дослідження теплового стану тягових електричних машин і способів підвищення надійності колекторних ТД в експлуатації;

- попередня оцінка можливості використання тепловізійного контролю для визначення технічного стану якорів електричних машин;

- аналіз математичних моделей нагрівання якоря тягового електродвигуна локомотива;

- технологія безконтактного безперервного контролю температури якоря колекторного ТД в експлуатації;

- розроблення системи теплового контролю і пристроїв, що забезпечують підвищення ефективності функціонування ТД.

**Основна частина досліджень.** Тягові двигуни електровозів працюють в умовах різких змін навантажень і швидкостей. Двигуни зазнають впливу сильних поштовхів, вібрацій, сезонних атмосферних впливів, великих перевантажень.

Аналіз статистичних даних відмов ТД підтверджує факт, що 15-20 % ТД рухомого складу, які вийшли з ладу, припадає на перший період їх роботи, так званий період припрацювання (таблиця), що у свою чергу вказує на недосконалість технології і відповідно низької якості ремонту та малоєфективних методів випробувань на нагрівання, оскільки більший відсоток відмов припадає на замикання (коротке) в обмотках якорів (рис. 1).

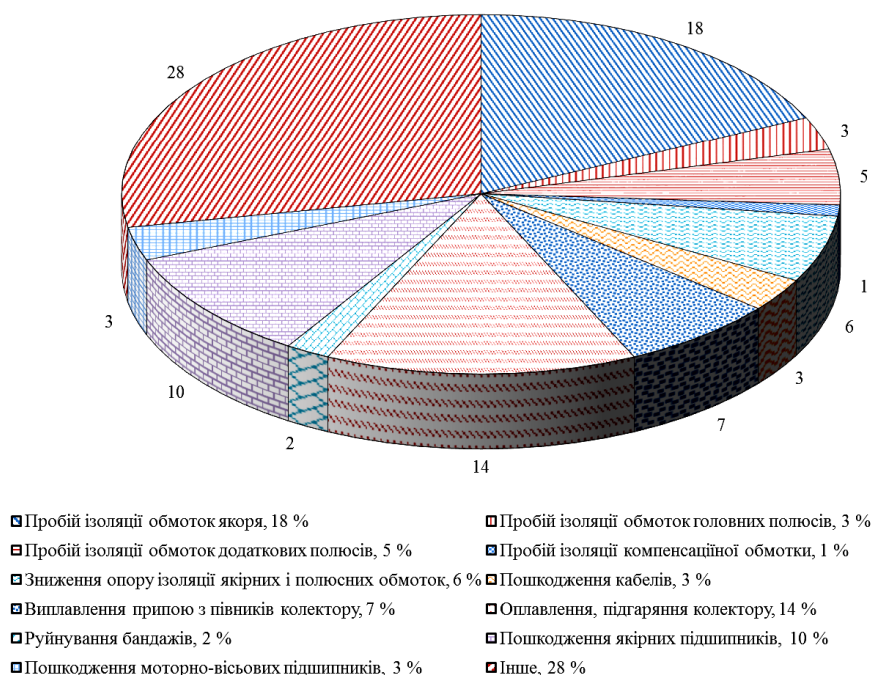


Рис. 1. Розподіл відмов ТД НБ-418 електровозів ВЛ80

Щоб тягові електродвигуни працювали безаварійно, їх ізоляція повинна бути надійною. У процесі експлуатації вона старіє, погіршуються її властивості, електрична міцність знижується. У деяких випадках змінення властивостей ізоляції носить непоправний характер та завершується пробоем. Однак у більшості випадків наслідки старіння можна усунути відновлювальним ремонтом ізоляції. Будь-які замикання та пробой також є небезпечними несправностями, вони відбуваються, здебільшого через механічні пошкодження: проникнення вологи,

пилу й інших електропровідників у тяговий електродвигун [9,10].

Останнім часом на залізницях склалась така тенденція, що пошкодження двигунів в експлуатації становить близько 20 % внаслідок псування та 30 % за кількістю заходів на позаплановий ремонт відповідно до кількості за обладнанням.

Найбільш часто ТД потрапляють у ремонт унаслідок пошкодження ізоляції (30 %), низького її опору (5 %), виникнення кругового вогню по колектору (15 %), пошкодження якірних підшипників (15 %).

Таблиця

Розподіл пошкодження ТД в залежності від пробігу

Пробіг, тис. км	До 200	200-400	400-600	600-800	Більше 800
Відсоток відмов від загальної кількості, %	22	33	22	12	11

Найбільш вразливою при впливі критичних температур є обмотка якоря електричних машин. Перегрів колекторних ТД може виникнути з багатьох причин. Але незалежно від причини виникнення перегрів порушує контакт між кінцями провідників

обмотки якоря і півників колектора, викликає прискорене старіння ізоляції, пошкодження бандажів, передчасний вихід з ладу колектора.

Для розроблення математичної моделі нагрівання якоря ТД з метою визначення температурного поля на його поверхні відома

розрахункова схема розподілу теплових процесів по довжині якоря [9].

Якір тягового електродвигуна умовно розділяють по всій його довжині на дев'ять тепловиділяючих елементів і приймають умову

$$dQ_n^{(k)} = (\Delta P_{ми} + \Delta P_{ци}) d\tau; \quad (1)$$

$$dQ_n^{(n)} = (\Delta P_c^{(n)} + \Delta P_n^{(n)}) d\tau; \quad (2)$$

$$dQ_n^{(j \text{ лоб})} = \Delta P^{(j \text{ лоб})} d\tau; \quad (3)$$

$$dQ_n^{(n)} = (\Delta P_y^{(n)} + \Delta P_{cm}^{(n)}) d\tau, \quad (4)$$

$$t_i^{(II \text{ лоб})} = t_g + (t_y^{(II \text{ лоб})} - t_0^{(II \text{ лоб})}) (1 - e^{-\frac{\tau}{T_{II}}}), \quad (9)$$

про те, що кожен такий елемент має закінчену структуру. Для розрахунку кількості тепла, що виділяється в кожному елементі, і температури на поверхні якоря використовують таку математичну модель:

$$t_i^{(k)} = t_g + (t_y^{(k)} - t_0^{(k)}) (1 - e^{-\frac{\tau}{T}}); \quad (5)$$

$$t_i^{(n)} = t_g + (t_y^{(n)} - t_0^{(n)}) (1 - e^{-\frac{\tau}{T_n}}); \quad (6)$$

$$t_i^{(I \text{ лоб})} = t_g + (t_y^{(I \text{ лоб})} - t_0^{(I \text{ лоб})}) (1 - e^{-\frac{\tau}{T_I}}); \quad (7)$$

$$t_i^{(n)} = t_g + (t_y^{(n)} - t_0^{(n)}) (1 - e^{-\frac{\tau}{T_n}}), \quad (8)$$

де  $T$  – постійна часу нагрівання, хв;

$dQ$  – кількість теплоти, що виділяється у розглянутому елементі якоря, Дж;

$\Delta P$  – втрати потужності в розглянутому елементі якоря, Вт;

$t_i^{(n)}$  – температура елемента якоря в даний момент часу, °С;

$t_y^{(n)}, t_0^{(n)}$  – сталі і початкове перевищення температури над температурою охолоджуючого повітря елемента якоря, °С;

$t_g$  – температура навколишнього повітря, °С;

$\tau$  – час нагрівання якоря, хв;

$n$  – індекс елемента якоря;

$i$  – період часу.

Визначення приросту температури охолоджуючого повітря на розглянутих ділянках якоря (для зовнішньої поверхні якоря і поверхні аксіальних каналів) проводиться за допомогою рівнянь теплового балансу:

$$dQ_n^{(e)} = \alpha F (t_i^{(n)} - t_j^{(e)}); \quad (10)$$

$$dQ_n^{(e)} = c_e G_e (t_i^{(n)} - t_j^{(e)}); \quad (11)$$

де  $dQ_n^{(e)}$  – кількість тепла, що передається із зовнішньої поверхні або поверхні аксіальних каналів охолоджуючого повітря у розглянутий момент часу, Дж;

$\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі з розглянутої поверхні, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);

$F$  – тепловідаюча поверхня, м<sup>2</sup>;

$c_e$  и  $G_e$  – питома теплоємність і витрата охолоджуючого повітря, Дж/(кг·°С) та кг/м<sup>3</sup>.

У ході математичного моделювання визначаються залежності, які характеризують розподіл температури на поверхні якоря по всій його довжині при різних значеннях  $I_y, n_y, \epsilon_n, \tau$ .

Другий підхід до розроблення математичної моделі теплових процесів у якорі ТД локомотива відзначається тим, що ізоляція якірної обмотки подана у вигляді багаточислової конструкції з різними тепловими характеристиками. Для розроблення математичної моделі теплових процесів у якорі ТЕД використовують уточнену теплову схему якоря [8] та метод скінченних елементів (рис. 2).

Диференційне рівняння для опису розподілу температури:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{c_i \rho_i} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_i \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_i \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_i \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] + \frac{w}{c_i \rho_i}, \quad (12)$$

де  $T$  – температура, К;

$x, y, z$  – координати, м;

$\tau$  – час, с;

$\lambda_i$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·К;

$c$  – питома теплоємність, Дж/кг·К;

$\rho$  – щільність твердого тіла, кг/м<sup>3</sup>;

$w$  – питома продуктивність джерел тепла,

Вт/м<sup>3</sup>.

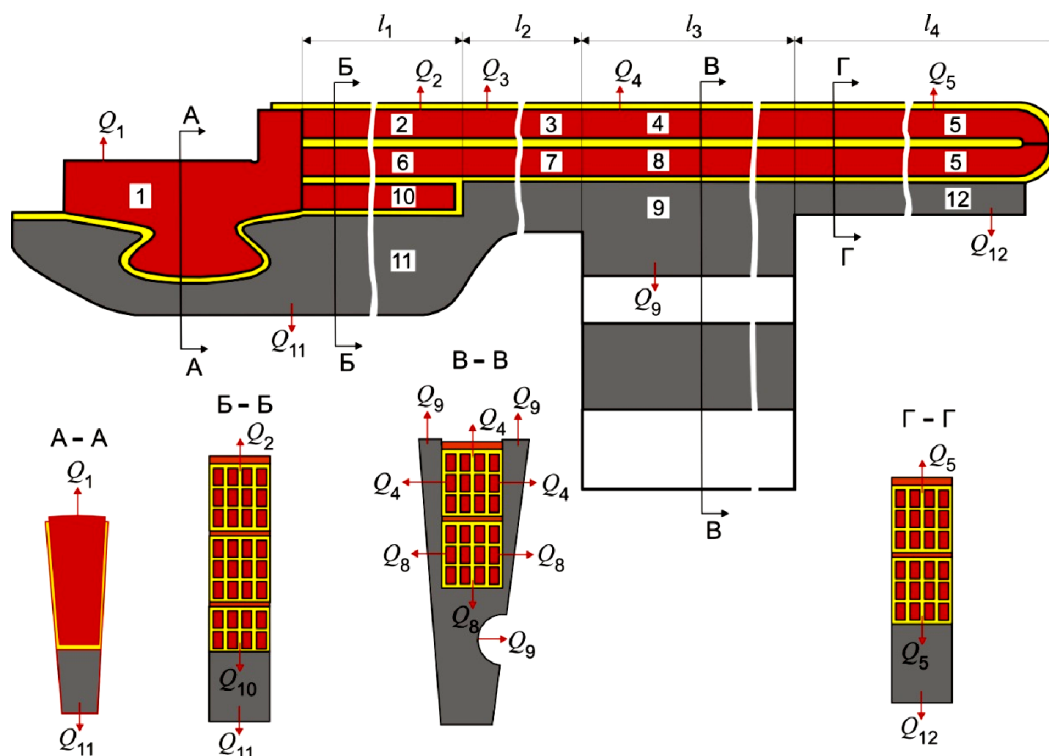


Рис. 2. Теплова схема якоря ТД:

$Q_1$  – тепловий потік від поверхні колекторної пластини в навколишнє середовище;  
 $Q_2$  – тепловий потік від обмотки якоря в навколишнє середовище через передній бандаж;  
 $Q_3$  – тепловий потік від верхнього шару обмотки якоря в навколишнє середовище і сердечник якоря;  
 $Q_4$  – тепловий потік від обмотки якоря в навколишнє середовище через задній бандаж;  
 $Q_5$  – тепловий потік від обмотки якоря в задню натискну шайбу;  
 $Q_6$  – тепловий потік від колекторної пластини у втулку колектора;  
 $Q_7$  – тепловий потік від нижнього шару обмотки в сердечник якоря;  
 $Q_8$  – тепловий потік від сердечника якоря в навколишнє середовище;  
 $Q_9$  – тепловий потік від обмотки зрівняльних з'єднань у сердечник якоря;  
 $Q_{10}$  – тепловий потік від задньої натискної шайби в навколишнє середовище

Для аналітичного дослідження обирають такі режими роботи:

- 1) пуск з навантаженням номінального режиму при різних початкових умовах;
- 2) рух електровоза з розрахунковою швидкістю при змінних умовах охолодження (різні позиції контролера машиніста);
- 3) нагрівання та охолодження обмотки якоря ТД при відсутності технологічних порушень у цілості корпусної ізоляції;

4) нагрівання обмотки якоря ТД при наявності технологічних порушень в цілості корпусної ізоляції;

5) нагрівання та охолодження колектора при різних параметрах охолодження ТД.

У результаті моделювання встановлено таке:

- при струмі якоря  $I_a = 600$  А і частоті обертання  $n_a 12$  с<sup>-1</sup> після 30 хв нагрівання спостерігається стабілізація перепаду температури між поверхнями колектора і колекторного півника (рис. 3).

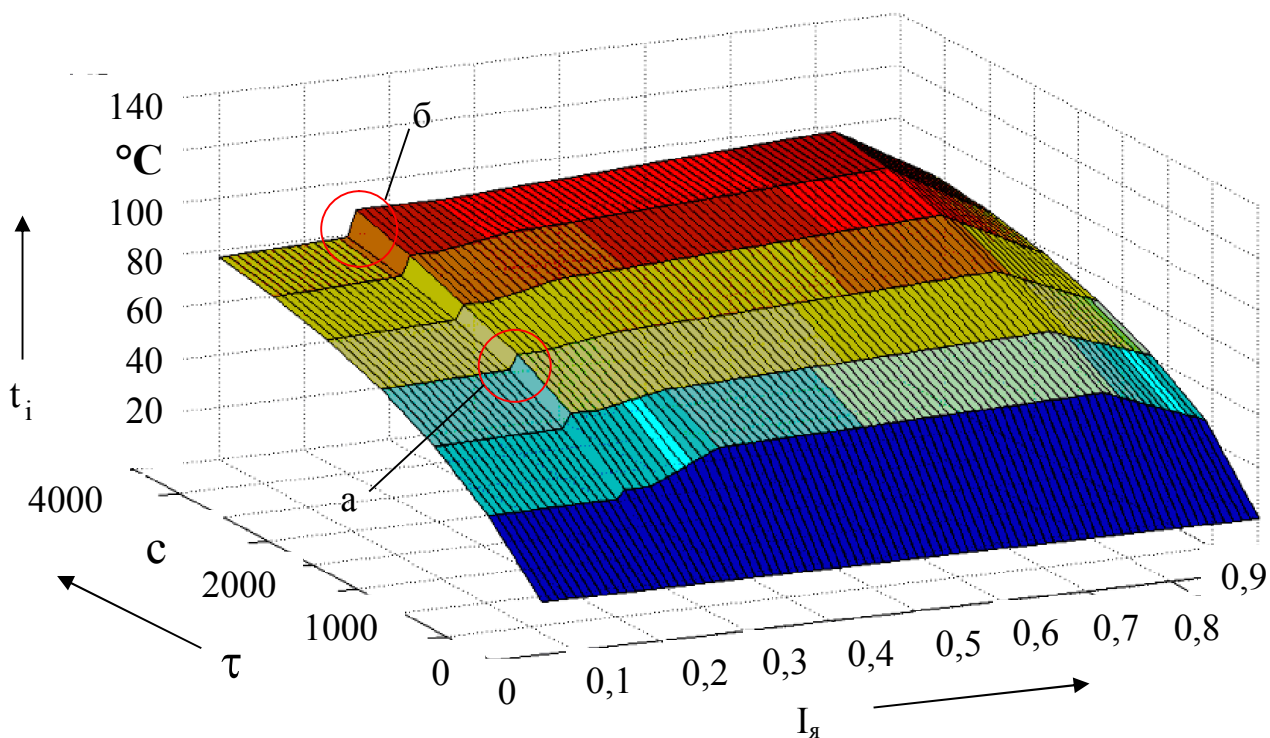


Рис. 3. Характер розподілу температури по поверхні справного якоря, отриманий розрахунковим методом (для періоду часу нагрівання 1 год): локальний перегрів колекторного півника щодо колектора після 30 хв нагрівання якоря (а), після 60 хв (б)

Температурне поле розрахункового сектора якоря в сталому режимі роботи при русі з розрахунковою швидкістю подано на рис. 4. У результаті розрахунку отримана максимальна температура обмотки якоря 104 ... 106 °С під клином, де найменш сприятливі умови охолодження, а на дні паза вона трохи нижча і становить 95 ... 96 °С.

Наявність пустот, раковин і непросочених ділянок корпусної ізоляції призводить до значного місцевого перевищення температури обмотки якоря і різко знижує термін служби електричної машини. Локальне збільшення температури окремих провідників обмотки якоря становить 170 °С і більше, що незабаром призводить до виходу з ладу якоря ТД. За результатами дослідження пропонується замість просочувальних лаків використовувати просочувальні компаунди, у яких частка летких речовин становить не більше 3 ... 5 %.

Технологія тепловізійного контролю [7, 11-14] технічного стану якорів тягових електродвигунів локомотивів розроблена

стосовно станцій випробування тягових електродвигунів після ремонту за методом взаємного навантаження.

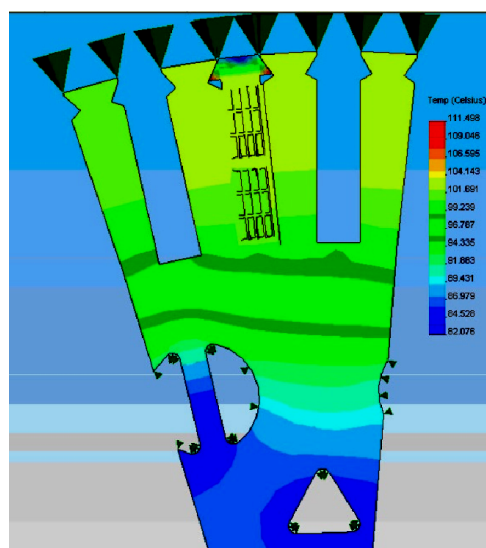


Рис. 4. Температурне поле розрахункового сектора якоря



Для безрозбірного оперативного вимірювання температури на поверхні якоря застосовувався портативний комп'ютерний термограф або пірометр.

Обробка результатів контролю проводиться в такій послідовності:

1) кожна термограма розглядається в режимі термопрофілю (за дванадцятьма секторами) і визначається температура на поверхні колектора  $t_i^{(k)}$  і колекторних півників  $t_i^{(n)}$  в кожному секторі  $j$ ;

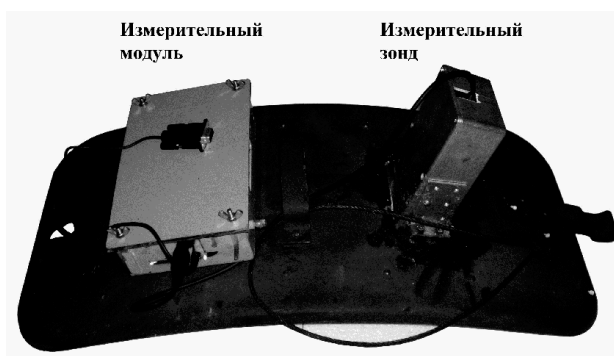
2) обчислюється температурний перепад  $\Delta t_i$  між поверхнями колектору і колекторного півника в кожному секторі;

3) згідно зі встановленими значеннями температурного перепаду робиться висновок про технічний стан тягового електродвигуна.

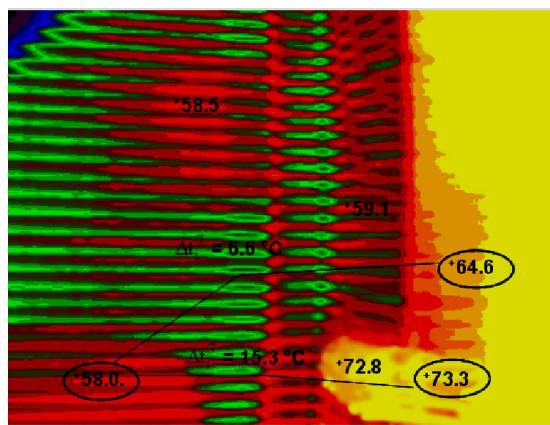
Система контролю двигуна (див. рис. 5) представляє програмно-апаратний комплекс, що складається з датчиків (температури, струму, частоти обертання, напруги і витрати охолоджуючого повітря), мікропроцесора, інтерфейсу та програмного забезпечення.



а



б



в

Рис. 5. Тепловий контроль ТД:

а – загальний вигляд; б – розташування приладів; в – термограма

Система дає змогу контролювати температури вузлів ТД в реальному часі протягом тривалого процесу випробувань або експлуатації із записом у пам'ять і візуалізацією для прийняття рішень.

Система відстежує максимальні температури, порівнює їх з гранично допустимими і розраховує залишковий ресурс ТД.

Система передбачає установлення датчиків у легкодоступних вузлах двигуна.

**Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку.** Проведений аналіз статистичних даних відмов ТД підтверджує факт, що 15-20 % ТД рухомого складу виходять з ладу в перший період їх роботи, так званий період припрацювання, що у свою чергу вказує на недосконалість технології і відповідно низьку якість ремонту та малоефективні методи випробувань на нагрівання, оскільки значний відсоток відмов припадає на замикання (коротке) в обмотках якоря.

Запропонована технологія оцінки технічного стану якорів ТД із застосуванням тепловізійного методу контролю, яка складається:

- з операцій підготовки та випробування ТД методом взаємного навантаження після ремонту;

- безрозбірного оперативного вимірювання температурних полів на зовнішній поверхні якоря за допомогою портативного термографа;

- математичної обробки результатів термографування;

- видачі висновку про якість ремонту якоря електродвигуна.

Отримані результати можуть використовуватися для розрахунку перегріву ТД з метою запобігання перегріву ізоляції якоря при водінні довгосоставних та великовагових поїздів.

Система теплового контролю та прогнозування залишкового строку служби ізоляції обмоток ТД дає змогу обмежити кількість теплових перевантажень, і цим зменшити кількість відмов електродвигунів і зупинок локомотивів.

### Список використаних джерел

1. Сінчук, О. До проблеми побудови комплексної, безперервної системи діагностики тягових електричних машин рухомого складу [Текст] / О.М. Сінчук, Д.Л. Сушко // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – Луганськ: СНУ ім. В. Даля, 2003. – № 9(67). – С. 25-28.
2. Бабанін, О. Вібромоніторинг підшипників тягових електричних машин при капітальному ремонті [Текст] / О.Б. Бабанін, В.В. Артеменко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2003. – № 4. – С. 9-12.
3. Правила ремонту електричних машин електровозів і електропоїздів ЦТ-0063 [Текст] / Укрзалізниця. – К., 2003. – 323 с.
4. Лоза, П.О. Покращення енергетичних властивостей стенда для випробувань колекторних тягових двигунів локомотивів [Текст] / П.О. Лоза // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2008. – Вип. 22. – С. 26-30.
5. Космодамианский, А.С. Автоматическое регулирование температуры обмоток тяговых электрических машин локомотивов [Текст]: монография / А.С. Космодамианский. – М.: Маршрут, 2005. – 255 с.
6. Швалов, Д.В. Системы диагностики подвижного состава [Текст] / Д.В. Швалов, В.В. Шаповалов. – М.: Маршрут, 2005.
7. Алексенко В.М. Тепловая диагностика элементов подвижного состава [Текст]: монография / В.М. Алексенко. — М.: Маршрут, 2006. — 398 с.
8. Володин, А.И. Моделирование тепловых процессов в якоре электрической машины постоянного тока [Текст] / А.И. Володин, О.В. Балагин, В.К. Фоменко // Труды всерос. науч.-практ. конф. «Транспорт-2008» / Ростовский гос. ун-т путей сообщения. – Ростов н/Д, 2008. – Ч. 3. – С. 285-289.
9. Грищенко, М.М. Анализ теплового состояния обмотки якоря тягового электродвигателя постоянного тока [Текст] / М.М. Грищенко // Известия петербургского университета путей сообщения. – 2009. – № 3 (20). – С. 74 – 79.
10. Рак, О.М. Прогнозування залишкового терміну служби ізоляції обмоток електродвигунів [Текст] / О.М. Рак // Вісник Державного університету "Львівська політехніка". Проблеми економії енергії. – Львів: ДУ "Львівська політехніка". – № 2. – 1999. – С. 73-76.
11. Martinez V.M., Martinez B.T., Olmeda Gonzalez P.O., Peralta Uria R.W. Fault detection in diesel engines using infrared thermography // Insight. 2000. V. 44. No. 4. P. 228 - 232.



12. Varis J., Hartikainen J., Lehtiniemi R., Luukkala M. A simple transportable imaging system for fast thermal nondestructive testing // Proc. Quant. IR Thermography-QIRT'92, Paris, France, July 7-9, 1992. P. 235 - 238.

13. Frumuselu D., Radu C. IR thermography applied to ground-level reinforced concrete constructions belonging to electricity networks // Insight. 1998. V. 40. No. 7. P. 501 - 504.

14. Вавилов, В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль [Текст]/ В.П. Вавилов. – М.: ИД Спектр, 2009. – 544 с.

---

Жалкін Денис Сергійович, д-р техн. наук, професор, кафедра експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту. Тел. 093-911-10-40. E-mail: abdddenis@gmail.com  
Таран Артем Вікторович, слухач ІППК, Український державний університет залізничного транспорту. Тел. 067-376-81-50. E-mail: abdd@mail.ru.

Denys Zhalkin, doct. of techn. sciences, professor of cathedra maintenance and repair of rolling stock Ukraine State University of Railway Transport. Tel. +38093-911-10-40. E-mail: abdddenis@gmail.com.

Artem Taran, listener, Ukraine State University of Railway Transport. Tel. +38067-376-81-50. E-mail: abddd@mail.ru.

Наукова праця здана до друку 21.09.2015 р.