

УДК 621.313.2.077.3:621.313.2.072.2

А. М. АФАНАСОВ^{1*}, О. С. ШАПОВАЛОВ^{2*}

^{1*}Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Український державний університет науки і технологій, ул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 373 15 31, ел. пошта afanasof@ukr.net, ORCID 0000-0003-4609-2361

^{2*}Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Український державний університет науки і технологій, ул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 373 15 31, ел. пошта shapovalov93as@gmail.com, ORCID 0000-0002-3151-6574

АВТОМАТИЗОВАНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ОБМОТОК ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОМАШИН ПРИ ЇХ ВИПРОБУВАННІ НА НАГРІВ

Мета. Розробка та впровадження автоматизованих комплексів для випробування тягових електричних машин рухомого складу на сучасному етапі є надзвичайно важливою задачею. Автоматизовані комплекси випробувань надають можливість значно підвищити якість та ефективність проведення тестів на тягові електричні машини. Завдяки використанню передових технологій ці комплекси забезпечують точне збирання та аналіз даних під час випробувань. Одним із основних переваг автоматизованих комплексів є зменшення собівартості та трудовитрат на проведення випробувань. Замість ручного втручання операторів, системи автоматизації можуть виконувати багато завдань автоматично, що дозволяє економити час і знижувати витрати на оплату праці. **Методи.** Методологічною основою дослідження є аналітичні методи дослідження, що базуються на складанні розрахункової системи диференціальних рівнянь на основі прийнятої схеми випробувань, а також розробка алгоритму проведення випробувань на спроектованому стенді. **Результати.** Запропонований випробувальний комплекс дозволяє проводити випробування колекторних тягових електричних машин, визначати перевищення температури обмоток електричних машин без необхідності їх зупинки. Функціональна схема вимірювального комплексу дозволяє в автоматичному режимі фіксувати параметри випробовуваних електричних машин, а також при необхідності є можливість виведення результатів випробування на комп'ютер з наступним формуванням протоколу випробувань в електронному вигляді. Точність визначення вимірних параметрів забезпечується точністю вимірювальних приладів та алгоритмом роботи вимірюваного комплексу. **Наукова новизна.** Запропонований автоматизований вимірювальний комплекс є великим кроком у напрямку покращення ефективності та надійності випробувань на нагрівання тягових електричних машин. Однією з його ключових переваг є можливість проводити випробування без зупинки машини, що значно зменшує час та витрати на проведення тестів. Автоматична реєстрація вимірних параметрів дозволяє одночасно фіксувати кілька контрольованих показників, що забезпечує більш повну та об'єктивну оцінку стану електричної машини під час тестування. Цей комплекс не лише полегшує процес випробувань та зменшує витрати часу та ресурсів, але й підвищує надійність отриманих результатів, що є важливим для виробників та операторів транспортних систем. Загалом, автоматизований вимірювальний комплекс відкриває нові можливості для підвищення ефективності та надійності тестування тягових електричних машин, сприяючи подальшому розвитку технологій транспорту. **Практична значимість.** Впровадження отриманих результатів підприємствами з ремонту тягових електричних машин рухомого складу дозволить знизити матеріальні витрати на проведення ремонтів з одночасним підвищенням якості проведених випробувань.

Ключові слова: діагностика, допоміжні машини, випробування електромашин, взаємне навантаження.

Вступ

Вітчизняний і закордонний досвід експлуатації електричних машин показує, що впровадження методів діагностики є одним з важливих факторів підвищення економічної ефективності використання електричного обладнання в промисловості. Призначення діагностики – виявлення і запобігання відмовам, виходам з ладу обладнання, підтримка експлуатаційних показників в установлених межах, прогнозування стану з метою повного використання ресурсу.

Вимоги відповідних стандартів і правил ремонту тягового і моторвагонного рухомого складу магістрального і промислового транспорту передбачає проведення приймально-здавальних випробувань кожної заново виготовленої або відремонтованої електричної машини [1, с. 21; 2, с. 30-32]. Ці випробування мають важливу і невід'ємну частину технологічного процесу виготовлення або ремонту електромашини, матеріальні затрати на яку входять в собівартість кінцевої продукції. Відповідно зменшення енергозатрат на проведення приймально-здавальних випробувань без зниження якості самих

випробувань призведе до зниження собівартості ремонту і економії енергоресурсів.

Постановка завдання дослідження

При використанні існуючих на даний час систем навантаження тягових електромашин розрахунок електричного опору та температури перевищення їх обмоток при випробуванні на нагрів можливі тільки в загальмованому стані валів якорів [3, с. 51]. Таким чином в процесі випробування принципово неможливо здійснювати контроль за зміною цих параметрів в неперервному режимі, що значно ускладнює процедуру випробувань та суттєво зменшує їх якість. Завданням дослідження є створення системи випробування тягових електромашин на нагрів та автоматизованого вимірювального комплексу, що забезпечують можливість неперервного автоматичного контролю та фіксації перевищень температури як обмоток збудження випробуваних електромашин, так й обмоток їх якорів.

Матеріал і результати досліджень

Схема взаємного навантаження тягових електромашин із безперервним вимірюванням опору обмоток якорів та обмоток збудження наведена на рис. 1

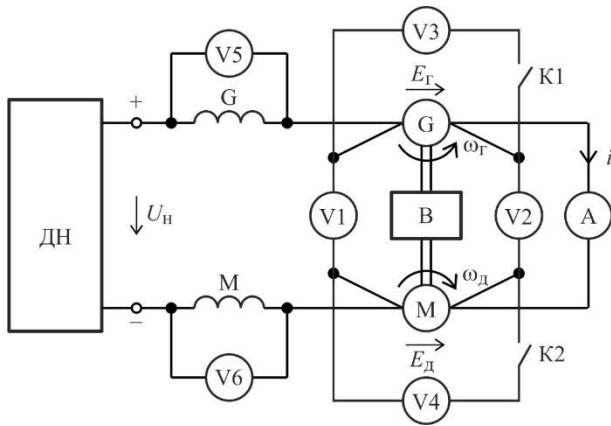


Рис. 1. Схема взаємного навантаження тягових електромашин із безперервним вимірюванням опору обмоток якорів та збудження

Система взаємного навантаження складається з джерела напруги ДН, обмотки якорів і збудження електромашин М і G, які працюють у режимах двигуна та генератора відповідно, варіатора В, вимірювальних приладів (амперметра А і вольтметрів V1-V6) та контакторів комутації кіл K1 і K2 вольтметрів (датчиків напруги) V3, V4.

У даній системі взаємного навантаження всі втрати у випробуваних електромашинах покриваються одним джерелом електричної

потужності – джерелом напруги ДН. Втрати холостого ходу покриваються в стенді непрямим способом шляхом створення небалансного моменту за рахунок використання варіатора В. Небалансний електромагнітний момент для даної схеми [4, с. 69-73]

$$\Delta M = c\Phi I (K_M - 1),$$

де c – конструктивна постійна однотипних електромашин, що випробовуються;

Φ – магнітний потік;

I – сила струму якорів;

K_M – коефіцієнт передачі моменту від двигуна до генератора.

Коефіцієнт передачі моменту дорівнює

$$K_M = \frac{\omega_d}{\omega_r},$$

де ω_r і ω_d – кутові швидкості валів генератора і двигуна відповідно.

Оскільки варіатор знижувальний, то

$$K_M > 0.$$

Баланс потужностей для даної системи взаємного навантаження має вигляд:

$$\begin{cases} \Delta EI = \sum \Delta P_{xx}; \\ (U_{дн} - \Delta E)I = \sum \Delta P_e, \end{cases} \quad (1)$$

де ΔE – різниця е. р. с. двигуна E_d і генератора E_r ;

$U_{дн}$ – напруга джерела живлення;

ΔP_{xx} – сумарні втрати потужності неробочого ходу в електромашинах;

ΔP_e – сумарні електричні втрати потужності в електромашинах.

Небалансна е. р. с. електромашин

$$\Delta E = E_d - E_r. \quad (3)$$

З рівняння (1)

$$\Delta E = \frac{\sum \Delta P_{xx}}{I}.$$

З достатньою точністю можна припустити, що механічні та магнітні втрати в електромашинах не змінюються в міру нагрівання їх обмоток. Тоді за умови сталості струму I можна прийняти, що

$$\sum \Delta P_{xx} = const;$$

$$\Delta E = const.$$

Розглянемо принципову можливість вимірювання опору обмоток двох якорів М і G за допомогою вимірювальної системи, наведеної на рис. 1.

Вольтметри (датчики напруги) V1-V4 під'єднані до якорів М і G за допомогою вимірювальних щіток, котрі дають змогу нівелювати вплив падінь напруги на щітках самих електромашин. Тоді різниця показань датчиків V1 і V2 дорівнюватиме сумі падінь напруги на обмотках двох якорів М і G і значенню ΔE . Ця різниця показань дорівнює

$$\Delta U_V = U_{V1} - U_{V2}. \quad (4)$$

З іншого боку

$$\Delta U_V = \Delta E + I - \sum \Delta R_{я}. \quad (5)$$

де U_{V1}, U_{V2} – показання датчиків V1 і V2 відповідно;

$\sum \Delta R_{я}$ – сума електричних опорів обмоток якорів М і G.

Сумарний електричний опір обмоток якорів має вигляд

$$\sum \Delta R_{я} = R_{яд} + R_{яг},$$

де $R_{яд}, R_{яг}$ – опори якорів двигуна М і генератора G відповідно.

Тоді з формули (5) можна отримати вираз для сумарного опору обмоток якорів у вигляді

$$\sum R_{я} = \frac{\Delta U_V - \Delta E}{I} \quad (6)$$

Зауважимо, що величина ΔE залежить як від струму I , так і від кутових швидкостей обертання якорів електромашин

$$\Delta E = c\Phi(\omega_d - \omega_r). \quad (7)$$

Якщо під час випробувань забезпечити стабілізацію частот обертання (або їх різниці), а також стабілізацію струму якорів електромашин, можна досягти умови

$$\Delta E = const. \quad (8)$$

За цієї умови під час випробування можна проводити розрахунок сумарного опору обмоток якорів М і G за формулою (6).

По мірі нагрівання обмоток якорів під час теплових випробувань значення ΔU_V зростатиме при сталості значень ΔE і I . Сталість ΔE і I має бути забезпечена системою автоматичного управління стендом взаємного навантаження.

Для виконання розрахунків за формулою (6) необхідно попередньо визначити значення ΔE . Це може бути виконано на самому початку випробування на нагрівання в холодному стані обмоток якорів за формулою

$$\Delta E = \Delta U_{V0} - I \sum R_{я0}, \quad (9)$$

де ΔU_{V0} – значення параметра ΔU_V у холодному стані обмоток якорів на початку випробування, тобто коли значення перевищення температури дорівнює нулю;

$\sum R_{я0}$ – сумарний опір обмоток якорів у холодному стані.

Сумарний опір обмоток якорів у холодному стані визначається у вигляді

$$\sum R_{я0} = R_{яд0} + R_{яг0},$$

де $R_{яд0}$ і $R_{яг0}$ – опори обмоток якорів двигуна та генератора у холодному стані.

Значення $R_{яд0}$ і $R_{яг0}$ можуть бути визначені в загальмованому стані випробуваних електромашин методом "амперметра-вольтметра" з використанням датчиків напруги V3 і V4 (рис. 1). Контактори K1 і K2 для такого вимірювання вмикаються в загальмованому стані валів випробувальних електромашин. Струм навантаження при випробуванні вимірюється за допомогою амперметра А. Під час обертання якорів електромашин контактори K1 і K2 розімкнуті.

Середнє значення перевищень температури двох обмоток якорів можуть бути визначені за поточним значенням $\sum R_{я}$ і значенню $\sum R_{я0}$, розрахованому на початку випробування електричних машин на нагрівання.

Кінцеві точні значення опорів обмоток якорів М і G можна визначити за показаннями датчиків V3 і V4 у загальмованому стані якорів наприкінці випробування на нагрівання. Для цього вмикаються контактори K1 і K2. Струм навантаження при всіх вимірах напруги на обмотках якорів визначається за амперметром (датчиком струму) А (рис. 1).

Електричні опори і відповідні перевищення температури обмоток збудження випробовуваних електромашин можуть бути визначені за допомогою датчиків напруги V5 і V6. Розрахунок температур обмоток збудження можна вести в безперервному режимі протягом усього випробування на нагрівання.

Для забезпечення розрахунків і фіксації значень температури обмоток якорів і збудження тягових електромашин протягом їх випробування на нагрівання може бути використана

вимірювальна система, функціональну схему якої наведено на рис. 2.

Вимірювальна система (рис. 2) складається з датчиків напруги V1 і V6, під'єднаних до силової схеми випробувального стенда згідно з рис. 1, регістрів пам'яті P1-P5, датчика струму А, дільників Д1-Д6, аналітичних пристроїв АП1-АП4 і суматорів С1-С3, що виконують функції віднімання.

Алгоритм випробувань на нагрівання виглядає таким чином. На початку випробування в загальмованому стані роторів (якорів) випробуваних електромашин М і G через їхні обмотки пропускають струм I , який вимірюють датчиком струму А. Падіння напруги на обмотках якорів вимірюють датчики напруги V3 і V4, а падіння

напруги на обмотках збудження електромашин – датчиками напруги V5 і V6.

Датчиками напруги V1 і V2 фіксуються напруги між вимірювальними щітками відповідно до схеми, наведеної на рис. 1. Значення датчиків V1 і V2 надходять на суматор С1, де вони перетворюються відповідно до виразу (4) у значення ΔU_v , яке являє собою суму падінь напруги на обмотках якорів М і G у холодному стані при загальмованих валах електромашин.

Значення напруги датчиків V3-V6 і значення ΔU надходять на перші входи дільників Д3-Д6 і Д2 відповідно. На другі входи даних дільників надходить значення струму I з датчика струму А.

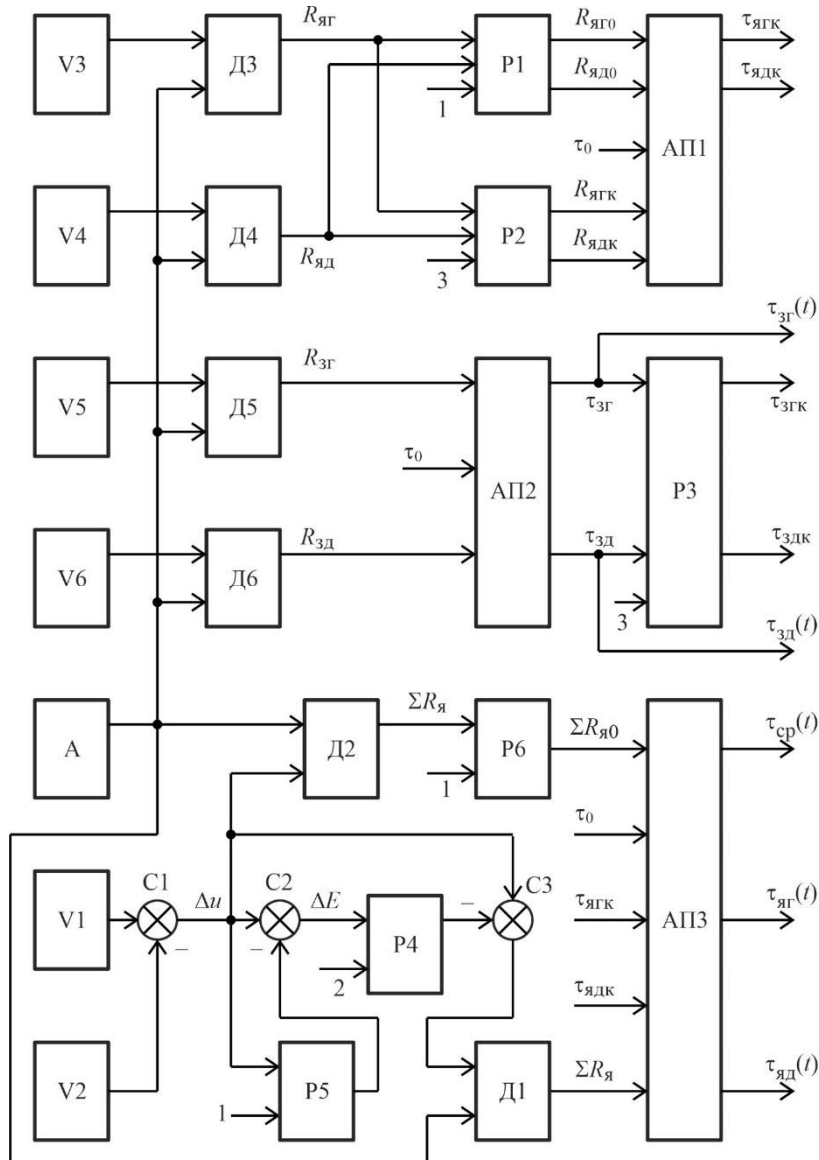


Рис. 2. Функціональна схема вимірювальної системи

При цьому на виходах дільників Д3 і Д4 з'являються значення опорів якорів G і M відповідно ($R_{яг}, R_{яд}$).

На виходах дільників Д5 і Д6 з'являються значення опорів обмоток збудження G і M відповідно ($R_{зг}, R_{зд}$).

На виході дільника Д2 з'являється значення сумарного опору двох обмоток якорів G і M (ΣR).

Значення опорів $R_{яг}, R_{яд}$ та $\Sigma R_{я}$ надходять на інформаційні входи регістрів P1 і P6. Значення ΔU_V при цьому надходить на інформаційний вхід регістра P5.

На першому етапі випробувань (режим 1) вимірювальна система фіксує значення опорів обмоток якорів G і M – $R_{яг0}$ і $R_{яд0}$ відповідно в холодному стані (регістр P1), а також сумарний опір цих же обмоток у холодному стані $\Sigma R_{я0}$ (регістр P6). Фіксація цих опорів забезпечується шляхом подачі імпульсів на тактові входи регістрів (на схемі позначені як «1»).

Другий етап випробувань являє собою процес нагрівання випробовуваних електромашин під навантаженням із дотриманням умов:

$$\Delta E = const;$$

$$\omega_d = const;$$

$$\omega_r = const.$$

Ці умови забезпечуються системою автоматичного управління стенда взаємного навантаження. Необхідно зазначити, що при цьому напруга на випробовуваних електромашинах буде незначно збільшуватися в міру нагрівання їхніх обмоток.

На самому початку другого етапу випробувань, одразу після стабілізації струму навантаження і кутової швидкості завдяки подачі імпульсів на тактові входи регістра P5 і аналітичного пристрою АП2 фіксуються значення різниці е. р. с. якорів ΔE і запускається режим запису значень опорів обмоток збудження $R_{зг}$ і $R_{зд}$, а також аналітичним пристроєм АП2 фіксується задане оператором значення початкової температури τ_0 . Це саме значення температури τ_0 надходить на інформаційні входи аналітичних пристроїв АП1 і АП3.

При подачі імпульсу на тактовий вхід регістра P4 на його виході фіксується значення ΔE , яке визначається за формулою (9) і забезпечується в схемі (рис. 2) суматором С2.

Завдяки фіксації значень $\Sigma R_{я0}, \tau_0, \Delta E$ забезпечується можливість подальших розрахунків значення $\Sigma R_{я}$ і відповідного йому середнього значення перевищення температур обмоток якорів електромашин $\tau_{ср}$.

Використовуючи поточне значення $\Sigma R_{я}$ та фіксовані значення $\Sigma R_{я0}$ і τ_0 , аналітичний пристрій АП3 розраховує в безперервному режимі поточне значення $\tau_{ср}$, використовуючи вираз [5, с. 207-208]

$$\tau_{ср} = \frac{\Sigma R_{я} - \Sigma R_{я0}}{\Sigma R_{я0}} (235 + \tau_0) + \tau_0 - \theta_0,$$

де θ_0 – температура навколишнього повітря.

$$\tau_{ср} = \frac{\Sigma R_{я} - \Sigma R_{я0}}{\Sigma R_{я0}} (235 + \tau_0). \quad (10)$$

Розраховане значення $\tau_{ср}$ передається на панель індикації і записується в пам'ять АП3 у вигляді залежності $\tau_{ср}(t)$. За аналогічною формулою аналітичний пристрій АП2 здійснює безперервний розрахунок значень температури перегріву обмоток збудження тягових електромашин, що випробуються.

$$\tau_3 = \frac{R_3 - R_{30}}{R_{30}} (235 + \tau_0).$$

Розраховані значення перевищень температур $\tau_{зг}$ і $\tau_{зд}$ передаються на панель індикації в безперервному режимі і записуються в пам'яті АП2 у вигляді залежностей $\tau_{зг}(t)$ і $\tau_{зд}(t)$.

Дільники Д1-Д6 призначені для визначення опорів обмоток електромашин за величинами сили струму та падінь напруги на них:

$$R_{яг} = \frac{U_{V3}}{I};$$

$$R_{яд} = \frac{U_{V4}}{I};$$

$$R_{зг} = \frac{U_{V5}}{I};$$

$$R_{зд} = \frac{U_{V6}}{I};$$

$$\Sigma R_{я0} = \frac{\Delta U}{I};$$

$$\sum R_{я} = \frac{\Delta U - \Delta E}{I}.$$

Третій етап випробувань (режим 3) полягає у фіксації кінцевих значень опорів нагрітих обмоток якорів і обмоток збудження випробовуваних електромашин. Така фіксація забезпечується шляхом подавання імпульсів на тактові входи регістрів Р2 і Р3 при загальмованих валах електромашин ($\omega = 0$) і значенні струму навантаження I . При цьому контактори К1 і К2 вмикаються, підключаючи датчики напруги V3 і V4 до вимірювальних щіток.

Аналітичний пристрій АП1 розраховує і зберігає в пам'яті кінцеві значення перевищення температур якорів $\tau_{якг}$ (генератори) і $\tau_{якд}$ (двигуни).

Регістр 3 фіксує і зберігає в пам'яті кінцеві значення перевищень температури обмоток збудження $\tau_{зкг}$ (генератора) і $\tau_{зкд}$ (двигуна).

За характеристикою $\tau_{ср}(t)$, записаної в пам'яті АП3, і значенням кінцевих перевищень температур $\tau_{якг}$ і $\tau_{якд}$ аналітичний пристрій АП3 визначає залежності $\tau_{яг}(t)$ і $\tau_{яд}(t)$ у вигляді

$$\tau_{яд}(t) = \frac{\tau_{якд}}{\tau_{срк}} \cdot \tau_{ср}(t);$$

$$\tau_{яг}(t) = \frac{\tau_{якг}}{\tau_{срк}} \cdot \tau_{ср}(t),$$

де $\tau_{срк}$ – розрахункове значення середньої температури $\tau_{ср}$ наприкінці випробування на нагрівання.

Висновки

1. При використанні електричної схеми взаємного навантаження тягових електромашин, запропонованої в даній роботі, може бути

A. AFANASOV, O. SHAPOVALOV

AUTOMATED COMPLEX FOR MEASURING THE WINDING TEMPERATURE OF TRACTION ELECTRIC MACHINES DURING THEIR HEATING TEST

Purpose. The development and implementation of automated complexes for testing traction electric machines of rolling stock at the current stage is an extremely important task. Automated test complexes provide an opportunity to significantly increase the quality and efficiency of tests on traction electric machines. Thanks to the use of advanced technologies, these complexes ensure accurate data collection and analysis during tests. One of the main advantages of automated complexes is the reduction of cost and labor costs for conducting tests. Instead of manual intervention by operators, automation systems can perform many tasks automatically, saving time and reducing labor costs. **Methodology.** The methodological basis of the research is analytical research methods based on the compilation of a

забезпечене безперервне вимірювання середнього значення перевищення температури обмоток електромашин, що випробуються на нагрів.

2. Функціональна схема вимірювального комплексу, що запропоновано в даній роботі, дозволяє автоматично розраховувати та фіксувати значення перевищення температури обмоток якорів та збудження випробовуваних тягових електромашин.

3. Висока точність кінцевого визначення значень перевищення температури обмоток якорів та збудження випробовуваних тягових електромашин забезпечується точним вимірюваннями їх електричних опорів в кінці випробування при нерухомому стані валів електромашин.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. ДСТУ ГОСТ 2582:2017 машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия (ГОСТ 2582-2013, IDT; ИЕС 60349-1:2010, NEQ; ИЕС 60349-2:2010, NEQ). Київ : «УкрНДНЦ», 2017. 50 с

2. правила ремонту електричних машин електровозів і електропоїздів. ЦТ-0063. Київ : Вид. дім «САМ», 2003. 286 с.

3. Афанасов А. М., Арпуль С. В., Шаповалов О. С. Определение расхода электроэнергии на проведение приемо-сдаточных испытаний тяговых электрических машин. *Электромагнитна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. 2018. № 16. С. 51–56. DOI:10.15802/ecsrt2018/172600.

4. Афанасов А. М. Энергетические показатели механического способа компенсации электрических потерь в тяговых электродвигателях при их взаимной нагрузке. *Вісн. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*. 2010. № 35. С. 69–73.

5. Жерве Г. К. Промышленные испытания электрических машин. Ленинград : Энергоатомиздат, 1984. 407 с.

Надійшла до редколегії 29.03.2024

Прийнята до друку 20.05.2024

calculation system of differential equations based on the accepted test scheme, as well as the development of an algorithm for conducting tests on a designed stand. **Findings.** The proposed test complex allows to conduct tests of collector traction electric machines, to determine the excess temperature of the windings of electric machines without the need to stop them. The functional scheme of the measuring complex allows you to automatically record the parameters of the tested electric machines, and if necessary, it is possible to output the test results to a computer with the subsequent formation of the test protocol in electronic form. The accuracy of the determination of the measured parameters is ensured by the accuracy of the measuring devices and the algorithm of the measuring complex. **Originality.** The proposed automated measuring complex is a big step in the direction of improving the efficiency and reliability of heating tests of traction electric machines. One of its key advantages is the ability to perform tests without stopping the machine, which significantly reduces the time and costs of conducting tests. Automatic registration of measured parameters allows to record several controlled indicators at the same time, which provides a more complete and objective assessment of the state of the electric machine during testing. This complex not only facilitates the testing process and reduces the cost of time and resources, but also increases the reliability of the obtained results, which is important for manufacturers and operators of transport systems. In general, the automated measuring complex opens up new opportunities for increasing the efficiency and reliability of testing electric traction machines, contributing to the further development of transport technologies. **Practical value.** The implementation of the obtained results by enterprises for the repair of traction electric machines of rolling stock will allow to reduce the material costs of carrying out repairs while simultaneously improving the quality of the conducted tests.