

АНОТАЦІЯ

Козік Ю.Г. Поліпшення експлуатаційної надійності тягових електричних машин локомотивів – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 273 «Залізничний транспорт». – Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпро, 2020.

Проблемі підвищення експлуатаційної надійності ізоляції тягових електродвигунів (ТЕД) локомотивів приділяється постійна увага. У відповідності з «Державною програмою стратегічного розвитку залізниць України», що підготовлена Державним науково-дослідним центром залізничного транспорту України сумісно із фахівцями Укрзалізниці, було розроблено галузеву Програму оновлення тягового рухомого складу залізниць на період до 2020 року, де вказано на необхідність створення сучасних систем обслуговування та ремонту тягового рухомого складу (ТРС) нового покоління та розробка відповідної нормативної документації. Одним з головних завдань «Програми...» є підвищення експлуатаційної надійності ТЕД і зниження експлуатаційних витрат за рахунок вдосконалення системи їх утримання.

Розвиток теоретичних і методичних засад, що забезпечать ефективність у прийнятті рішень з вибору та удосконаленню систем утримання ТРС та його складових, на поточний момент часу, є актуальною науковою проблемою, яка на цей час має велике значення для залізничного транспорту України.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в удосконаленні системи діагностування корпусної ізоляції ТЕД локомотивів з метою прогнозування її залишкового ресурсу та покращення системи відновлення корпусної ізоляції ТЕД з урахуванням технології відновлення:

- *вперше* встановлено еквівалентність величини максимального значення зворотної напруги та величини інтегральної оцінки якості корпусної ізоляції;
- *вперше* запропоновано інтегральний показник кривої зворотної напруги для класифікації станів корпусної ізоляції ТЕД з метою подальшого прогнозуван-

ня залишкового ресурсу корпусної ізоляції до її відновлення або заміни ізоляції на нову;

- *вперше* запропоновано стани якості корпусної ізоляції тягового електродвигуна на основі проведення класифікації ступеня її зношування;
- *удосконалено* математичну модель визначення раціональних періодів відновлення корпусної ізоляції ТЕД ЕД-118А з урахуванням технології відновлення, початкового стану якості ізоляції та обмеження на критичне значення зворотної напруги.

Практичне значення. Отримані в дисертаційній роботі результати досліджень використовуються:

- Службою локомотивного господарства Регіональної філії Придніпровська залізниця (акт впровадження результатів НДР № 0118U005059 від 05.02.2019 р.);
- ПрАТ «Металургтрансремонт» (акт впровадження результатів НДР № 0119U000430 від 23.04.2020 р.);
- Матеріали дисертаційної роботи та результати що отримані по завершенню науково – дослідних робіт (номери держреєстрації № 0118U005059, № 0119U000430) використовуються кафедрою «Локомотиви» університету в навчальному процесі та на курсах підвищення кваліфікації працівників Укрзалізниці.

При аналізі досліджень стосовно основних методів контролю якості ізоляції ТЕД відзначено, що у більшості випадків використовуються методи руйнівного контролю поточного стану ізоляції, які, як правило, не дають адекватної оцінки стану ізоляції електродвигунів. Дослідниками відмічається, що найбільшу інформативність про процес старіння ізоляції мають параметри, пов'язані з процесами абсорбції і ресорбції в динаміці. Моделі відновлення, що пропонуються в сучасних публікаціях, часто не враховують поточний стан ТЕД, що відновлюється і ступінь відновлення (технологію відновлення). Моделі, що стосуються прогнозування ресурсу ізоляції ТЕД, дослідниками однозначно не визначені. Ресурс моделюється як напрацювання

(час) між суміжними неусувними відмовами. Вихідними даними, при цьому, є інформація про відмови протягом деякого часу експлуатації.

На підставі проаналізованих сучасних досліджень в роботі запропоновано для вибору раціональної системи утримання ТЕД локомотивів враховувати стан корпусної ізоляції через удосконалення системи діагностування та корегування міжремонтних пробігів ТЕД, враховуючи технологію відновлення ізоляції.

Розглянуто процеси старіння ізоляційних конструкцій, основні методи контролю ізоляції, а також контроль стану ізоляції за величиною зворотної напруги. Отримано вирази для обчислення ємності ізоляції та тангенсу кута діелектричних втрат за схемою мосту змінного струму. Розглянуті в роботі характеристики неоднорідності ізоляції обумовлено наявністю заряду абсорбції, мають параметри, які жорстко пов'язані з питомими електричними властивостями ізоляції. Тому вимір і аналіз таких характеристик може дати корисну інформацію про стан ізоляції, про кількість шарів з різними властивостями, про питомі параметри цих шарів. Формально всі абсорбційні характеристики містять практично однакову інформацію про ізоляцію.

Проаналізовано відмови ТЕД локомотивів, чинників відмов ізоляції через несправності інших елементів ТЕД. Поширеною причиною несправності ТЕД є пробій ізоляції та міжвиткові замикання, на долю яких припадає близько 20% і 24% від загального числа відмов для електровозів і тепловозів відповідно.

Було виконано виміри та проведено дослідження зміни опору ізоляції обмоток збудження головних полюсів ТЕД в залежності від пробігу в літній період та взимку. Як з'ясувалося, опір ізоляції, виміри якого проводились мегомметром, має рівномірний закон розподілу і не залежить від сезону. Тобто цей параметр (опір ізоляції) не є інформативним з точки зору діагностування і прогнозування стану ізоляції котушок головних полюсів. Були спроби встановити залежність опору ізоляції від пробігу, що також не дало очікуваних результатів.

Вимір опору ізоляції способом пропонованим «Правилами ремонту електричних машин...» є лише контроль цього параметра, щоб він не виходив за встановлені межі. А для отримання інформативного діагностичного параметра, за яким можна

було б судити про стан ізоляції в даний момент часу і передбачити зміну її стану на майбутнє необхідна була розробка нових методів і способів оцінки стану ізоляції.

Акцентовано увагу на те, що, в процесі ремонту необхідно вирішувати завдання не лише відновлення працездатності ізоляційної системи, але й прогнозування її залишкового ресурсу.

Запропоновано показники класифікації, процедуру класифікації, граничні значення параметрів прогнозування залишкового ресурсу корпусної ізоляції ТЕД НБ-406. Метою задачі прогнозування залишкового ресурсу корпусної ізоляції є визначення станів якості корпусної ізоляції тягового електродвигуна за спостереженнями зворотної напруги на основі проведення класифікації ступеня зношування ізоляції що діагностується, а також визначення оцінок напрацювання до моменту відновлення або заміни ізоляції на нову. Методика визначення стану якості корпусної ізоляції містить в собі розроблене програмне забезпечення класифікації об'єктів за введеними показниками. За даною методикою прогнозується і залишковий ресурс корпусної ізоляції до її відновлення. Відповідно до отриманої класифікації, в процедурі розбиття на класи, введено наступні стадії стану корпусної ізоляції: 1-а стадія – «задовільний стан»; 2-а стадія – «перед ремонтний стан»; 3-я стадія – «стан підвищеного ризику». Даний спосіб визначення станів якості корпусної ізоляції прийнятий в межах одного депо, локомотиви якого зазвичай експлуатуються в однакових умовах.

Розроблено математичну модель побудови процесу відновлення корпусної ізоляції в об'ємі поточного ремонту (ПР-3) з урахуванням степені відновлення, визначено раціональні періоди відновлення корпусної ізоляції в об'ємах ПР-3, капітального ремонту (КР-1) та прогнозування ресурсу корпусної ізоляції для ТЕД ЕД-118А. Оптимальними за питомими витратами моментами відновлень ТЕД ЕД-118А до КР-2 є: 360000 км – ПР-3; 567715 км – КР-1; 927715 км – ПР-3; 1108430 км – КР-2. Періодичність відновлення ПР-3 складає $\tau=360000$ км. Результат досягається за отриманою раціональною технологією.

Оптимальними за пробігом моментами відновлень для ТЕД ЕД-118А до КР-2 є: 180000 км, 360000 км, 540000 км – ПР-3; 666715 км – КР-1; 846715 км,

1026715 км, 1206715 км – ПР-3; 1306430 км – КР-2. Періодичність відновлення ПР-3 складає, $\tau=180000$ км. Результат досягається за отриманою раціональною технологією.

Періоди відновлення корпусної ізоляції необхідні для побудови раціональної системи утримання ТЕД, що в свою чергу призведе до підвищення їх експлуатаційної надійності, зменшенню експлуатаційних витрат та покращенню показників безпеки руху поїздів.

Ключові слова: корпусна ізоляція, математична модель, стан ізоляції, кластерний аналіз, показники якості ізоляції, періоди відновлення ізоляції, система утримання.

Список публікацій здобувача:

- включених до міжнародної наукометричної бази «Scopus»:

Kapitsa, M., Laguta, V., Kozik, Y. Selecting the parameters of the diagnosis of frame insulation condition in electrical machines of locomotives (2018) International Journal of Engineering and Technology (UAE), 7 (4), pp. 110-114. DOI: 10.14419/ijet.v7i4.3.19718. [Електрон.ресурс] / – Режим доступу:

<https://www.sciencepubco.com/index.php/ijet/issue/view/394>.

- включених до міжнародної наукометричної бази «Web of Science»:

Kapitsa, M. Classification of Quality Conditions of a Traction Motor Frame Insulation of Locomotives [Electronic resource] / Michail Kapitsa, Vasiliy Laguta, Yuriy Kozik // MATEC Web of Conferences. – 2019. – Vol. 294 : 2nd International Scientific and Practical Conference “Energy-Optimal Technologies, Logistic and Safety on Transport” (EOT-2019). – P. 1–7. – Access Mode: [Електрон.ресурс] / – Режим доступу:

https://www.matec-conferences.org/articles/matecconf/pdf/2019/43/matecconf_eot18_03002.pdf

(21.10.2019). – DOI: 10.1051/matecconf/201929403002.

- включених до фахових видань Переліку, затвердженого Атестаційною комісією МОН України:

Козік Ю. Г. Оптимальне за питомими витратами прогнозування ресурсу корпусної ізоляції тягових електричних двигунів локомотивів. Зб. наук.пр. Держ. ун-ту

інфраструктури та технологій. Серія: Трансп. системи і технології. Київ, 2019. Вип. 34. С. 30–47. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2019-34-1-3>.

Лагута, В. В., Козік, Ю. Г. Визначення періодів відновлення корпусної ізоляції тягового електродвигуна ЕД-118А за спостереженнями зворотної напруги. Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна. 2020. № 3 (87). С. 163–173. DOI: 10.15802/stp2020/208270.

- які засвідчують апробацію матеріалів дисертації на наукових конференціях та семінарах:

Обґрунтування методу контролю стану корпусної ізоляції тягових електричних машин локомотивів. Лагута В.В., Козік Ю.Г. Тези [Текст] 78 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» [Текст] Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В.Лазаряна. – Дніпро: Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В.Лазаряна, 2018, С.15

Вибір параметрів контролю стану корпусної ізоляції електричних машин локомотивів Козік Ю.Г., Лагута В.В. Тези [Текст]. XI Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості та освіті» Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В.Лазаряна. – Дніпро: Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В.Лазаряна, 2017, С.38

Методи випробувань ізоляційних конструкцій тягових електричних машин локомотивів Капіца М.І., Козік Ю.Г. Міжнародна науково-технічна конференція «Технології та інфраструктура транспорту», Харків, 14-16 травня 2018 р.: Тези доповідей. – Харків: УкрДУЗТ, С.107-109

Застосування енергозаощаджуючих технологій під час випробувань ізоляційних конструкцій тягових електричних машин локомотивів. Капіца М.І., Лагута В.В., Козік Ю.Г. Матеріали міжнародної науково – практичної конференції (Львів, 18-19 червня 2018 р.) – Дніпро.: Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В.Лазаряна, 2018, С.46-47

Капіца М.І., Ю.Г. Козік Неруйнівні технології контролю корпусної ізоляції тягових електричних машин локомотивів [Текст]. Транспорт і логістика: проблеми та

рішення: Збірник наукових праць за матеріалами VIII-ї Міжнародної науково-практичної конференції, Северодонецьк – Одеса – Вільнюс – Київ, 23-25 травня 2018р. / Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, Одеський національний морський університет – Одеса : КУПРІЄНКО СВ, 2018. – С.79

Козік Ю. Г., Капіца М. І. Визначення оптимального напрацювання корпусної ізоляції ТЕД локомотивів з врахуванням ступені її відновлення [Текст]. Науково-технічний прогрес на транспорті: Тези доповідей 79 Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених, магістрантів та студентів / Дніпровський нац. ун-т за-лізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпро : Дніпровський нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2019. – С78.

Козік Ю.Г., Лагута В.В. Прогнозування ресурсу корпусної ізоляції тягових електричних двигунів локомотивів за питомими витратами [Текст] / Козік Ю.Г., Лагута В.В.// Тези 79-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» 16-17 травня 2019 р. – Дніпро: Вид-во ДНУЗТ, 2019. – С. 29 – 30.

Капица М.И., Козик Ю.Г., Лагута В.В. Оценка остаточного ресурса корпусной изоляции ТЭД методом классификации ее состояний [Текст] /Капица М.И., Козик Ю.Г., Лагута В.В.// ІКСЗТ, 2018 №4 (додаток): Тези 31-ї міжнародної практичної конференції «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті» – Харків: Вид-во УкрДУЗТ, 2018. – С. 11 – 12.

M. Kapitsa, V. Laguta, and Yu. Kozik Classification of quality conditions of a traction motor frame insulation of locomotives AGENDA of the 2-nd international scientific and practical conference "ENERGY-OPTIMAL TECHNOLOGIES, LOGISTICS AND SAFETY ON TRANSPORT" DNIPRO NATIONAL UNIVERSITY OF RAILWAY TRANSPORT NAMED AFTER ACADEMICIAN V. LAZARYAN RAILWAY INSTITUTE; September 19-20th, 2019, Lviv, Ukraine.

ABSTRACT

Kozik Yu.H. Improving the Operational Reliability of Electrical Traction Machines of Locomotives. Qualifying Research Paper as Manuscript.

Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy in Specialty 273 "Rail Transport". - Dnipro National University of Rail Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnipro, 2020.

The problem of improving the operational reliability of insulation of traction motors (TM) of locomotives has been given constant attention. In accordance with the State Program for Strategic Development of Railways of Ukraine, prepared by the State Research Centre of Rail Transport of Ukraine together with the specialists from Ukrainian Railways, a sectoral Programme for Renewal of Traction Rolling Stock of Railways for the period up to 2020 was developed, which indicated the need to implement the next generation systems for maintenance and repair of traction rolling stock (TRS) and development of relevant regulatory documents. One of the main tasks of the Program is to improve the operational reliability of traction motors and reduce operating costs by improving the system of their maintenance.

The development of theoretical and methodological foundations that will ensure effective decision making regarding the selection and improvement of systems for maintenance of TRS and its components is currently an urgent science issue, which is nowadays of great importance for the rail transport of Ukraine.

The scientific novelty of the obtained results lies in the improved system for diagnostics of frame insulation of TM of locomotives for the purpose of predicting its residual life and improving the system for repair of TM frame insulation, taking into account the restoration technology:

- *for the first time*, the equivalence of the maximum value of reverse voltage and the value of integrated estimation of frame insulation performance was established;
- *for the first time*, an integrated indicator of the reverse voltage curve was suggested for classifying the conditions of TM frame insulation in order to further predict the residual life of frame insulation before its restoration or replacement;
- *for the first time*, the conditions of TM frame insulation performance were suggested based on the classification of the degree of insulation wear;
- the mathematical model for determining rational periods for repair of frame insulation of ЕД-118А traction motor was *improved*, taking into account a restoring tech-

nology, initial state of insulation performance and limits on the critical value of reverse voltage.

Practical importance. The research results obtained in the thesis are used:

- by the Service of Locomotive Facilities of the Regional Branch of Cisdnieper Railways (Certificate of Implementation of Research Work Results No. 0118U005059 dated 05.02.2019);
- by Metalurhtransremont PJSC (Certificate of Implementation of Research Work Results No. 0119U000430 dated 23.04.2020);
- Materials of the thesis and results obtained upon the completion of research work (state registration numbers No. 0118U005059, No. 0119U000430) are used by the Department of Locomotives of the university in the educational process and advanced training courses for employees of Ukrainian Railways.

When analysing the research regarding the main methods for monitoring the TM insulation performance, it was observed that in most cases the destructive testing methods were used for monitoring the current condition of insulation, which, as a rule, did not give an adequate assessment of the condition of electric motor insulation. The researchers point out that the parameters associated with the processes of absorption and desorption in dynamics have the highest informative value concerning the aging of insulation. The models of repair suggested in modern publications often do not take into account the current condition of TM, which is repaired and the degree of repair (restoration technology). The models related to predicting the residual life of TM insulation have not been unambiguously defined by the researchers. The residual life is modelled as operating time between two adjacent unavoidable failures. The initial data, at that, is the information about failures during certain time of operation.

Based on the analysed modern research, it was suggested in the thesis, when choosing a rational system for TM maintenance, to take into account the condition of frame insulation by improving the system for diagnostics and adjustment of time between repairs of TM, taking into consideration the insulation restoration technology.

The processes of aging of insulating structures, main methods for insulation monitoring, as well as control of insulation condition by the value of reverse voltage were consid-

ered. Expressions for calculating the capacity of insulation and dielectric loss factor for the AC bridge circuit were obtained. The characteristics of inhomogeneous insulation considered in the work were conditioned by the presence of absorption charge and had parameters firmly related to the specific electrical properties of insulation. Therefore, the measurement and analysis of such characteristics can provide useful information about the condition of insulation, number of layers with different properties and specific parameters of these layers. Formally, all absorption characteristics contain almost identical information about insulation.

The failures of TM of locomotives and factors of insulation failures due to malfunctions of other TM elements were analysed. A common cause of TM malfunction is insulation breakdown and turn-to-turn short circuits, which account for about 20% and 24% of the total number of failures for electric and diesel locomotives, respectively.

Measurements were performed and the change in the insulation resistance of the excitation windings of TM main poles, depending on the operating time in summer and winter, were studied. It turned out that the insulation resistance, which was measured with a megohmmeter, had a uniform distribution law and did not depend on the season. That is, this parameter (insulation resistance) was not informative in terms of diagnostics and prediction of the condition of insulation of the main pole coils. The attempts were made to establish the dependence of insulation resistance on repair interval, which also did not yield the expected results.

The measurement of insulation resistance using the method suggested in the "Rules for Repair of Electrical Machines..." provided only control of this parameter so that it did not exceed the established limits. However, in order to obtain an informative diagnostic parameter, by which one could judge the condition of insulation at the given moment and predict the change of its condition in the future, it was necessary to develop new methods and techniques for assessing the condition of insulation. The attention was drawn to the fact that in the process of repair it was necessary to solve the problem of not only restoring the performance of the insulation system, but also predicting its residual life.

The indicators of classification, procedure for classification and limit values of parameters for predicting the residual life of frame insulation of HB-406 traction motor were

suggested. The purpose of the task of predicting the residual life of frame insulation was to determine the condition of TM frame insulation performance observing the reverse voltage based on the classification of the degree of wear of the insulation diagnosed, as well as to determine estimates of operating time before restoration or replacement of insulation. The technique for determining the condition of frame insulation performance included the developed software for classifying objects according to the indicators entered. The residual life of frame insulation before its repair was also predicted by this technique. According to the classification obtained, the following stages of the condition of frame insulation were distinguished in the procedure of dividing into classes: 1st stage - "satisfactory condition", 2nd stage - "before the repair condition" and 3rd stage - "high risk condition". This method of determining the condition of frame insulation was adopted within one depot, the locomotives of which were usually operated under the same conditions.

The mathematical model for creation of the process of frame insulation restoration within the scope of current repair (CR-3) was developed, taking into account the degree of restoration, and rational intervals of frame insulation repair within the scope of CR-3, overhaul (O-1) and prediction of the residual life of frame insulation for ЕД-118А traction motors were determined. The optimal, in terms of unit costs, moments of restoration for ЕД-118А traction motor before O-2 were: 360 000 km – CR-3; 567 715 km – O-1; 927 715 km – CR-3; 1 108 430 km – O-2. The interval of CR-3 was $\tau = 360\,000$ km. The result was achieved using the developed rational technology.

The optimal, in terms of operating time, moments of restoration for ЕД-118А traction motor before O-2 were: 180 000 km, 360 000 km, 540 000 km – CR-3, 666 715 km – O-1, 846 715 km, 1 026 715 km, 1 206 715 km – CR-3; 1 306 430 km – O-2. The interval of CR-3 was $\tau = 180\,000$ km. The result was achieved using the developed rational technology.

The intervals of frame insulation repair are necessary to create a rational system for maintenance of traction motors, which in its turn will improve their operational reliability, reduce operating costs and improve the train safety.

Key words: frame insulation, mathematical model, condition of insulation, cluster analysis, indicators of insulation performance, insulation repair intervals, maintenance system.