

**СТАН ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ТА АНАЛІЗ РЕЖИМІВ РОБОТИ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ КАР'ЄРНИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ**

У статті досліджено стан електромеханічного обладнання та проведено аналіз режимів роботи тягових електроприводів кар'єрних електровозів на основі статистичних даних промислових підприємств. Розглянуто формування кар'єрного залізничного транспорту України тяговими агрегатами залежно від обсягів видобутку та експлуатації гірничо-транспортного устаткування, роботу якого продемонстровано на прикладі Полтавського гірничо-збагачувального комбінату. Проаналізовано вплив зміни електричних параметрів обмоток та умов зчеплення коліс з рейковим полотном на аварійність і працездатність багатодвигунового тягового електропривода постійного струму з двигунами послідовного збудження. Зроблено висновки щодо виявлення можливих відмов тягових електричних двигунів магістральних і кар'єрних електровозів. Сформульовано завдання подальших досліджень режимів роботи тягового електропривода електровозів: створення математичних моделей та обґрунтування методів їх аналізу, розроблення заходів контролю електричних параметрів тягових двигунів, їх керування при зміні умов зчеплення для забезпечення підвищення експлуатаційних показників.

**Ключові слова:** тяговий електропривод, кар'єрний електровоз, стан електромеханічного обладнання, режими роботи.

*A.M. Artemenko, O.P. Chornyi, O.K. Danyleiko. State of electromechanical equipment and analysis of operating conditions of the traction electric drive of open-pit electric locomotives. The paper investigates the state of electromechanical equipment and analyzes the operating conditions of traction electric drives of quarry electric locomotives on the basis of statistical data from industrial enterprises. The work considered various types of rolling stock: locomotives, diesel locomotives and traction units. The analysis of modern achievements and publications on the use of electric locomotive transport in quarries has been carried out. The issues of power supply of electric locomotives in open pits have been analyzed. It has been concluded that the traction electric drive is the most loaded part of the electric locomotive; it being the reason for most of all failures. Failures of the traction electric drive occur both due to the operating conditions and due to the quality of the repair. An assessment of the impact of the rail track profile, the voltage changes in the switching network, workload and traffic intensity on the operating conditions of traction electric motors has been formulated. The formation of open-pit railway transport in Ukraine with the help of traction units, depending on the production volume and operation of mining and transport equipment, has been considered, the work of the Poltava mining and processing plant being the illustration. The influence of changes in the windings electrical parameters and the wheels adhesion to the railroad bed on the accident rate and performance of a multi-motor traction DC electric drive with sequential excitation motors has been analyzed. The conclusions on identifying possible failures of traction electric motors of mainline and open-pit electric locomotives have been drawn. The tasks of further studies of the operating conditions of the traction electric drive of electric locomotives have been formulated, they are: the creation of mathematical models and the substantiation of methods for their analysis, the development of measures for monitoring*

<sup>1</sup> ст. викладач, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, [a.m.artemenko@gmail.com](mailto:a.m.artemenko@gmail.com)

<sup>2</sup> д-р техн. наук, професор, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, ORCID: 0000-0001-8270-3284, [aleksei.chornyi@gmail.com](mailto:aleksei.chornyi@gmail.com)

<sup>3</sup> ст. викладач, ДВНЗ «Криворізький національний університет», м. Кривий Ріг, [danyleiko@knu.edu.ua](mailto:danyleiko@knu.edu.ua)

*the electrical parameters of traction motors, their control with changing adhesion conditions to ensure an increase in performance.*

**Keywords:** *traction electric drive, quarry electric locomotive, state of electromechanical equipment, operating conditions.*

**Постановка проблеми.** На великих залізничних, вугільних і азбестових рудниках України одним з основних видів технологічного транспорту залишається залізничний. Багаторічний досвід застосування електровозного транспорту в кар'єрах показує його високу ефективність за умови використання в бажаних гірничотехнічних умовах експлуатації. Сучасні досягнення та новітні розробки вчених в галузі управління електромеханічними системами (ЕМС), і, зокрема, електроприводами промислових електровозів не дозволяють отримати необхідні результати, так як стан рейкових шляхів механічного обладнання і тягових електродвигунів у край незадовільний. Необхідно відзначити, що перераховані чинники безпосередньо пов'язані між собою, тому вирішити проблему якісного ремонту електродвигунів без поліпшення стану шляхів неможливо.

Такі дефекти рейкового полотна, як розрив, виїмка, вищербленість, відображаються на стані поверхонь колісних пар. Зниження діаметра колеса в окремих випадках становить 10-12 мм, а вищербленості, що з'являються, спричиняють аналогічні пошкодження поверхні рейки, а іноді й зміни геометрії головки рейки.

Поява цих дефектів призводить до просковзування, додатково пошкоджуючи рейкове полотно і колеса в місці контакту. Зменшення діаметра колеса зумовлює обертання колісних пар з різною швидкістю, що приводить до безперервного просковзування поверхні колеса по поверхні рейки. При цьому відбувається нерівномірний розподіл навантаження між тяговими двигунами. Двигуни з більшим навантаженням перегріваються і швидко виходять з ладу. Їх ремонт здійснюється на спеціалізованих ремонтних підприємствах, що забезпечують, відповідно до стандартів, відхилення в вихідних параметрах до 10% по якорній обмотці і 2% по обмотці збудження. Нерівномірність параметрів спричиняє нерівномірну жорсткість механічних характеристик і нерівномірний розподіл навантаження між двигунами. Тому актуальним завданням є дослідження стану електромеханічного обладнання та режимів роботи тягового електроприводу кар'єрного електровозного транспорту.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблема підвищення ефективності роботи кар'єрних електровозів привертає увагу науковців уже кілька десятиліть, але й досі не здобула остаточного вирішення. Досліджуваним проблемам присвячені праці В.П. Браташа, Г.К. Гетьмана, О.М. Гончарова, А.А. Колби, М.О. Костіна, Б.А. Кузнецова, Г.Г. Півняка, Д.Й. Родькіна та ін., у яких запропоновано різні підходи і рішення. Із сучасних досліджень у сфері удосконалення технології випробування, діагностики та експлуатації тягових електричних машин слід відмітити роботи В.В. Артьоменка, О.Б. Бабаніна, Л.В. Дубинця, П.О. Лози, Б.І. Мокіна, О.М. Сінчука, Д.Л. Сушка та інших учених. Питання електропостачання і живлення електровозів розглянуті в роботах [1, 2]. Необхідно, однак, відзначити, що централізоване енергопостачання вимагає створення досить великої інфраструктури (тягові підстанції, контактна мережа тощо), що поряд з високою вартістю локомотивів [3] і значними обсягами розносу бортів кар'єрів для розміщення комунікацій обумовлює високу капіталомісткість залізничного транспорту. Розширене використання залізничного транспорту [4] змінило підходи до проектування об'єктів гірничо-рудної промисловості. Об'єктивними причинами є порівняно невисокий (в 1,8 і 6 разів менше в порівнянні з автомобільним та конвеєрним відповідно) середній поздовжній ухил траси залізничного транспорту (0,037). При цьому спостерігається тенденція збільшення відставання розкривних робіт внаслідок використання залізничного транспорту, але то в першу чергу пов'язано з помилками в його застосуванні в конкретних гірничо-технічних умовах, неправильними рішеннями щодо розкриття горизонтів кар'єрів.

Одним з визначальних обмежень розширеного застосування залізничного транспорту з підвищеними ухілами залізничних шляхів є значна величина нормативного гальмівного шляху на керівному ухилі шляхів, яка була обґрунтована також в середині минулого століття. Між тим є розробки, що дозволяють за рахунок застосування принципово нових локомотивних і вагонних гальмівних колодок, легованих фосфором, скоротити гальмівний шлях в 1,5...2,0 рази [5-7]. При

цьому термін служби колодок в 2,0...2,5 рази вище вживаних в даний час, а знос бандажів колісних пар скорочується в 1,3...1,5 рази [5]. Детально на умови експлуатації тягових електричних машин на різних дорогах впливає профіль колії, коливання напруги в контактній мережі, вантажонапруженість та інтенсивність руху [8-10].

**Мета статті** – проведення досліджень стану електромеханічного обладнання та аналіз режимів роботи тягових електроприводів кар'єрних електровозів на основі статистичних даних промислових підприємств.

**Виклад основного матеріалу.** Кар'єрний транспорт є сполучною ланкою в загальному технологічному процесі. Від чіткої роботи кар'єрного транспорту залежить ефективність суміжних виробничих процесів – виймально-вантажних і відвальних робіт. До основних видів кар'єрного транспорту належать [4, 11-18]: автомобільний транспорт; залізничний транспорт; конвеєрний та ін.

В даний час значну частину транспортуючих гірських порід на відкритих гірничих роботах перевозять автотранспортом. Але він є і самим дорогим. Частка витрат на транспортування досягає 40...60% загальної вартості робіт в кар'єрі [19-22]. Високі експлуатаційні витрати включають найбільш ємні складові, такі як паливо і мастила, шини, змінні агрегати, підтримання доріг тощо. У свою чергу за розміром капітальних витрат автотранспорт поступається залізничному і конвеєрному. Залізничний кар'єрний транспорт є найбільш економічним і продуктивним у порівнянні з автомобільним та конвеєрним.

У зв'язку з цим на сьогоднішній день на великих залізрудних, вугільних і азбестових рудниках України одним з основних видів технологічного транспорту продовжує залишатися залізничний. Багаторічний досвід застосування електрифікованого залізничного транспорту в глибоких кар'єрах показує його високу ефективність за умови використання в бажаних гірничотехнічних умовах експлуатації. Аналіз науково-технічних та проектних рішень дозволяє стверджувати, що в перспективі як на діючих, так і на розроблених нових родовищах великої продуктивності, електрифікований залізничний транспорт буде залишатися одним з головних.

На рис. 1 [11, 16] наведено обсяг робіт гірничо-транспортного устаткування по залізрудній промисловості України в цілому. З діаграми видно, що транспортування залізничним транспортом становить 31% і займає друге місце за кількістю виконуваних робіт в кар'єрах. Найбільш експлуатованим і поширеним є автотранспорт, проте, як згадувалося вище, його утримання вимагає значних коштів.

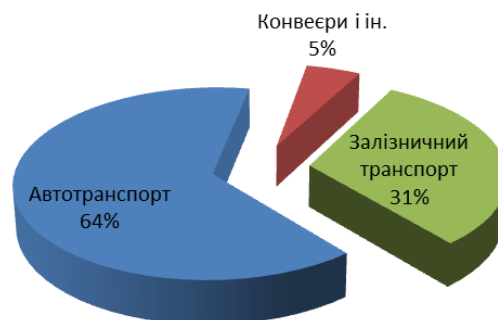


Рис. 1 – Діаграма обсягу робіт гірничо-транспортного устаткування

Залізничний транспорт ефективно застосовується при широкому зміні обсягів перевезення (20...100 млн. т/рік і більше); раціональна відстань транспортування становить 5-10 км і більше, радіуси кривих – до 80-100 м, ухили шляху не перевищують 2,5...3,5° (40...50%), тому він найбільш ефективно використовується на родовищах з великими розмірами кар'єрного поля і при витриманому заляганні пластів або кар'єрних тіл. Глибина кар'єрів при залізничному транспорті становить зазвичай не більше 200-250 м, а із застосуванням тунельних схем розкриття глибоких горизонтів досягає 350-400 м [12, 23, 24].

До основних переваг електрифікованого залізничного транспорту слід віднести: високий середній експлуатаційний коефіцієнт корисної дії; економічність (порівняно низька собівартість перевезення гірничої маси) і надійність в експлуатації; можливість значного перевагта-

ження електровозів; простота управління і ремонту; мала залежність від кліматичних умов; незначний негативний вплив на навколишнє середовище.

До недоліків відносяться: можливість долати відносно малі уклони шляху, залежність від електроенергії, тобто необхідність створення електрифікованих шляхів; необхідність створення та утримання залізничного полотна.

Глибоке введення залізничного транспорту в кар'єр забезпечується поетапним підвищенням крутизни трас. Горизонти послідовно розкриваються траншеями спочатку з ухилом шляхів 30%, потім 50% і, нарешті, 60%. Причому кожна траншея формує групи станцій, з яких у свою чергу відпрацьовується той чи інший напрямок. Робоча зона розкривається переважно прямими заїздами. Станції максимально пов'язані між собою, що надає гнучкість подальшого розвитку, можливість як оперативного, так і довгострокового перерозподілу вантажопотоків [25-27]. Щоб уникнути розміщення роздільних пунктів в робочій зоні і, як наслідок, стримування розвитку гірничих робіт, що характерно для багатьох кар'єрів, де застосовується залізничний транспорт, формування схеми колійного розвитку проводиться поетапно з тимчасовою консервацією бортиків. Постійна транспортна схема відбудовується поступово по мірі постановки бортиків в граничний стан. Таким чином, досвід ефективного застосування залізничного транспорту в кар'єрах дозволяє констатувати, що тенденція більш глибокого введення залізничного транспорту в кар'єри зберігається і в сучасних умовах.

Основним напрямком розвитку і вдосконалення кар'єрного транспорту вважається збільшення ухилів шляхів до 60...80%, що дозволяє збільшити глибину введення залізничного транспорту в кар'єри до 350-450 м, зменшити сумарні витрати на транспортування гірничої маси з глибини 300-350 м на 20...25%. В якості перспективного рішення деякі дослідники пропонують тунельне розкриття [26-30]. Реалізація цього проекту в сучасних умовах представляється важко здійсненою. Це пов'язано, перш за все, з тим, що він передбачає значні капітальні вкладення і великий термін будівництва тунелю, що при прийнятті рішень про розвиток транспортної системи робить цей варіант свідомо неконкурентоспроможним.

В даний час у глибоких кар'єрах широке поширення знайшли електровози і тягові агрегати з напругою 1,65 і 3,3 кВ постійного струму і 10 кВ змінного струму. Існуючі типи тягових засобів за своїм технічним рівнем і перспективним технологічним вимогам не забезпечують ефективну їх експлуатацію в глибинній зоні кар'єра.

Досить сказати, що проектні рішення щодо них формувалися в середині минулого століття. Термін експлуатації багатьох локомотивів значно перевищує нормативний. Положення не рятує серійний випуск модернізованого тягового агрегату НП-1. Нововведення, застосовані в конструкції НП-1, лише трохи полегшують експлуатацію агрегату і збільшують реалізовану силу тяги на 8%. Принципово нові локомотиви для відкритих гірських розробок створюються на основі асинхронних і індукторних тягових двигунів. Це дозволяє збільшити їх потужність на 25...30%, на 30% корисну масу і на 19% продуктивність, знизити енергетичні витрати на підйом гірничої маси на 6% при ухилах 60% і на 13% при ухилах 150%, зменшити обсяги гірничо-капітальних робіт, а також поліпшити екологічну обстановку в глибинній зоні кар'єра [16].

На круговій діаграмі (рис. 2) [8] показані залізничні перевезення рухомим складом в кар'єрах чорної металургії України. З діаграми видно що електрорухомий склад, що включає 245 електровозів та 356 тягових агрегатів, займає близько 60%, а тепловози з їх кількістю 448. Тепловози використовуються на більшості рудників Криворізького басейну [12, 23, 24].

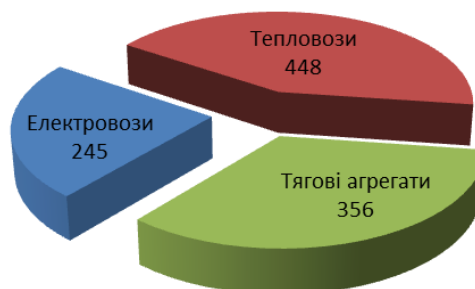


Рис. 2 – Рухомий склад кар'єрного залізничного транспорту України

Рухомий склад в кар'єрах складається з вагонів і локомотивів. Для перевезення корисних копалин широко використовуються вагони типу «гондола» вантажопідйомністю 60-90 тон і, частково, типу «хопер» вантажопідйомністю 60 тон.

У вагонів типу «гондола» дно складене з окремих щитів, що обертаються на шарнірах біля хребтової балки. Опущені щити утворюють похилі площини, за якими вантаж зсипається на обидві сторони від осі колії. Вагон типу «хопер» має похилі торцеві стінки і розвантажується через люки, розташовані нижче рами вагона. Вантаж зсипається між рейками або на бік.

Для перевезення розкривних порід застосовуються саморозвантажувальні вагони – думпкари з одностороннім або двостороннім розвантаженням. Конструкція думпкарів розрахована на сприйняття значних динамічних навантажень від падіння великих шматків породи масою 3-5 тон з висоти 1,5...3 метри (при навантаженні екскаваторами). Думпкари також широко застосовуються і для транспортування руди.

На кар'єрах ВАТ «Полтавський ГЗК» для перевезення руди і розкривних порід використовуються думпкари вантажопідйомністю 105 тон при вазі тари 45 тон. З 2010 р. ввелися в експлуатацію думпкари тієї ж вантажопідйомності, але з вагою тари вже 50 тон. Таким чином, вага одного навантаженого думпкара становить 155 тон. Розглянемо детальніше кожен з видів рухомого складу.

*Локомотиви.* В якості локомотивів в кар'єрах застосовуються електровози, тепловози і тягові агрегати. Перевагами електровозів є відносно високий ККД, висока швидкість руху на керівному підйомі, здатність подолання підйомів до 40 проміле, постійна готовність до роботи, простота обслуговування і надійна робота в суворих кліматичних умовах [1]. Недоліками електровозів є залежність від джерела енергії і значні початкові витрати на будівництво контактної мережі та тягової підстанції. Наявність контактної мережі на забійних шляхах ускладнює організацію вибухових і виймально-навантажувальних робіт.

*Тепловози.* Це локомотиви, обладнані двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ). ДВЗ, встановлений в тепловозі, забезпечує його автономність і виключає необхідність контактної мережі, вартість якої становить 12...15% загальної вартості транспортування. Тепловози мають високий ККД, рівний 24...26%, і здатні долати значні підйоми [2]. До недоліків тепловозів належить складність їх ремонту, а також значне зниження швидкості на підйом.

*Тягові агрегати.* Тягові агрегати являють собою поєднання електровоза управління, секції автономного живлення (дизельна секція) і кілька моторних думпкарів. Наявність моторних думпкарів у складі тягового агрегату дозволяє значно збільшити зчїпну вагу і корисну масу поїзда (в 2...2,5 рази в порівнянні з електровозами) або керівний підйом (до 60‰). Наявність же дизельної секції в складі тягового агрегату забезпечує можливість виключення контактної мережі на пересувних коліях [3, 22].

Тенденції розвитку промисловості свідчать про збільшення одиничної потужності застосовуваного в кар'єрах обладнання. Збільшення зчїпної ваги локомотивів тягне за собою підвищення корисної маси поїзда до 1200-1800 тон. При використанні потужних екскаваторів зменшується їх загальна кількість в кар'єрі, спрощуються схеми колійного розвитку на уступах і в кар'єрі в цілому.

Одним з поширених тягових агрегатів являється ОПЭ1А, не зважаючи на те, що він був створений в 70х роках минулого століття. Але все ж він займає своє місце в гірничій виробці. На рис. 3 представлена кругова діаграма, яка показує відсоткову частку всіх випущених моделей тягових агрегатів [12].

У кар'єрах ПрАТ «Полтавський ГЗК» використовуються: тепловози серії ТЕМ7 – маневрово-вивізні тепловози, спеціально призначені для виконання важкої маневрової роботи і вивезення гірської маси з кар'єру; тепловози ЧМЕ – маневрові тепловози. Використовується в якості локомотива господарського поїзда (робота краном, хопрами, гідромонітором), а так само для проведення маневрової роботи; електровози (тягові агрегати) ОПЭ-1А і ОПЭ-1АМ – в якості локомотива «вертушки».

Виходячи з місцевих умов, «вертушка» складається з шести думпкарів для тепловоза ТЕМ7 і дванадцяти думпкарів для електровоза ОПЭ-1АМ. На даний момент локомотивний парк ЖДЦ ВАТ «Полтавський ГЗК» має 34 локомотива, призначені для вивезення гірської маси з кар'єра, з яких тепловозів – 19, електровозів ОПЭ-1А (ОПЭ-1АМ) – 15. Але, у зв'язку з пог-

либленням кар'єра і збільшенням обсягів перевезень, перевага віддається електровозам. Так, щозміни на лінії знаходяться 12 електровозів і 6 тепловозів (рис. 4) [11].

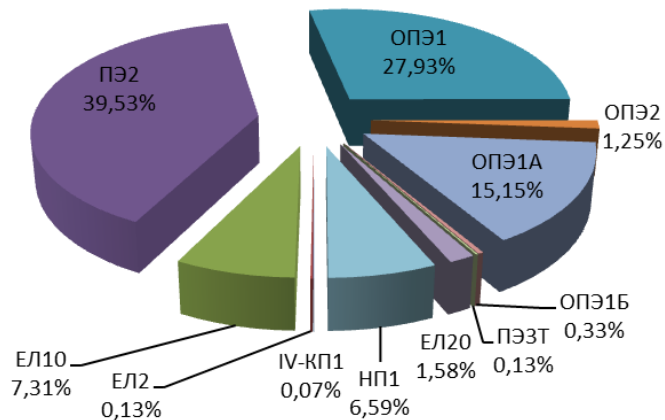


Рис. 3 – Діаграма випущених тягових агрегатів в країнах колишнього СРСР

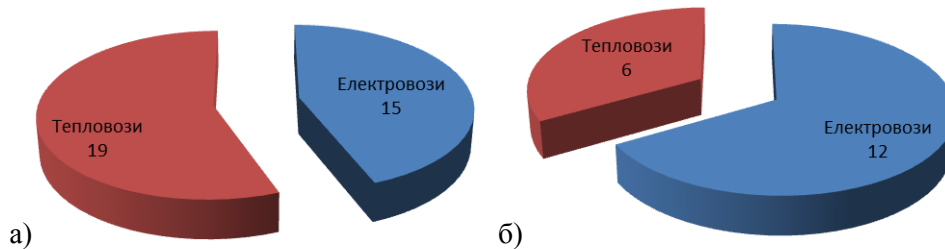


Рис. 4 – Локомотивний парк залізничного цеху ВАТ «Полтавський ГЗК»: а – локомотиви в наявності; б – локомотиви, експлуатовані на лінії

Тяговий електропривод є найбільш навантаженою частиною електровоза. На його частку припадає більша частина всіх відмов. Відмови тягового електроприводу відбуваються як через умови експлуатації, так і з-за якості ремонту.

Умови експлуатації тягових електричних машин на різних дорогах різко відрізняються не тільки умовами експлуатації, але і профілем колії (рис. 5), коливаннями напруги в контактній мережі, вантажнапруженістю та інтенсивністю руху [8-10].

Експлуатація тягового електроприводу при значних перепадах температур посилюється різними змінами швидкостей руху локомотивів, що викликають настільки ж різку зміну навантажень двигунів, їх частоти обертання, поштовхи і вібрацію. Великі навантаження, часті пуски призводять до нагрівання якірних обмоток і теплового руйнування ізоляції [31-36]. Нерівномірність існуючого зменшеного розподілу охолоджуючої кількості повітря всередині двигуна, відмінності в навантаженнях осі і діаметрів бандажів колісних пар, розбіжність швидкісних характеристик двигунів призводять до нерівномірного перегріву обмоток якоря і полюсних котушок [37].

При перевищенні допустимої температури обмоток тягового електроприводу його ізоляція стає жорсткою і крихкою і в значній мірі втрачає електричну міцність. При перегріві обмоток, летючі речовини з ізоляційних матеріалів швидко випаровуються, що призводить до утворення тріщин, розшарувань і пористості. Через неякісні ущільнення колекторних люків, повітропроводів, а також через незачинені вентиляційні отвори двигунів, конструкція яких передбачає захист від попадання снігу, всередину двигунів все-таки потрапляє вода і сніг. Також в двигунах конденсується волога і при постановці холодного локомотива в тепле приміщення.

Якщо двигуни не перебувають під навантаженням, то волога, яка в них потрапляє, поглинається ізоляцією. Проникаючи в найдрібніші тріщини і пори ізоляційного матеріалу, вона значно знижує його електричну і механічну міцність. Подібне зволоження ізоляції відбувається особливо інтенсивно при підвищенні вологості з різким збільшенням температури навколишнього середовища і часу простою електровоза в неробочому стані.





Рис. 5 – Фрагменти стану рейкового полотна і стану колісних пар: а – загальний вигляд; б – розрив; в – виїмка; г – вищербленість; д – зміна діаметра колеса; е – вищербленість колеса

Осінньо-зимовий період є найбільш несприятливим для тягових двигунів. Перепади температури, потрапляння снігу всередину двигуна через нещільності колекторних люків і повітропроводів призводять до зволоження ізоляції. Це сприяє різкому зниженню її опору.

При підвищенні температури повітря під час добових коливань температури або відлиг тяговий електродвигун нагрівається повільно. При зіткненні повітря з більш холодними частинами тягового електроприводу, повітря охолоджується, його вологоємність зменшується і надлишок водяної пари осідає на обмотках і колекторі у вигляді інею, що й призводить до намокання та руйнації ізоляції. Утворення інею залежить від швидкості зміни температури і відносної вологості повітря. Так, за температури нижче  $-20^{\circ}\text{C}$  іній не утворюється через малий перепад температури. Проте за температури  $5...6^{\circ}\text{C}$  достатньо 6 годин для утворення інею [31, 34]. Для запобігання його утворення перед постановкою в опалювальний цех тяговий двигун потрібно підігрівати. Для цього використовується метод підігріву тягових двигунів від вентиляторів електровозів. Перед тим, як поставити електровоз в цех, включають вентилятори і двигуни підігриваються до температури в цеху. І тільки після цього встановлюють в цех.

Окремі пошкодження якорів тягових двигунів відбуваються через неправильні режими керування локомотивом, що призводить до боксування колісних пар, перевантаження тягових електричних машин. Котушки головних і додаткових полюсів виходять з ладу в результаті потрапляння вологи в остова через неякісні їх ущільнення, а також ослаблення кріплення полюсних котушок на сердечниках. В процесі експлуатації тягові електродвигуни (ТЕД) піддаються значним динамічним навантаженням, що, в першу чергу, негативно позначається на роботі вузла щіткотримачів і стані робочої поверхні колектора, а в кінцевому підсумку призводить до підвищеного іскріння під щітками, погіршення комутації, утворення кругового вогню по колектору і виникненню електричної дуги.

Аналіз літератури [33-38] з оцінки технічного стану локомотивів і визначення надійності їх роботи показав, що найбільш пошкоджуваним вузлом є саме ТЕД. Найбільша кількість виходів з ладу ТЕД приходить на пробій ізоляції (рис. 6, а). Здебільшого це визначається саме складними умовами їх експлуатації: перевантаженнями, комутаційними перенапруженнями, зволоженням тощо [35]. Так, найбільша кількість виходів з ладу ТЕД через пробій ізоляції спостерігається в період перепаду температур, коли сильно зростає ймовірність зволоження обмоток через попадання вологи в електродвигун. Відсоток причин виходу з ладу ТЕД кар'єрних електровозів дещо інший (рис. 6, б).

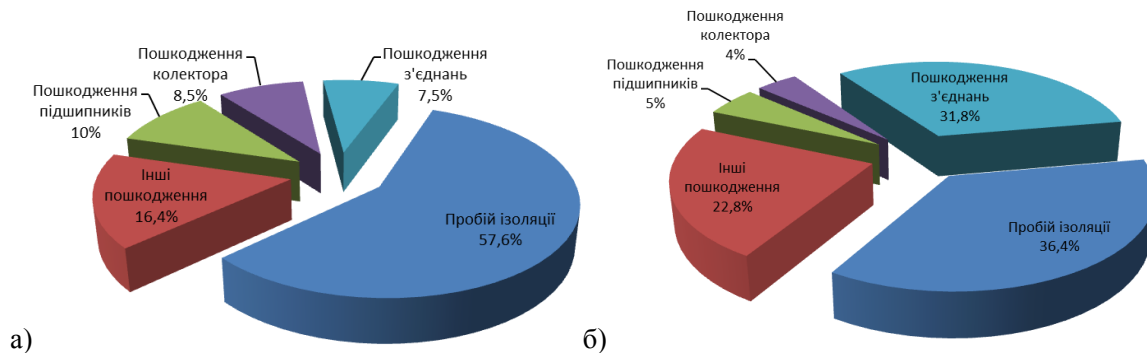


Рис. 6 – Розподіл відмов ТЕД: а – магістральних електровозів, б – кар'єрних електровозів

Як показує аналіз, число виходів з ладу тягових електроприводів кар'єрних електровозів при пробі ізоляції дещо менший в порівнянні з магістральними електровозами, але при цьому збільшується кількість відмов при пошкодженні механічних з'єднань тягового електропривода, включаючи й обрив валу двигуна.

### Висновки

Наведені вище особливості технологічного процесу транспортування, умови експлуатації та керування системами електроприводів обумовлюють актуальність проведення поглиблених досліджень режимів роботи тягового електроприводу електровозів, створення математичних моделей та методів їх аналізу для розроблення заходів з контролю електричних параметрів тягових двигунів, їх керуванням при зміні умов зчеплення для забезпечення підвищення його експлуатаційних показників. Це потребує вирішення наступних задач: аналіз стану електромеханічного обладнання та режимів роботи тягових електроприводів кар'єрних електровозів; аналізу систем контролю та моніторингу стану електромеханічного обладнання електровозів; аналізу роботу тягового електропривода з урахуванням нерівності параметрів двигунів та геометрії колісних пар; розрахунків ймовірності аварійної роботи тягового електроприводу; розробки системи контролю за параметрами тягового електропривода; розробки математичних моделей для комплексного дослідження тягового електропривода з урахуванням пробоксовування колеса по рейках, а також проведення експериментальних досліджень режимів роботи тягового електропривода з імітацією процесу боксування.

### Перелік використаних джерел:

1. Ющенко А.И. Справочник машиниста рудничного локомотива / А.И. Ющенко, В.П. Гудалов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Недра, 1981. – 200 с.
2. Долгов В.А. Тепловозы ТЗМ1 и ТЗМ2 / В.А. Долов. – М. : Транспорт, 1972. – 256 с.
3. Симсон А.З. Двигатели внутреннего сгорания (тепловозные двигатели и газотурбинные установки) / А.З. Симсон. – М. : Транспорт, 1980. – 384 с.
4. Дьомін Ю.В. Залізнична техніка міжнародних транспортних систем (вантажні перевезення) / Ю.В. Дьомін. – К. : Юнікон – Пресс, 2001. – 342 с.
5. Расчет и проектирование механической и пневматической частей тормозов вагонов : учебное пособие / П.С. Анисимов, В.А. Юдин, А.Н. Шамаков, С.Н. Коржин; под общ. ред.



- П.С. Анисимова. – М. : Маршрут, 2005. – 248 с.
6. Асадченко В.Р. Автоматические тормоза подвижного состава : учебное пособие / В.Р. Асадченко. – М. : Маршрут, 2006. – 392 с.
  7. Бабаев А.М. Принцип дії, розрахунки та основи експлуатації гальм рухомого складу залізниць : навчальний посібник / А.М. Бабаев, Д.В. Дмитрієв. – К. : ДЕТУТ, 2007. – 176 с.
  8. Курган М.Б. Залежність експлуатаційних витрат від рівня швидкості на ділянках, що обмежують рух поїздів / М.Б. Курган, О.С. Маркова // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: тези 66-ї Міжн. наук.-практ. конф. – Дніпропетровськ, 2006. – С. 211-212.
  9. Курган М.Б. Втрати часу руху поїздів на ділянках обмеження швидкості / М.Б. Курган, О.С. Маркова // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: тези 67-ї Міжнародної наук.-практ. конф. – Дніпропетровськ, 2007. – С. 206-207.
  10. Курган М.Б. Фактори, що впливають на першочерговість усунення обмежень швидкості руху поїздів, пов'язаних зі станом залізничної колії / М.Б. Курган, О.С. Чернишова // Проблеми механіки залізничного транспорту: тези доп. 12-ї Міжн. наук. конф. – Дніпропетровськ, 2008. – С. 90.
  11. Транспорт на горных предприятиях / Под общ. ред. проф. Б.А. Кузнецова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Недра, 1976. – 552 с.
  12. Ярмолюк В.Т. Основи гірничої справи / В.Т. Ярмолюк. – К. : Либідь, 2000. – 280 с.
  13. Про залізничний транспорт : Закон України від 04.07.1996 № 273/96-ВР зі змінами і доповненнями станом на 2005 рік // Відомості Верховної Ради (ВВР). – 1996. – № 40. – Ст. 184. – Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/273/96-%D0%B2%D1%80#Text>.
  14. Кірпа Т.М. Залізниця України / Т.М. Кірпа, О.М. Пшінько, І.В. Агієнко. – Дніпропетровськ : Арт-Пресс, 2001. – 328 с.
  15. Кушнірчук В.Г. Перевезення вантажів залізничним транспортом: довідник / В.Г. Кушнірчук, В.І. Петров. – К. : Основа, 2001. – 512 с.
  16. Смоляницький Д.М. Организация работы шахтного транспорта / Д.М. Смоляницький. – К. : Техника, 1980. – 253 с.
  17. Статут залізниць України. – К. : Транспорт України, 1998. – 83 с.
  18. Шахтный электровозный транспорт. Теория, конструкции, электрооборудование : учебник / О.Н. Синчук, Э.С. Гузов, В.Л. Дебелый, Л.Л. Дебелый; под ред. О.Н. Синчука. – Кривой Рог-Донецк : ЧП А.В. Щербатых, 2015. – 428 с.
  19. Автомобили-самосвалы / В.Н. Белокуров [и др.]; под общ. ред. А.С. Мелик-Саркисянца. – М. : Машиностроение, 1987. – 216 с.
  20. Основы теории автотранспортных систем (Грузовые автомобильные перевозки) / В.И. Николлин, Е.Е. Витвицкий, С.М. Мочалин, Н.И. Ланьков. – Омск : Изд-во ОмГПУ, 1999. – 281 с.
  21. Гришкевич А.И. Автомобили: Теория / А.И. Гришкевич. – М. : Высшая школа, 1986. – 208 с.
  22. Закин Я.Х. Маневренность автомобиля и автопоезда / Я.Х. Закин. – М. : Транспорт, 1986. – 136 с.
  23. Теоретические и практические аспекты строения архитектур современных тяговых электромеханических комплексов шахтных электровозов : кол. монография : в 2-х т. Т. 1. Тяговые электромеханические комплексы постоянного тока / О.Н. Синчук, Ф.И. Караманиц, В.Л. Дебелый, В.О. Черная, В.А. Федотов, Д.О. Кальмус, О.А. Удовенко, С.Н. Якимец, А.Б. Семочкин, Л.В. Сменова; под ред. О.Н. Синчука. – Кривой Рог : ЧП А.В. Щербатых, 2018. – 192 с.
  24. Теоретические и практические аспекты строения архитектур современных тяговых электромеханических комплексов шахтных электровозов: кол. монография : в 2-х т. Т. 2. Тяговые электромеханические комплексы переменного тока / И.О. Синчук, Ф.И. Караманиц, В.Л. Дебелый, И.А. Козакевич, В.А. Федотов, Л.В. Сменова, А.В. Омельченко, Д.А. Шокарев; под ред. О.Н. Синчука. – Кривой Рог : ЧП А.В. Щербатых, 2018. – 2 т. – 184 с.
  25. Лукин В.В. Вагоны : общий курс / В.В. Лукин, П.С. Анисимов, Ю.П. Федосеев. – М. : Маршрут, 2004. – 424 с.
  26. Інструкція з організації руху вантажних поїздів підвищеної ваги й довжини на залізницях. – К. : Транспорт України, 2000. – 43 с.
  27. Типовий технологічний процес роботи вантажної станції ЦД 0017. – К. : ДАЗТ, 2004. – 262 с.

28. Нормативні акти з безпеки руху поїздів. – К. : Транспорт України, 2002. – 142 с.
29. Інструкція з оперативного планування поїзною і вантажною роботою. – К. : Транспорт України, 2004. – 40 с.
30. Інструкція з розрахунків пропускної спроможності залізниць України ЦД 0036. – К. : Транспорт України, 2002. – 375 с.
31. Організація технологічних процесів ремонту ТРС із застосуванням засобів діагностування / В.Г. Пузир, О.С. Крашенінін, І.Г. Крамчанін, А.П. Фалендиш // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. – 2004. – Вип. 57. – С. 31-34.
32. Тартаковський Е.Д. Технологія передрейсового контролю локомотивів і локомотивних бригад / Е.Д. Тартаковський, В.Г. Пузир // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. – 2002. – Вип. 49. – С. 75-79.
33. Пузир В.Г. Вибір аналітичної моделі для оцінювання якості управління локомотивом / В.Г. Пузир, І.В. Ремез // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. – 2004. – Вип. 64. – С. 164-171.
34. Диагностика изоляции тяговых электродвигателей электровозов на основе наноинтерферометрических оптоволоконных датчиков / М.Н. Петров, А.И. Орленко, О.А. Терегулов, Э.В. Лукьянов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2013. – № 15. – С. 139-141.
35. Авилов В.Д. Контроль технического состояния и оценка ресурса тяговых двигателей и колесно-моторных блоков подвижного состава / В.Д. Авилов, В.В. Харламов, В.Н. Костюков // Сборник научных работ ОАО «РЖД». – 2006. – С. 28-32.
36. Діагностування тягових електродвигунів за нерівномірністю обертання якоря / Б.С. Бондар, О.Б. Очкасов, Д.В. Черняєв, І.Я. Шевченко // Наука та прогрес транспорту. – 2013. – Вип. 3 (45). – С. 13-21.
37. Афанасов А.М. Повышение энергетической эффективности испытаний тяговых электромашин постоянного и пульсирующего тока / А.М. Афанасов // Електротехніка і електромеханіка. – 2015. – № 1. – С. 12-15. – Режим доступа : DOI: 10.20998/2074-272X.2015.1.02.
38. Афанасов А.М. Розвиток наукових основ та вдосконалення енергоефективних методів випробування тягових електричних машин постійного та пульсуючого струму : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.09, 05.22.12 / Афанасов Андрій Михайлович. – Дніпропетровськ, 2013. – 39 с.

**References:**

1. Iushchenko A.I., Gudalov V.P. *Sravochnik mashinista rudnichnogo lokomotiva* [Mine locomotive driver's guide]. Moscow, Nedra Publ., 1981. 200 p. (Rus.)
2. Dolgov V.A. *Teplovozy TZM1 i TZM2* [Diesel locomotives TZM1 and TZM2]. Moscow, Transport Publ., 1972. 256 p. (Rus.)
3. Simson A.Z. *Dvigateli vnutrennego sgoraniia (teplovoznye dvigateli i gazoturbinnye ustanovki)* [Internal combustion engines (diesel engines and gas turbines)]. Moscow, Transport Publ., 1980. 384 p. (Rus.)
4. D'omin Iu.V. *Zaloznichna tekhnika mizhnarodnikh transportnikh sistem (vantazhni perevezennia)* [Railway equipment of international transport systems (freight transportation)]. Kiev, Iunikon – Press Publ., 2001. 342 p. (Ukr.)
5. Anisimov P.S., Iudin V.A., Shamakov A.N., Korzhin S.N. *Raschet i proektirovanie mekhanicheskoi i pnevmaticheskoi chastei tormozov vagonov: ucheb. posobie* [Calculation and design of mechanical and pneumatic parts of car brakes: textbook]. Moscow, Marshrut Publ., 2005. 248 p. (Rus.)
6. Asadchenko V.R. *Avtomaticheskie tormoza podvizhnogo sostava: ucheb. posobie* [Automatic brakes of rolling stock: textbook]. Moscow, Marshrut Publ., 2006. 392 p. (Rus.)
7. Babaev A.M., Dmitriev D.V. *Printsip dii, rozrakhunki ta osnovi ekspluatatsii gal'm rukhomogo skladu zaloznits'*: *navch.posibnik* [Principle of operation, calculations and bases of operation of brakes of a rolling stock of railways: textbook]. Kiev, DETUT Publ., 2007. 176 p. (Ukr.)
8. Kurgan M.B., Markova O.S. *Zalezhnist' ekspluatatsiynikh vitrat vid rivnia shvidkosti na diliankakh, shcho obmezhuut' rukh poizdiv. Tezi 66 Mizhn. Nauk.-prakt. konf. «Problemi ta perspektivi rozvitku zaloznichnogo transportu»* [Dependence of operating costs on the level of speed in areas that

- limit the movement of trains. Proceedings of the 66-th Int. sci.-pract. Conf. «Problems and prospects for the development of railway transport». Dnipropetrovsk, 2006, pp. 211-212. (Ukr.)
9. Kurgan M.B., Markova O.S. Vtrati chasu rukhu poїzdiv na diliankakh obmezhenia shvidkosti. *Tezi 67 Mizhn. Nauk.-prakt. konf. «Problemi ta perspektivi rozvitku zaliznichnogo transportu»* [Loss of train travel time in speed limit areas. Proceedings of the 67-th Int. sci.-pract. Conf. «Problems and prospects for the development of railway transport»]. Dnipropetrovsk, 2007, pp. 206-207. (Ukr.)
  10. Kurgan M.B., Chernishova O.S. Faktori, shcho vplivaiut' na pershochergovist' usunennia obmezen' shvidkosti rukhu poїzdiv, pov'iazanikh zi stanom zaliznichnoi kolii. *Tezi 12 Mizhn. nauk. konf. «Problemi mekhaniki zaliznichnogo transportu»* [Factors influencing the priority of removing train speed restrictions related to the condition of the railway track. Proceedings of the 12-th Int. sci. Conf. «Problems of railway transport mechanics»]. Dnipropetrovsk, 2008, pp. 90. (Ukr.)
  11. Ed. by prof. Kuznetsov B.A. *Transport na gornykh predpriatiiakh* [Mining transport]. Moscow, Nedra Publ., 1976. 552 p. (Rus.)
  12. Iarmoliuk V.T. *Osnovi girnichoї spravi* [Fundamentals of mining]. Kiev, Libid' Publ., 2000. 280 p. (Ukr.)
  13. *Zakon Ukraїni 273/96-VR. Pro zaliznichnii transport* [Law of Ukraine 273/96-VR. About railway transport]. Vidomosti Verkhovnoi Radi Publ., 1996, no. 40, art. 184. (Ukr.)
  14. Kirpa T.M., Pshin'ko O.M., Agienko I.V. *Zaliznitsi Ukraїni* [Railways of Ukraine]. Dnipropetrovsk, Art-Press Publ., 2001. 328 p. (Ukr.)
  15. Kushnirchuk V.G., Petrov V.I. *Perevezennia vantazhiv zaliznichnim transportom: dovidnik* [Transportation of goods by rail: a guide]. Kiev, Osnova Publ., 2001. 512 p. (Ukr.)
  16. Smolianitskii D.M. *Organizatsiia raboty shakhtnogo transporta* [Organization of work of mine transport]. Kiev, Tekhnika Publ., 1980. 253 p. (Rus.)
  17. *Statut zaliznits' Ukraїni* [Charter of the Railways of Ukraine]. Kiev, Transport Ukraїni Publ., 1998. 83 p. (Ukr.)
  18. Sinchuk O.N., Guzov E.S., Debelyi V.L., Debelyi L.L. *Shakhtnyi elektrovoznyi transport. Teoriia, konstruksii, elektrooborudovanie : uchebnik* [Mine electric locomotive transport. Theory, designs, electrical equipment: textbook]. Kryvyi Rih-Donetsk, ChP A.V. Shcherbatykh Publ., 2015. 428 p. (Rus.)
  19. Belokurov V.N., Gladkov O.V., Zakharov A.A., Melik-Sarkis'iants A.S. *Avtomobili-samosvaly* [Dump trucks]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 216 p. (Rus.)
  20. Nikolin V.I., Vitvitskii E.E., Mochalin S.M., Lan'kov N.I. *Osnovy teorii avtotransportnykh sistem (Gruzovye avtomobil'nye perezozki)* [Fundamentals of the theory of road transport systems (Freight road transport)]. Omsk, OmGPU Publ., 1999. 281 p. (Rus.)
  21. Grishkevich A.I. *Avtomobili: Teoriia* [Cars: Theory]. Moscow, Vysshiaia shkola Publ., 1986. 208 p. (Rus.)
  22. Zakin Ia.Kh. *Manevrennost' avtomobilia i avtopoezda* [Vehicle and road train maneuverability]. Moscow, Transport Publ., 1986. 136 p. (Rus.)
  23. Sinchuk O.N., Karamanits F.I., Debelyi V.L., Chernaia V.O., Fedotov V.A., Kal'mus D.O., Udovenko O.A., Iakimets S.N., Semochkin A.B., Smenova L.V. *Teoreticheskie i prakticheskie aspekty stroeniia arkhitektur sovremennykh tiagovykh elektromekhanicheskikh kompleksov shakhtnykh elektrovozov: kol. monografiia: v 2-kh t. Tom 1. Tiagovye elektromekhanicheskie komplekсы postoiannogo toka* [Theoretical and practical aspects of the structure of the architecture of modern traction electromechanical complexes of mine electric locomotives: col. monograph: in 2 vol. Vol. 1. Traction electromechanical complexes of direct current]. Krivoi Rog, ChP A.V. Shcherbatykh Publ., 2018. 192 p. (Rus.)
  24. Sinchuk I.O., Karamanits F.I., Debelyi V.L., Kozakevich I.A., Fedotov V.A., Smenova L.V., Omel'chenko A.V., Shokarev D.A. *Teoreticheskie i prakticheskie aspekty stroeniia arkhitektur sovremennykh tiagovykh elektromekhanicheskikh kompleksov shakhtnykh elektrovozov: kol. monografiia: v 2-kh t. Tom 2. Tiagovye elektromekhanicheskie komplekсы peremennogo toka* [Theoretical and practical aspects of the structure of the architecture of modern traction electromechanical complexes of mine electric locomotives: col. monograph: in 2 vol. Vol. 2. AC traction electromechanical complexes]. Krivoi Rog, ChP A.V. Shcherbatykh Publ., 2018. 184 p. (Rus.)

25. Lukin V.V., Anisimov P.S., Fedoseev Iu.P. *Vagony: obshchii kurs* [Wagons: general course]. Moscow, Marshrut Publ., 2004. 424 p. (Rus.)
26. *Instruktsiia z organizatsii rukhu vantazhnikh poїzdiv pidvishchenoi vagi i dovzhini na zaliznitsiakh* [Instruction on the organization of movement of freight trains of the increased weight and length on railways]. Kiev, Transport Ukraїni Publ., 2000. 43 p. (Ukr.)
27. *Tipovii tekhnologichnii protses roboti vantazhnoi stantsii TsD 0017* [Typical technological process of cargo station CD 0017]. Kiev, DAZT Publ., 2004. 262 p. (Ukr.)
28. *Normativni akti z bezpeki rukhu poїzdiv* [Regulations on train safety]. Kiev, Transport Ukraїni Publ., 2002. 142 p. (Ukr.)
29. *Instruktsiia z operativnogo planuvannia poїznoiu i vantazhnoiu robotoiu* [Instructions for operational planning of train and freight work]. Kiev, Transport Ukraїni Publ., 2004. 40 p. (Ukr.)
30. *Instruktsiia z rozrakhunkiv propusknoi spromozhnosti zaliznits' Ukraїni TsD 0036* [Instruction on calculations of capacity of the railways of Ukraine CD 0036]. Kiev, Transport Ukraїni Publ., 2002. 375 p. (Ukr.)
31. Puzir V.G., Krashenin O.S., Kramchanin I.G., Falendish A.P. Organizatsiia tekhnologichnikh protsesiv remontu TRS iz zastosuvanniam zasobiv diagnostuvannia [Organization of technological processes of TRS repair with the use of diagnostic tools]. *Zbirnik naukovikh prats' UkrDAZT – Collection of scientific works of UkrDAZT*, 2004, vol. 57, pp. 31-34. (Ukr.)
32. Tartakovskii E.D., Puzir V.G. Tekhnologiiia peredreisovogo kontroliu lokomotiviv i lokomotivnikh brigad [Technology of pre-trip control of locomotives and locomotive crews]. *Zbirnik naukovikh prats' UkrDAZT – Collection of scientific works of UkrDAZT*, 2002, vol. 49, pp. 75-79. (Ukr.)
33. Puzir V.G., Remez I.V. Vibir analitichnoi modeli dlia otsiniuvannia iakosti upravlinnia lokomotivom [Selection of an analytical model for assessing the quality of locomotive control]. *Zbirnik naukovikh prats' UkrDAZT – Collection of scientific works of UkrDAZT*, 2004, vol. 64, pp. 164-171. (Ukr.)
34. Petrov M.N., Orlenko A.I., Teregulov O.A., Luk'ianov E.V. Diagnostika izoliatsii tiagovykh elektrodvigatelei elektrovozov na osnove nano-interferometricheskikh optovolokonnykh datchikov [Diagnostics of the insulation of traction electric motors of electric locomotives based on nano-interferometric fiber-optic sensors]. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovanii – International Journal of Applied and Basic Research*, 2013, no. 15, pp. 139-141. (Rus.)
35. Avilov V.D., Kharlamov V.V., Kostiukov V.N. Kontrol' tekhnicheskogo sostoianii i otsenka resursa tiagovykh dvigatelei i kolesno-motornykh blokov podvizhnogo sostava [Monitoring the technical condition and assessing the resource of traction motors and wheel-motor units of rolling stock]. *Sbornik nauchnykh rabot OAO «RZhD» – Collection of scientific works of JSC «Russian Railways»*, 2006, pp. 28-32. (Rus.)
36. Bondar B.C., Ochkasov O.B., Cherniaev D.V., Shevchenko I.Ia. Diagnostuvannia tiagovykh elektrodviguniv za nerivnomirnistiu obertannia iakoria [Diagnosis of traction motors by uneven rotation of the armature]. *Nauka ta progres transport – Science and Transport Progress*, 2013, vol. 3 (45), pp. 13-21. (Ukr.)
37. Afanasov A.M. Povyshenie energeticheskoi effektivnosti ispytanii tiagovykh elektromashin postoiannogo i pul'siruiushchego toka [Increasing the energy efficiency of testing DC and pulsating traction electric machines]. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical Engineering & Electromechanics*, 2015, no. 1, pp. 12-15. doi: 10.20998/2074-272X.2015.1.02. (Rus.)
38. Afanasov A.M. *Rozvitok naukovikh osnov ta vdoskonalennia energoefektivnikh metodiv viprobuvannia tiagovykh elektrichnikh mashin postiinogo ta pul'suiuchogo strumu*. Avtoref. diss. dokt. techn. nauk [Development of scientific bases and improvement of energy-efficient methods of testing traction electric machines of direct and pulsating current. Thesis of Doct. tech. sci. diss.]. Dnipropetrovsk, 2013. 39 p. (Ukr.)

Рецензент: С.К. Поднебенна  
канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 19.10.2020