

УДК 333.3

В. І. Данилевський, к.т.н., доцент

(доцент кафедри «Тяговий рухомий склад залізниць» Державного економіко-технологічного університету транспорту)

В. М. Тарасюк

(аспірант кафедри «Тяговий рухомий склад залізниць» Державного економіко-технологічного університету транспорту, заступник головного технолога, ПрАТ «Київський ЕВРЗ»)

В. В. Данилевський

(аспірант кафедри «Аеропорти» Національного транспортного університету)

ЗАСТОСУВАННЯ СУЧАСНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ КЛАСУ НАГРІВОСТІЙКОСТІ F, H І C

У статті проведений аналіз технічного стану тягових електричних машин електрорухомого складу, визначені основні напрями їх модернізації, а також ризики, які виникають у процесі модернізації, на прикладі тягового двигуна ТЛ-2К електровозів постійного струму.

Ключові слова: *тягові електричні двигуни, системи електроізоляційних матеріалів, капітальний ремонт тягових двигунів.*

В статье проведен анализ технического состояния тяговых электрических машин электроподвижного состава, определены основные направления их модернизации, а также риски, которые могут возникать в процессе модернизации, на примере тягового двигателя ТЛ-2К электровозов постоянного тока.

Ключевые слова: *тяговые электродвигатели, системы электроизоляционных материалов, капитальный ремонт тяговых двигателей.*

На магістральних коліях залізничного транспорту України експлуатується тяговий і моторвагонний рухомий склад: електровози, тепловози, електропотяги, дизельпотяги з електричним приводом.

Тягову силу створюють тягові агрегати, які складаються із тягових двигунів, колісних пар і передавального пристрою. Основою тягового агрегату, безумовно, є тяговий двигун, від надійної роботи якого залежить робота всього рухомого складу.

Вимоги до систем електроізоляційних матеріалів. Актуальність питання оптимізації застосування електроізоляційних матеріалів зумовлена особливою важливістю та гостротою проблеми якості ремонту тягових електричних машин,

© Данилевський В. І., Тарасюк В. М., Данилевський В. В., 2015

від надійності яких у великій мірі залежить кількість несправностей і, нарешті, безпека руху потягів.

Тягові електричні двигуни (ТЕД) відносяться до найбільш навантаженого обладнання рухомого складу з точки зору комплексної дії теплових, електричних, механічних та кліматичних факторів та повинні відповідати вимогам ГОСТ2582-81 та ГОСТ 15150-69.

Основні вимоги до сучасних систем електричної ізоляції можна класифікувати за наступними критеріями:

- 1) термічні – високий температурний індекс, стійкість до змін температури, висока теплопровідність;
- 2) фізико-механічні – абразивна стійкість (до пилу), висока міцність при розтягуванні, стискуванні, зрушенні та стійкість до вібрації;
- 3) електричні і діелектричні – висока електрична міцність, стійкість до тривалої дії електричної напруги, низький тангенс кута діелектричних втрат;
- 4) інші – вологостійкість, стійкість до хімічного впливу, стійкість до радіації.

Впливи на ізоляцію починаються вже в процесі її виготовлення. Ці впливи є короткочасними, проте їх рівень може значно перевищувати експлуатаційний.

Основні види впливів на ізоляцію в процесі виготовлення:

- 1) тепловий – багаторазове підвищення температури;
- 2) механічний – деформації в процесі виготовлення і укладання обмоток електричних машин, що складно контролювати;
- 3) електричний – дія випробувальною напругою.

В процесі експлуатації продовжуються дії на ізоляцію, ці дії носять довготривалий характер, при цьому відбувається так зване накопичення «втоми» ізоляції.

Серед основних впливів на ізоляцію в процесі експлуатації:

- 1) теплові – циклічні зміни об'єму, що призводять до появи тріщин і зсуву стрічок; перегріву, що призводять до теплового пробою і руйнування ізоляції;
- 2) механічні – електромеханічні і магнітні сили (пуск, холостий хід, скидання навантаження, ін.); електромагнітні обертання; температурні деформації; динамічний вигин, розтягування стискування, зім'яття внаслідок ударної вібрації. Всі ці чинники призводять до руйнування монолітності ізоляції;
- 3) електричні – часткові розряди в порожнечах (бомбардування твердої ізоляції, локальне розігрівання до 1000° С на ділянці, хімічна дія (озон, азотна кислота); поверхневі розряди (ковзаючі розряди, ковзаючі іскри, дуга по лобовій частині);
- 4) хімічні – вплив води (набухання ізоляції); активні речовини (зростання твердості, крихкості);
- 5) інші – сторонні включення (феромагнітні частки).

З огляду на вищезгадані фактори основною вимогою, що пред'являється до ізоляційних матеріалів, технології виготовлення і конструювання, є здатність ізоляції в межах необхідного ресурсу протистояти вказаному вище комплексу дій та впливів.

Крім того, при розробці нових систем ізоляції пред'являються вимоги максимального використання властивостей ізоляційних матеріалів шляхом збільшення потужності в одиниці об'єму, а також допустимої температури нагріву обмоток.

Сучасна технологія виготовлення обмоток тягових електродвигунів включає такі основні стадії:

– виготовлення моноблоків основного і додаткового полюсів: ізолювання обмоток непросоченими слюдинітовими стрічками з подальшим просоченням епоксидним компаундом у вакуумі і під тиском. Іноді використовується окреме просочення котушок компаундом (лаком) з подальшим укріпленням їх на осердях полюсів;

– виготовлення ізоляції компенсаційних котушок: ізолювання обмоток просоченими слюдинітовими стрічками на основі поліефірно-епоксидної зв'язуючої речовини з подальшим укладанням в пази полюсів, де відбувається твердіння за допомогою струму в остові двигуна;

– виготовлення ізоляції якоря: ізолювання обмоток просоченими слюдинітовими стрічками на основі епоксидно-поліефірної зв'язуючої речовини з подальшим просоченням в компаунді або лаку у вакуумі і під тиском.

На сьогодні основними напрямками технології виготовлення ізоляції електричних машин є:

- 1) вакуум-нагнітальне просочення (VPI);
- 2) ізоляція на основі просочених стрічок (Resin Rich);
- 3) змішана технологія.

При застосуванні технології вакуум-нагнітального просочення (VPI) в якості основної ізоляції використовуються склослюдинітові стрічки з низьким вмістом зв'язуючої речовини (до 3 – 5 %, так звані сухі стрічки) або склослюдинітові стрічки з підвищеною кількістю зв'язуючої речовини (до 10 %, так звані напів-просочені стрічки). В якості просочувального складу матеріали застосовуються різні лаки або компаунди. Технологічний процес складається з просочення під вакуумом і тиском і термообробки у вільному стані.

При виготовленні ізоляції з просочених стрічок (Resin Rich) застосовуються просочені склослюдинітові стрічки із кількістю зв'язуючої речовини в межах 25 – 30 %. Технологічний процес полягає в механічному опресовуванні котушок і термообробці при підвищеній температурі або гідростатичному опресовуванні в бітумі і термообробці при підвищеній температурі.

При застосуванні змішаної технології в якості основної ізоляції застосовується комбінована ізоляція (сухі або просочені склослюдинітові стрічки), лаки або компаунди в якості просочувальних матеріалів. Технологічний процес полягає в просоченні під вакуумом і тиском, термообробці у вільному стані.

Найбільш поширеним способом просочення в компаундах ізоляції обмоток електричних машин, ефективність якого не викликає сумнівів і підтверджена десятиліттями виробничої і експлуатаційної практики, є вакуум-нагнітальний. В основі цього технологічного процесу лежать методи видалення повітря з капілярно-пористої структури ізоляційної конструкції в результаті глибокого вакуумування і подальшого її заповнення просочувальним складом під дією надлишкового тиску.

Численні експериментальні дослідження показують, що за умови оптимальних технологічних параметрів вакуум-нагнітальне просочення забезпечує вміст компаунда в системах ізоляції на основі не просочених стрічок ~ 38 – 42 %, а також додаткове насичення (в середньому до 4-6 %) систем ізоляції із просоченими стрічками. Це зумовлює формування монолітних ізоляційних структур, з високими функціональними властивостями.

В якості альтернативи вакуум-нагнітального просочення пропонується ультразвукове просочення (УЗП), що використовує здатність ультразвукових коли-

вань витіснити повітря з капілярів і одночасно забезпечувати прискорене просування ним просочувального складу.

Проте, за даними досліджень, проведених ВЕЛНДІ (м. Новочеркаськ, РФ), при препаруванні ізоляції демонтованої обмотки якоря, виготовленої із застосуванням УЗП, встановлено, що у більш ніж 50 % котушок ізоляція напівпакетів і виткові ізоляції просочені не повністю, а розбіг значень кількості зв'язуючої речовини в їх корпусній ізоляції складає від 8 % (верхній шар) до 12 % (нижній шар).

У випадку вакуум-нагнітального просочення отримано повне просочення ізоляції (включаючи виткові) всіх обстежених котушок, при невідповідності значень процентного вмісту, проти нормативних, зв'язуючої речовини в корпусній ізоляції не більше 4 %, що є наслідком рівномірного розподілу рушійної сили вакуум-нагнітального просочення (гідростатичний тиск) по поверхні якоря.

Таким чином, проведені дослідження показали, що технологічний процес УЗП в компаунді не забезпечує повного і рівномірного заповнення просочуючим складом ізоляції котушок, а її показники електричної міцності поступаються аналогічній системі ізоляції, просоченої вакуум-нагнітаючим способом.

На сьогодні в практиці провідних світових виробників електроізоляційних матеріалів – проведення всебічних досліджень властивостей нових матеріалів, по яких ще не накопичився належний досвід експлуатації та надання пропозицій комплексу електроізоляційних матеріалів для основних груп електричних машин і апаратів, що мають необхідні властивості.

Стандартний комплекс експериментальних досліджень, що проводяться при розробці нових систем ізоляції, включає:

- оцінку електрофізичних і технологічних параметрів всіх електроізоляційних матеріалів, що входять в дану систему ізоляції;
- багатофакторні випробування вибраних систем ізоляції і конструкцій обмоток тягових електродвигунів;
- рівень зміни основних характеристик ізоляційної системи двигуна під впливом експлуатаційних навантажень (електричне поле, температура, механічні і кліматичні навантаження). Цей параметр визначається або в процесі експлуатації тягових електродвигунів за певний період, або за допомогою імітації цих навантажень шляхом ресурсних випробувань двигуна.

Крім того, одним із найважливіших параметрів, що характеризують надійність системи ізоляції ТЕД є теплопровідність: чим більше коефіцієнт теплопровідності конструкції системи ізоляції електричної машини, тим більше надійна ця конструкція в експлуатації.

Випробування, проведені ВЕЛНДІ (м. Новочеркаськ, РФ) з досліджень теплопровідності різних систем ізоляції свідчать про те, що найменший коефіцієнт теплопровідності мають конструкції на основі мікастрічок (0,06-0,9 Вт/м*град), дещо вище цей показник (0,06-0,12 Вт/м*град) у систем ізоляції на основі просочених слюдинітових стрічок (типу ЛСК-110), найкращою із випробуваних систем була система на основі непросочених стрічок (типу ЛСКН-160 ТТ) (0,11-0,25 Вт/м*град).

Основною причиною низької теплопровідності ізоляційної конструкції є наявність локальних повітряних включень між провідником та ізоляцією та між шарами ізоляції.

Таким чином, при розробці нових систем ізоляції ТЕД основну увагу необхідно приділяти розробці просочувальних складів. Крім того, технічні вимоги до електроізоляційних матеріалів відрізняються за класом нагрівостійкості, в залежності від вимог конструкторської документації.

Усім викладеним вимогам повинні відповідати системи ізоляції, що застосовуються при ремонті ТЕД.

Аналіз використання систем електричної ізоляції і наявності необхідного технологічного обладнання на підприємствах по ремонту тягових електричних машин в Україні.

Існуюча конструкторська документація, Правила ремонту електричних машин електровозів і електропоїздів передбачають використання ізоляції на основі стрічок слюдинітових просочених (ЛСК-110, ЛСЕК-5, ЛСЕП-934) та просочувальних лаків (ФЛ-98, ПЕ-9180 (ПЕ-933), КО-916), епоксидно-ангідридного компаунду ПК-11 (в залежності від класу нагрівостійкості).

Основні недоліки систем ізоляції, закладених у нормативно-технічній документації полягають в:

- невідповідності основних матеріалів класу необхідному нагрівостійкості ТЕД (стрічка ЛСК-110 – клас В, лак ФЛ-98 – клас В);
- необхідності проведення 2-, 3-разового циклу просочення – сушіння, що призводить до значних витрат праці та енергії (діаграми 9,10);
- низькій якості отриманої ізоляції (внаслідок використання таких стрічок, як ЛСЕП-934, зв'язуюча речовина яких має низьку ступінь полімеризації, що в подальшому призводить до перегріву ізоляції та зниження термінів служби ТЕД або таких просочувальних лаків, як ФЛ-98, який має значний термін сушіння, а також нездатен висушуватись у товстих шарах).

Вчені та виробники електроізоляційних матеріалів за останні почали виготовляти нові системи електроізоляційних матеріалів Термоліт F та Термоліт Н на основі компаундів Елпласт-155ІД, Елпласт-180 ІД та стрічок слюдинітових Елізтерм-155 Тпл, Елізтерм-180 ТПм.

Основними перевагами, цих систем ізоляції у порівнянні з традиційним на основі лаків (ФЛ-98, ПЕ-9180, КО-916) та стрічок ЛСК-110, ЛСЕК-5, ЛСЕП-934 є наступні:

- можливість уніфікації використання матеріалів (компаунд Елпласт-155 або Елпласт-180 в залежності від класу нагрівостійкості взамін лаків ФЛ-98, ПЕ-9180, КО-916; стрічки Елізтерм-155 або Елізтерм-180 взамін ЛСК-110, ЛСЕК-5, ЛСЕП-934);
- матеріали систем ізоляції Термоліт F та Термоліт Н повністю відповідають класам нагрівостійкості F і Н;
- підвищення надійності та довговічності роботи електричної ізоляції, а відповідно і електричних машин завдяки високим її електрофізичним показникам;
- економічний ефект внаслідок скорочення часу сушіння, технологічного циклу (кількість просочень, діаграми 9, 10);
- зниження шкідливого впливу на зовнішнє природне середовище за рахунок виключення використання лаків та розчинників для лаків.

1. На основі отриманих результатів дослідного використання з метою забезпечення можливості серійного впровадження систем ізоляції Термоліт F та Термоліт Н при ремонті тягових електричних двигунів НВП «Укрпромвпровадження» розроблені, узгоджені з ПКТБрл та затверджені Головним управлінням ло-

комотивного господарства Укрзалізниці Технологічні інструкції на ізолювання, просочення, фарбування й сушіння електричних машин системою ізоляції класу нагрівостійкості F і H

2. З 2008 року серійне використання компаунду Елпласт-180 та стрічок Еліз-терм-155 впроваджено на Запорізькому ЕРЗ, з 2009 року – на Львівському ЛРЗ, з 2010 компаунду Елпласт-155 ІД – на «Київському ЕРЗ». Проводиться постійний моніторинг кількості відмов ТЕД з вини ізоляції на основі прийняття відповідних рекламаций.

По інформації спеціалістів залізниць тягові двигуни відремонтовані з застосуванням систем електричної ізоляції класу нагрівостійкості F, H і C працюють надійніше і кількість передчасних виходів із ладу по причині пошкодження електричної ізоляції не спостерігається. Динаміка причин по запланованих ремонтів залишається незадовільною по причині малої кількості їх ремонтів із застосуванням нових систем електроізоляційних матеріалів (рис. 1).

Аналіз роботи тягових двигунів після ремонту на Південно-Західній залізниці з застосуванням електричної ізоляції класів нагрівостійкості F і H показав перспективність її застосування при капітальному ремонті тягових електричних машин.

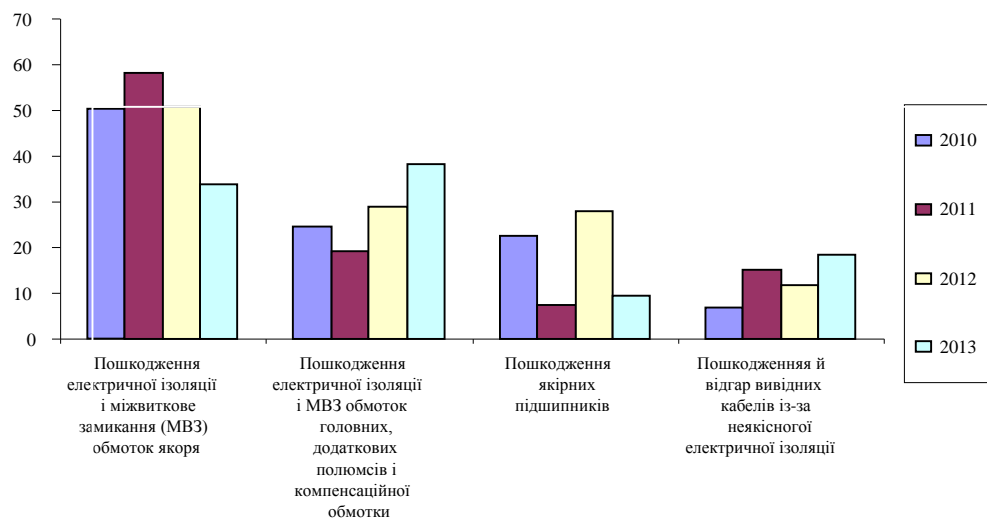


Рис. 1. Динаміка причин по запланованим ремонтам

Так, за даними Південно-Західної залізниці в 2008 році було відремонтовано 8 електровозів серії ЧС4 і 4 серії ЧС8, в яких проводився капітальний ремонт тягових двигунів з використанням електроізоляційних матеріалів класу нагрівостійкості F, H і C.

У 2009 році: 5 електровозів серії ЧС4, 4 – серії ЧС8. За 9 місяців 2010 року: 2 електровози серії ЧС4, 5 – серії ЧС8, зауважень немає. Відремонтовано і поставлено на лінію тягові двигуни, що також працюють без зауважень.

За даними «Київського ЕВРЗ» за весь період експлуатації 16 якорів тягових двигунів РТ-51, виготовлених в період з 15.11.2006 р. по 29.01.2009 р. (за даними на 2013 рік) претензій по відмовам якорів не надходило.

Всього на залізницях України в експлуатації та знаходиться в резерві близько 30,4 тисяч тягових електродвигунів електровозів, а відремонтовано всього 1278 одиниць, що складає 4 % від загальної кількості. Малий відсоток відремонтованих двигунів не може суттєво вплинути на загальну кількість позапланових ремонтів через вихід їх із ладу по причинах пошкодження електричної ізоляції.

Висновки. Запропоновані системи електроізоляційних і просочувальних матеріалів відповідають підвищеним вимогам до умов експлуатації тягових двигунів. Найпоширеніший і ефективніший спосіб просочення електричної ізоляції ТЕД в світовій практиці – вакуум-нагнітальне просочення.

Основні світові виробники електроізоляційних матеріалів пропонують системи ізоляції на основі однієї хімічної природи.

З проведеного аналізу систем ізоляції переваги для застосування в процесі виготовлення і ремонту ТЕД з огляду відповідності всім технічним (термічним, фізико-механічним, діелектричним), технологічним (терміни зберігання, час сушіння, ремонтпридатність, наявність розроблених та затверджених технологічних інструкцій) економічним вимогам, а також досвіду впровадження в СНД мають системи ізоляції «Термоліт» F і H з використанням просочувальних компаундів «Елпласт».

Значний позитивний практичний досвід використання системи ізоляції на підприємствах РФ і України є підтвердженням перспективності її використання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Электроизоляционные материалы и системы изоляции для электрических машин [Текст] : в 2-х кн. / ред.: В. Г. Огоньков, С. В. Серебряникова. – М. : Издательский дом МЭИ, – Кн. 1. – 2012. – 272 с.
2. Иванов В. В., Мельник Т. М., Огоньков В. Г. Новое поколение электроизоляционных материалов – гарантия надежности и безопасности. – «Электро-Контакт», 2005. – № 4. – С. 14.
3. Тягові електричні машини електрорухомого складу: Навч. посібник для вузів / В. М. Безрученко, В. К. Варченко, В. В. Чумак. – Д. : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2003. – 252 с.
4. Головач Ю. Н., Кубич В. О., Щербаков В. Г. Исследование теплопроводности изоляции катушек тяговых двигателей электровозов // Сборник научных трудов «Электровозостроение». – Новочеркасск, 2002. – т. 44.
5. Перспективы развития производства новых материалов для изоляции тяговых электродвигателей / Комарова В. К., Биржин А. П., Доброва Э. К., Виноградова Л. М. // Электротехника, 2002. – № 4.
6. Новые электроизоляционные материалы для тяговых электродвигателей / Биржин А. П., Комарова В. К., Костельков А. Н., Сидоренко К. С. // Локомотив – № 5 – 2000.
7. Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия (ГОСТ 2582-81). – М.: ИПК Из-во стандартов, 1981. – 35 с.
8. Данилевський В. І. Повышение надежности работы тяговых двигателей электроподвижного состава железных дорог Украины / Локомотив-информ. – № 7. – 2007. – С. 18-21.
9. Данилевський В. І. Конструкція електричних машин електропоїздів залізниць України.: Монографія / Данилевський В. І., Тарасюк В. М. – К.: Видавництво ДЕТУТ, 2014. – 92 с.

Volodymyr I. Danylevskyi, PhD (Technical Sciences)
(Associate Professor Traction Rolling Stock of Railways Chair of State University for Transport Economy and Technologies)

Vasyl M. Tarasiuk
(Graduate Student of Traction Rolling Stock of Railways Chair of State University for Transport Economy and Technologies)

Volodymyr V. Danylevskyi
(Graduate Student of Airport Chair of National Transport University)

In article the carried out analysis of a technical condition of traction electric cars structure, the basic directions of the modernization, and also risks which are defined to arise in the course of modernization on an example of traction engine TL-2K of DC electric locomotives.

The main types of impacts on the insulation during the manufacturing process: 1) heat multiple increase of temperature; 2) mechanical strain in the production and laying of electrical machines windings, it is difficult to control; 3) electric influence test voltage.

In operation isolation, these actions are of a continuous nature, thus there is a so-called accumulation of «fatigue» of insulation. Influences on an isolation begin already in the process of making. These influences are brief character, however, their level can considerably exceed operating.

Keywords: traction motors, electrical insulating materials system, overhaul of traction motors.

REFERENCES

1. Elektroizolyatsionnyie materialy i sistemy izolyatsii dlya elektricheskikh mashin [Insulating materials and insulation systems for electrical machines] : red.: V. G. Ogonkov, S. V. Serebryannikova. – Moscow. : Izdatelskiy dom MEI, – Kn. 1. – 2012. – 272 p.
2. Ivanov V. V., Melnik T. M., Ogonkov V. G. Novoe pokolenie elektroizolyatsionnykh materialov – garantiya nadezhnosti i bezopasnosti [The new generation of electrical insulating materials – a guarantee of reliability and safety] «Elektro-Kontakt», 2005. – vol. 4. – P. 14.
3. Tiahovi elektrychni mashyny elektrorukhomoho skladu [Traction electric machines of electric trains]: Navch. posibnyk dlia vuziv / V. M. Bezruchenko, V. K. Varchenko, V. V. Chumak. – D. : Dnipropetr. nats. un-tu zalizn. transp. im. akad. V. Lazariana Publ., 2003. – 252 p.
4. Golovach Yu. N., Kubich V. O., Scherbakov V. G. Issledovanie teploprovodnosti izolyatsii katushek tyagovykh dvigateley elektrovozov [Investigation of thermal conductivity of electric traction motors coils insulation] // Sbornik nauchnykh trudov «Elektrovozostroyeniye». – Novocherkassk, 2002. – p. 44.
5. Perspektivy razvitiya proizvodstva novykh materialov dlya izolyatsii tyagovykh elektrodvigateley [Prospects for the development of new materials for insulation of traction motors] / Komarova V. K., Birzhin A. P., Dobrova E. K., Vinogradova L. M. // Elektrotehnika, 2002. – Vol. 4.
6. Novyye elektroizolyatsionnyie materialy dlya tyagovykh elektrodvigateley [New insulating materials for traction motors] / Birzhin A. P., Komarova V. K., Kostelkov A. N., Sidorenko K. S. // Lokomotiv – Vol. 5 – 2000.
7. Mashiny elektricheskoye vraschayushchiesya tyagovyye. Obschie tehnikheskie usloviya (GOST 2582-81) [Rotating electrical machines for rail and road vehicles. General specifications]. – M.: IPK Iz-vo standartov, 1981. – 35 p.
8. Danilevskiy V. I. Povysheniye nadezhnosti raboty tyagovykh dvigateley elektropodvizhnogo sostava zheleznykh dorog Ukrainy [Improving the reliability of the traction motors of electric rolling stock of railways in Ukraine] / Lokomotiv-inform. – Vol. 7. – 2007. – PP. 18-21.
9. Danylevskiy V. I. Konstruktsiya elektrychnykh mashyn elektropoizdiv zaliznyts Ukrainy [The design of Ukrainian railways electric trains]: Monografiya. Danylevskiy V. I., Tarasiuk V. M. Kyiv: DETUT Publ., 2014. 92 p.