

УДК 656.2.385

В. І. Данилевський, к.т.н., доцент

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

Ю. М. Черних, к.т.н., доцент

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

Л. В. Сливовська

(економіст першої категорії Південно-Західної залізниці, м. Київ)

АНАЛІЗ НАЯВНОСТІ, ВИМОГ ДО КОНСТРУКЦІЇ ТА РОБОТИ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЦЬ

У статті наведені відомості про тягові двигуни, що використовуються в теперішній час на електровозах постійного струму; проаналізовані вимоги до їх конструкції; визначені їхні характеристики, що мають важливий вплив на експлуатаційні властивості двигунів; проведений аналіз причин відмов двигунів; визначені основні вимоги, що пред'являються до системи ізоляції; приведені основні стадії сучасної технології виготовлення обмоток тягових двигунів.

Ключові слова: тягові двигуни, електровози, електричне поле, індукція, лінійне електричне навантаження, повітряний проміжок, головні полюси.

В статье приведены сведения о тяговых двигателях, используемые в настоящее время на электровозах постоянного тока; проанализированы требования к их конструкции; определены их характеристики, имеющие важное влияние на эксплуатационные свойства двигателей; проведен анализ причин отказов двигателей; определены основные требования, предъявляемые к системе изоляции; приведены основные стадии современной технологии изготовления обмоток тяговых двигателей.

Ключевые слова: тяговые двигатели, электровозы, электрическое поле, индукция, линейная электрическая нагрузка, воздушный промежуток, главные полюса.

Вступ. На коліях залізничного транспорту України експлуатується в даний час такий електрорухомий склад:

електровози:

- постійного струму вантажні: ВЛ8, ВЛ10, ВЛ11, ВЛ11М, ВЛ11М/6, ДЕ1, 2ЕЛ4;
- змінного струму вантажні: ВЛ60, ВЛ80^{с/с}, 2ЕЛ5, 2ЕС5К;

© Данилевський В. І., Черних Ю. М., Сливовська Л. В., 2015

- змінного струму пасажирські: ВЛ60К, ЧС4, ЧС8, ВЛ40У;
- змінного струму універсальні: ДС3;
- подвійного живлення: ВЛ82 і ВЛ82М;
- постійного струму пасажирські: ЧС2, ЧС7;

електропоїзди:

- постійного струму: ЕР1, ЕР2, ЕР22;
- змінного струму: ЕР9п, ЕР9м, ЕР9е, ЕР9т.

Основний крутячий момент в електровозах і моторвагонному рухомому складі з електричною передачею створюється тяговими двигунами і передається до колісної пари через спеціальні пристрої. Надійна робота рухомого складу залежить від технічного ресурсу тягових двигунів.

Аналіз наявності тягових електричних двигунів (ТЕД) електровозів постійного струму на залізницях України. Тягові двигуни, які експлуатуються на залізницях України виготовлені в 1956-1990 роках, зокрема на електровозах.

ВЛ-8 – НБ-406 -1956-1967

ВЛ-60 - НБ-412-1962-1967

ВЛ-10 - ТЛ- 2К-1964-1975

ВЛ-11 – ТЛ- 2К- 1975-1990

ВЛ-11М/6 – ТЛ-2К

Як видно із аналізу, тягові двигуни почали виготовлятися 55 років назад із матеріалів, які існували на той час. За роки їх експлуатації конструкція постійно удосконалювалася з метою поліпшення їх тягових характеристик. Основні конструктивні зміни зазнали моментоутворюючі частини тягового двигуна. Почали впроваджуватися нові стандарти, зокрема ГОСТ 183-74 - «Електричні машини обертові» та ГОСТ 2582-81 – «Машини електричні обертові тягові». Загальні технічні умови [8]. Налагоджувалося виробництво нових конструкційних та електротехнічних матеріалів, які дали можливість удосконалити конструкції складових частин електричних машин, зокрема і тягових двигунів. Промисловість почала виготовляти проводи з витковою ізоляцією, електроізоляційні матеріали, електротехнічні матеріали, підшипники, колекторну мідь та інші матеріали, з яких виготовляються деталі тягових двигунів. Завдяки впровадженню нових матеріалів виникла можливість підвищити надійність роботи та збільшити потужність тягових двигунів [10].

Вимоги до тягових двигунів. Відповідно до вимог ГОСТ 183-74, тягові двигуни працюють в режимі S1, при якому всі його частини досягають сталих значень своїх перегрівів. Номінальні данні двигуна (потужність, напруга, струм навантаження та частота обертання) даються в режимі S1.

Тяговий двигун отримує живлення від контактної мережі, тому за номінальну необхідно брати потужність годинного режиму. Тягові двигуни належать до габариту 1 «б», тому відношення потужностей годинного і тривалого режимів приймають 0,85-0,92. При конструюванні враховують той факт, що, відповідно до вимог ГОСТ 2582-81, тягові двигуни є двигунами граничного виконання за низкою обставин, зокрема їх розміщення на візку електровоза, системи обпирання, схеми живлення, динамічних навантажень та атмосфери, в якій вони працюють. На електровозах постійного струму тягові двигуни постійно з'єднані попарно-послідовно з неоптимальною для них напругою на колекторі 1500 В, що визначає рівень напруги, на яку має бути розрахована електрична ізоляція.

Згідно з ГОСТ 2582-81, тягові двигуни мають два номінальні режими роботи: годинний (короткотривалий) і тривалий, які відрізняються за потужністю на 7...9%. Номінальні частоти обертання $n_{\text{ном}}$ становлять 700...900 об/хв, а максимальні $n_{\text{мах}}$ досягають 1900 – 2000 об/хв. Таким чином, швидкісний діапазон регулювання, що визначається коефіцієнтом $k = n_{\text{мах}} / n_{\text{ном}} = 2,1 - 2,8$, дуже широкий. Ця обставина істотно впливає на збільшення габаритів і маси тягових двигунів.

Усі тягові двигуни працюють в умовах експлуатації, що відрізняються значною кількістю збурень і нестабільності, які до того ж мають широкі межі відхилень. Двигуни піддаються впливу зовнішніх динамічних сил, що виникають у процесі взаємодії ходової частини локомотива з рейками. Ці сили мають імпульсний характер, і їх рівень P_d оцінюється добутком динамічного прискорення a_g і маси m , що піддається дії сил, тобто $P_d = m \cdot a_g$, де G – маса, a_g – прискорення вільного падіння.

Важливо відмітити, що при опорно-осьовому підвішуванні $a_g = 10...15$, а при швидкостях руху вище 100 км/год відношення може досягти навіть значення 20...25. Означені динамічні дії впливають не тільки на окремі частини двигунів, а й на щітково-колекторний вузол, перешкоджаючи його нормальній роботі [2].

Повітря, яким охолоджуються тягові двигуни, надходить у вентиляційну систему через жалюзі кузова і з огляду на специфіку роботи локомотива містить пил, часто з металевими частками. Цей пил, осідаючи всередині двигуна, не тільки погіршує тепловіддачу, а й призводить до перекривання високою напругою на запиленій поверхні. Як показує досвід, концентрація пилу може досягати 30 мг/м³, а при хуртовинах в охолоджуючому повітрі може міститися 20...25 г/м³ снігу, причому уникнути таких забруднень неможливо.

Тягові двигуни практично безперервно працюють в граничних режимах, викликаних коливанням напруг у контактній мережі та змінами струмів, що споживаються, причому останні варіюють від $0,25I_{\text{ном}}$ до $2I_{\text{ном}}$, що призводить до ще більших коливань втрат потужності. Зміна напруг у контактних мережах постійногоструму становить відповідно 2200...4000 В. Усі ці фактори створюють особливі вимоги до електричної та механічної міцності вузлів тягових двигунів. Ізоляція їх обмоток відносно корпусу повинна витримувати випробну напругу $U = (2,25U + 2000)$ В для двигунів, що отримують живлення від контактної мережі постійного струму, яка дорівнює напрузі холостого ходу на колекторі двигуна. Механічна міцність перевіряється розгоном двигуна при холостому ході протягом 2 хв. до частоти обертання, що на 25 або 35 % перевищує максимальну частоту обертання [7].

При виготовленні й експлуатації будь-яких електричних машин у зв'язку з наявністю системи допусків на виготовлення деталей і вузлів, а також їх різним зносом неминуча розбіжність електромеханічних і механічних характеристик. ГОСТ 2582-81 допускає розбіжність швидкісних характеристик у точці номінального режиму, а це призводить до відповідної розбіжності струмів навантаження різних тягових двигунів, працюючих на одному локомотиві.

У двигунів з більшим струмом навантаження будуть більші витрати енергії, вища температура обмоток і як наслідок менший термін їх роботи [5, 9].

Конструкція двигунів повинна задовольняти вимоги безпеки руху поїзда і в той же час бути досить простою, щоб тягова машина була ремонтпридатною.

Найважливіший вплив на експлуатаційні властивості двигунів мають їх магнітні характеристики, тобто залежність магнітного потоку Φ від магніто-

рушійної сили (МРС) збудження F [1]. Оскільки, як відомо, $E = C_e n \Phi$, де E – електрорушійна сила (ЕРС); C_e – стала; n – частота обертання якоря, то $E/n = c_e \Phi$. Отже, магнітна характеристика може бути подана як $E=n(F)$, а її вид визначається ступенем насичення або коефіцієнтом насичення $k_{нс}$, який є відношенням відносного спаду магнітного потенціалу в усьому магнітному колі $F_{ном}$ до відносного спаду магнітного потенціалу в повітряному проміжку F , тобто чим вище значення $k_{нс}$, тим менші габарити й маса двигуна, але в той же час гірші його регульовальні властивості. Зазвичай, щоб задовольнити ці суперечні вимоги, приймають $k_{нс} = 1,6 \dots 2,0$. При менших значеннях машина буде слабо-, а при більших – сильно насичена. [6]

Економічність роботи тягових двигунів визначає їх ККД, який, у свою чергу, залежить від струмового й магнітного навантажень. Характеристикою цих навантажень є відповідно лінійне навантаження A і щільність струму в обмотці якоря, а також індукція B в повітряному проміжку. Чим вищі ці величини, тим менші розміри й маса двигуна, але нижчий і його ККД [4].

У тягових двигунах електровозів лінійні навантаження приблизно становлять $A = (400 \dots 500) 10^2$ А/м, щільності струму в обмотках якорів $j = 6 \dots 8$ А/мм, а індукції в повітряному проміжку $B = 0,95 \dots 1,0$ Тл.

Добуток Aj , що називається тепловим фактором, характеризує струмове навантаження і визначається допустимою температурою для даного класу ізоляції [1].

Аналіз роботи тягових двигунів. Тягові електричні двигуни належать до найбільш навантаженого устаткування рухомого складу, з погляду комплексного впливу теплових, електричних, механічних і кліматичних факторів. Як відомо, найбільше число відмов тягових двигунів доводиться на ушкодження електричної ізоляції обмоток якорів і котушок головних і додаткових полюсів. На рис. 1 представлений розподіл несправностей ТЕД електровозів. Як видно із цих даних, несправності із за передчасного руйнування електричної ізоляції становлять близько 40 % від загальної кількості претензій.

Основні причини пошкодження електричної ізоляції наступні:

- пробій і міжвиткове замикання обмоток якоря;
- пробій і міжвиткове замикання котушок головних, додаткових полюсів і компенсаційної обмотки;
- недостатня електрична міцність ізоляції обмоток якоря й полюсів.

Таким чином, однією з основних умов забезпечення надійності й довговічності ТЕД є застосування і правильне підбирання систем електроізоляційних матеріалів.



Рис. 1. Діаграма розподілу несправностей ТЕД електровозів

Основні вимоги, пропоновані до систем ізоляції:

- термічні – високий температурний індекс, стійкість до змін температури, висока теплопровідність;
- фізико-механічні – абразивна стійкість (до пилу), висока міцність при розтяганні, стиску, зрушенні, стійкість до вібрації;
- електричні й діелектричні – висока електрична міцність, стійкість до тривалих напруг, низький тангенс кута діелектричних втрат;
- інші – вологостійкість, стійкість до хімічних впливів, стійкість до радіації.

Вплив на ізоляцію починаються вже в процесі виготовлення. Такі впливи носять короточасний характер, однак, рівень впливів може значно перевищувати експлуатаційний [5] .

Основні види впливу на ізоляцію в процесі виготовлення:

- теплове – підвищена температура;
- механічне – деформації при виготовленні й укладанні обмоток електричних машин;
- електричне – вплив випробувальною напругою.

У процесі експлуатації тривають впливи на ізоляцію, причому ці впливи носять довгостроковий характер, при цьому відбувається так зване нагромадження «утоми» ізоляції.

Серед основних впливів на ізоляцію в процесі експлуатації є такі:

- теплові – циклічні зміни обсягу, що приводять до появи тріщин і зсуву стрічок; перегріву, що приводять до теплового пробою й руйнування ізоляції;
- механічні – електромеханічні й магнітні сили (пуск, холостий хід, скидання навантаження, ін.); електромагнітні обертання; температурні деформації; динамічний вигин, розтягання стиск, ударного зминання; вібрація. Усі ці фактори призводять до руйнування монолітності ізоляції;

- електричні – часткові розряди в порожнечах (бомбардування твердої ізоляції, локальний розігрів до 1000°C на ділянці, хімічна дія (озон, азотна кислота); поверхневі розряди (ковзні розряди, що сковзають іскри, дуга по лобовій частині);

- хімічні – вода (набрякання ізоляції); активні речовини (ріст твердості, крихкості);

- інші – стороні включення (феромагнітні частки).

Основною вимогою, пропонованою до ізоляційних матеріалів, технології виготовлення й конструюванню, є здатність ізоляції в межах необхідного ресурсу протистояти зазначеному вище комплексу експлуатаційних впливів. [3]

При розробці нових систем ізоляції висувуються вимоги максимального використання властивостей ізоляційних матеріалів шляхом збільшення потужності в одиниці об'єму, а також припустимої температури нагрівання обмоток.

Сучасна технологія виготовлення обмоток тягових електродвигунів включає наступні основні стадії:

- виготовлення моноблоків основного й додаткового полюсів: ізолювання обмоток не просоченими слюдинітовими стрічками з малим відсотком сполучні з наступним просоченням епоксидним компаундом у вакуумі й під тиском. Іноді використовується окреме просочення котушок компаундом (лаком) з наступним зміцненням їх на полюсі;

- виготовлення ізоляції компенсаційних котушок: ізолювання обмоток просоченими слюдинітовими стрічками на основі поліефірно-епоксидних сполучних з наступним укладанням обмоток у пази полюсів, де відбувається їх затвердіння за допомогою струму в остові двигуна;

- виготовлення ізоляції якоря: ізолювання обмоток просоченими слюдинітовими стрічками на основі епоксидно-поліефірного сполучення з наступним просоченням у компаунді або лаку у вакуумі й під тиском.

На сьогоднішній день основними напрямками технології просочення з метою створення монолітного стану електричної ізоляції електричних машин є:

- вакуум-нагнітальне просочення (VPI);
- ізоляція із просочених стрічок (Resin Rich);
- змішана технологія.

При застосуванні технології вакуум-нагнітального просочення (VPI) як основна ізоляція використовуються скло слюдинітові стрічки з малим змістом сполучних матеріалів (3-5 %), так звані сухі стрічки або склослюдинітові стрічки з підвищеним змістом сполучні (до 10 %), так звані напівпросочені стрічки. Як просочувальні состави застосовуються різні лаки, компаунди. Технологічний процес складається із просочення під вакуумом і тиском і закрутки у вільному стані.

При виготовленні ізоляції із просочених стрічок (Resin Rich) застосовуються просочені склослюдинітові стрічки зі змістом сполучного 25-30 %. Технологічний процес складається в механічному обпресуванні котушок і сушінні при підвищеній температурі або гідростатичному обпресуванні в бітумі й сушінні при підвищеній температурі.

При застосуванні змішаної технології, як основна ізоляція, застосовується комбінована ізоляція (сухі або просочені склослюдинітові стрічки), різні лаки

або компаунди як просочувальні складові. Технологічний процес складається в просоченні під вакуумом і тиском, сушінні у вільному стані.

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

Численні експериментальні дослідження показують, що при правильно обраних технологічних параметрах вакуум-нагнітальне просочення забезпечує зміст компаунда в системах ізоляції на основі непросочених стрічок ~ 38-42 %, а також додаткове насичення (у середньому на 46 %) систем ізоляції з попередньо просоченими стрічками. Це визначає формування монолітних ізоляційних структур, з високими функціональними властивостями.

Як альтернатива вакуум-нагнітального просочення пропонується ультразвукове просочення (УЗП), що використовує здатність ультразвукових коливань витіснити повітря з капілярів і одночасно забезпечувати прискорене просування по них складу, що просочує.

Однак за даними досліджень, проведених ВЭЛНИИ (м. Новочеркаськ, РФ), при дослідженні ізоляції демонтованої обмотки якоря, просоченої із застосуванням УЗП, встановлено, що в більш ніж 50 % котушок ізоляція напівпакетів і виткова ізоляція повністю не просочені, а розкид значень процентного вмісту сполучного в їхній корпусній ізоляції становить від 8 % (верхній шар) до 12 % (нижній шар) [5].

У випадку вакуум-нагнітального просочення отримане повне просочення ізоляції (включаючи виткові) всіх обстежених котушок, при розкиді значень процентного вмісту сполучного 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 у компаунді не забезпечує повного й рівномірного заповнення складом, що просочує, ізоляції котушок, а її електричної міцності показники уступають аналогічній системі ізоляції, просоченої вакуум-нагнітальним способом.

На сьогоднішній день у практиці провідних світових виробників електроізоляційних матеріалів – проведення всебічних досліджень властивостей нових матеріалів, по яких ще не нагромадився належний досвід експлуатації, пропозиція комплексу електроізоляційних матеріалів для основних груп електричних машин і апаратів, що володіють необхідними властивостями.

Стандартний комплекс експериментальних досліджень, проведених при розробці нових систем ізоляції, містить у собі:

- оцінку електрофізичних і технологічних параметрів всіх електроізоляційних матеріалів, що входять у дану систему ізоляції;
- багатофакторні випробування обраних систем ізоляції й конструкцій обмоток тягових електродвигунів;
- рівень зміни основних характеристик ізоляційної системи двигуна під впливом експлуатаційних навантажень (електричне поле, температура, механічні й кліматичні навантаження). Цей параметр визначається або в процесі експлуата-

ції тягових електродвигунів за певний період, або за допомогою імітації цих навантажень шляхом ресурсних випробувань двигуна.

Якщо говорити про сучасні системи ізоляції, то тут повні комплекси електроізоляційних матеріалів для різних типів електричних машин і апаратів пропонують провідні світові виробники електроізоляційних матеріалів.

ЛІТЕРАТУРА

1. В. М. Безрученко, В. К. Варченко, В. В. Чумак / Тягові електричні машини електрорухомого складу. Вид. Дніпропетр. нац. Ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2003. – 252 с.
2. Б. П. Тихменев, Л. И. Трахтман. Подвижной состав электрифицированных железных дорог. – М.: Транспорт, 1980. – 356 с.
3. Л. В. Дубинец, В. Т. Вислогузов, А. І. Кийко і інші. Тягові електричні апарати контактні. – Вид. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2002. – 101 с.
4. М. М. Алексюк, В. И. Данилевський. Устройство для измерения воздушного зазора между средним статора и якоря электродвигателя. Локомотив. информ, № 7, 2010. – С. 10–12.
5. В. І. Данилевський, Т. М. Мельник. Підвищення надійності роботи тягових двигунів тягового моторвагонного рухомого складу залізниць України. Матеріали четвертої міжнародної науково-практичної конференції. Серія «Техніка, технологія». – К.: ДЕДУТ, 2008. – С. 38–40.
6. В. І. Данилевський, В. В. Данилевський. Исследование магнитной системы тяговых двигателей электродвижного состава. Локомотив-информ. № 7, 2008. – С. 18–21.
7. В. І. Данилевський, В. В. Данилевський, С. О. Гулак. Науково-технічне обґрунтування доцільності модернізації випробувальних станцій електричних машин електрорухомого складу. Локомотив. Информ. № 1–2, 2009. – С. 4–7.
8. ГОСТ 2582–81. Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия.
9. Ю. М. Черных. Нагрузочная способность тяговых двигателей локомотивов и вес поезда. Проблемы та перспективи розвитку транспортних систем в умовах реформування залізничного транспорту: управління, економіка і технології: Матеріали VI міжнародної науково-практичної конференції. Серія. «Техніка, технологія». – К.: ДЕДУТ, 2013. – С. 87–88.
10. Ю. М. Черных. Засновки впровадження нових електроізоляційних матеріалів при ремонті тягових електричних машин залізничного рухомого складу. – В кн.: Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем в умовах реформування залізничного транспорту: управління, економіка і технології: Матеріали V міжнародної науково-практичної конференції. Серія. «Техніка, технологія». – К.: ДЕДУТ, 2011. – С. 147–149.

Volodymyr I. Danylevskiy, PhD (Technical Sciences)
(Associate Professor Traction Rolling Stock of Railways Chair of State University for Transport Economy and Technologies)
Yuriy M. Chernikh, PhD (Technical Sciences)
(Associate Professor Traction Rolling Stock of Railways Chair of State University for Transport Economy and Technologies)
Larissa V. Slyvovska
(the first category economist of South Western Railway)

TO EVALUATE, DESIGN REQUIREMENTS AND WORK ELECTROMOTIVE TRACTION ENGINES OF RAILWAYS

This article contains information about traction engines used at present for DC electric locomotives; analyzed the requirements for their design; determining their characteristics have an important influence on the performance properties of engines; analyzed the causes of failures of engines; the basic requirements for system isolation; shows the main stages of modern manufacturing techniques windings of traction motors.

Keywords: traction engines, electric, electric field, induction, linear electrical load, air gap, the main poles.

REFERENCES

1. V.M. Bezrychenko, V.K. Vharchenko, V.V. Chumak / Tyagovi elektruchni mashynu electryhomogo skladu. Vud. Dniepropetr. nac. Univ. . zaliz. transp. im. acad. V. Lazaryana, 2003. 252 pp.
2. B.P. Tihmenev, L.I. Trahtman. Podvyzhnoy sostav elektryfytirovanyh zeleznih dorog. M. : Transport, 1980. 356 s.
3. L.V. Dubynets, V.T. Vyslohuzyov, A.I. Kuyko i inshi. Tyagovi elektruchni apparatu kontakti. – Vud. Dniropetr. nat. Univ zalizn. transp. im. acad. V. Lazaryan, 2002. 101 s.
4. M.M. Alekseyuk, V.I. Danilevsky. Ustroystvo dlya izmireniya vozdušnogo zazora mezdu serdechnikom statora i yakorem elektrodvigatelya.
5. V.I. Danilevsky, T.N. Melnyk. Pidvushchennya nadiynosti robotu tyagovuh dviguniv tyagovogo motorvagonogo ruhomogo skladu. Materialu chetvertoi miznarodnoi naukovo-metoduchnoi konferencii. Seriya «Tehnika, tehnologiya» K: DETUT, 2008, p. 38-40.
6. V.I. Danilevsky, V.V. Danilevsky. Isledovaniye magnitnoy sustemu tagovuh dvigateley elektropodviznogo sostava. Lokomotiv inform, №7, 2008, p. 18-21
7. V.I. Danilevsky, V.V. Danilevsky S.O. Gulak. Naukovo-tehnichne obgruntuvanya docilnosti modernizacii vyprobuvalnyh stanciy elektrychnykh mashyn. Lokomotiv inform, № 1-2, 2009, s.4-7.
8. GOST 2582-81. Mashyny elektrichiskie vrashchayushchiesya tyagovie. Obshchie tehnicheskies uskloviya.
9. Y.M. Chyrnyh. Nagruzochnaya sposobnost tyagovykh dvigateley lokomotivov i ves poezda. Problemy ta perspektivy rozvytku transportnykh system v umovakh reformuvanya zaliznuhnogo transportu: upravlinya, ekonomika i tehnologii: Materialy VI miznarodnoi naukovo-praktychnoi konferencii. Seriya. «Tehnika, tehnologiya». – K. : DETUT, 2013. – s.87-88.
10. Y.M. Chyrnyh. Zasnovok vprovadzenya nouh elektroizolyatsiynukh materialiv pru remonti tyagovuh elektruchnykh mashyn zaliznuhnogo ruhomogo skladu. – V kn.: Problemy ta perspektivy rozvytku transportnykh system v umovakh reformuvanya zaliznuhnogo transportu: upravlinya, ekonomika i tehnologii: Materialy VI miznarodnoi naukovo-praktychnoi konferencii. Seriya. «Tehnika, tehnologiya». – K. : DETUT, 2011. – p. 147-149.