

ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ ВИРОБНИЦТВА

УДК 622.625.28

А. В. НЕКРАСОВ, В. О. ЧОРНА, Є. М. КАС'ЯНОВ

КОНТРОЛЬ ТЕМПЕРАТУРНИХ РЕЖИМІВ ТА ОХОЛОДЖЕННЯ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ В ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Проаналізовано відомі способи контролю температури обмоток тягових електричних двигунів. Розглянуто особливості функціонування існуючих пристроїв контролю температури тягових електричних двигунів рудничних електровозів та їх недоліки. Запропоновано спосіб безконтактного контролю та захисту тягових двигунів від перевищення температури. Розглянуто існуючі способи охолодження тягових двигунів. Встановлено недоліки існуючої системи охолодження тягових двигунів. Запропоновано спосіб примусового охолодження двигунів за рахунок нагнітання повітря всередину двигуна та оцінена його ефективність. Запропоновані способи дозволять підвищити надійність тягових двигунів та подовжити терміни їх експлуатації.

Ключові слова: електровоз, тяговий двигун, обмотка якоря, обмотка збудження, контроль, захист, надійність, температура, датчик, вимірювач

Проанализированы известные способы контроля температуры обмоток тяговых электрических двигателей. Рассмотрены особенности функционирования существующих устройств контроля температуры тяговых электродвигателей рудничных электровозов и их недостатки. Предложен способ бесконтактного контроля и защиты тяговых двигателей от превышения температуры. Рассмотрены существующие способы охлаждения тяговых двигателей. Встановлено недостатки существующей системы охлаждения тяговых двигателей. Предложен способ принудительного охлаждения двигателей за счет нагнетания воздуха внутрь двигателя и оценена его эффективность. Предложенные способы позволяют повысить надежность тяговых двигателей и продлить сроки их эксплуатации.

Ключевые слова: электровоз, тяговый двигатель, обмотка якоря, обмотка возбуждения, контроль, защита, надежность, температура, датчик, измеритель

The analysis of types of main and industrial railway transport, which is operated by the railway and enterprises of Ukraine, is carried out. The main reasons for the rapid failure of critical elements of traction electrical systems were identified.

The reliability of electric transport depends on the conditions of its operation and the availability of effective control and monitoring systems for the technical condition of the main equipment. The main elements of electric locomotives are traction electric motors. It is established that it is possible to increase the reliability of electric motors due to the qualitative control of the temperature state of the engines. The analysis of known methods for monitoring the temperature of winding of traction motors is carried out. Features of functioning of existing thermoregulating devices for traction motors are considered.

A method for monitoring and protecting traction motors from extreme temperatures is proposed. The developed control method will allow controlling the temperature of the motor windings without using bulky and inaccurate devices.

The analysis of existing cooling systems of traction engines is carried out and their shortcomings are established. A method for cooling the engine is proposed. The method consists in supplying air inside the engine through the holes in the bearing shield. By using this cooling method, it is possible to extend the life of the engine and increase its reliability.

Keywords: electric locomotive, traction motor, armature winding, excitation winding, monitoring, protection, reliability, temperature, sensor, measuring instrument.

Вступ. Більше третини в загальній собівартості видобутку руди підземним способом складають енергетичні затрати [1]. При цьому, на відміну від інших способів видобутку корисних копалин, електроенергетичні витрати складають близько 90%, в т.ч. до 16 % – це витрати на внутрішньошахтний транспорт. Між тим, в експлуатації наразі в шахтах України знаходиться близько чотирьох тисяч електровозів з застарілим обладнанням, яке потребує модернізації з урахуванням новітніх розробок. Крім цього, вітчизняні підприємства гірничо-металургійного комплексу з технологією підземного ведення робіт відносять до числа найнебезпечніших з огляду на можливість ураження електричним струмом та статистику виробничого травматизму (внаслідок дії цього чинника), яка в останні роки невпинно зростає [2, 3]. Зниження факторів неефективності функціонування електротехнічного комплексу, підвищення його експлуатаційної безпеки та надійності можливі за умови побудови й застосування сучасних систем управління його поточними електричними та технологічними параметрами при русі з використанням бездатчикових систем контролю.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Підвищення надійності роботи ТЕД неможливе без поточного контролю температурних режимів функціонування будь-яких типів електричних двигунів в тягових електротехнічних комплексах шахтних електровозів [4, 5]. Як свідчить досвід експлуатації магістральних електровозів, застосування лише системи безперервного температурного контролю режимів функціонування ТЕД дозволяє знизити відмови останніх на 30...35 % , виходи з ладу колекторів в 2,6...3,3 рази, кругових вогнів в них в 3,1...3,7 рази при загальному зменшенні колекторів в 2,8...3,4 рази [6]. Експлуатація ТЕД без систем контролю теплових режимів збільшує кількість їх відмов в 1,5...3,5 рази.

До відомих способів контролю температури ТЕД та побудови відповідних захистів відносяться: закладка в двигун датчиків температури; застосування теплових реле; непряма оцінка, яка базується на вимірюванні опорів обмоток двигуна або розрахунках втрат у двигуні.

© А. В. Некрасов, В. О. Чорна, Є. М. Кас'янов. 2016

Найбільш точним та найчастіше застосовуваним є метод безпосередньої оцінки температури обмотки або активної сталі за допомогою датчиків температури. Головними недоліками методу є: необхідність закладення датчиків в обмотки двигуна, що в умовах експлуатації без його розбирання неможливо; необхідність виведення з двигуна додаткових проводів, що в умовах жорсткої вібрації може призвести до їх ушкодження та відмов системи захисту.

Теплові реле раціонально застосовувати при захисті ТЕД з постійним або мало змінним навантаженням. При перевищенні струмів тривалого режиму теплові реле спрацьовують занадто швидко, що може спричинити «перегони автоматів», та непридатні для захисту ТЕД від перегріву.

Непряму оцінку нагрівання ТЕД можна здійснити за розрахунок втрат енергії в ТЕД за розрахунковий період. При застосуванні цього методу період роботи ТЕД розбивають на інтервали, протягом яких струм можна вважати сталим. В сучасних мікропроцесорних системах управління електровозів можна реалізувати безпосередню оцінку втрат енергії шляхом визначення еквівалентного струму. Якщо його значення перевищує номінальний струм тривалого режиму, спрацьовує захист, подаючи сигнал на відключення електропривода.

Ціль та задачі дослідження. Метою дослідження є аналіз пристроїв контролю температурних режимів тягових електродвигунів (ТЕД) та вимірювачів швидкості руху тягових електротехнічних комплексів.

Задачею досліджень є розробка вдосконалених схемних рішень вимірювання електромеханічних параметрів електровозів

Для досягнення поставленої мети були поставлені наступні завдання:

1. Аналіз місця найбільшого перевищення температури ТЕД.
2. Розробка ефективних та надійних способів контролю температурних параметрів ТЕД під час їх експлуатації.
3. Розробка способу охолодження ТЕД під час експлуатації.

Матеріал досліджень температурних параметрів тягових двигунів під час експлуатації. Найбільш доцільним для визначення температури обмотки двигуна є метод, заснований на властивості зміни опору обмотки в функції температури. Температура обмотки визначається за виразом:

$$T_z = \frac{r_z - r_x}{r_x} (k + T_x) + T_x, \quad (1)$$

де r_z , r_x – опори обмоток відповідно у гарячому та холодному станах; T_x – температура обмотки у холодному стані; k – конструктивний коефіцієнт (для мідної обмотки дорівнює 235, для алюмінієвої – 245).

Під час проведення значної кількості досліджень температурних режимів ТЕД встановлено, що критичний нагрів відбувається у обмотці якоря, спричинений низькою тепловіддачею двигунів закритого типу рудничного нормального РН типу використання. Це призводить до підвищеного нагріву двигуна й може вплинути нормальне функціонування усього електротехнічного

комплексу. Але процес точного контролю її температури стикається з певними технічними складнощами. Зважаючи на цей факт, доцільним є інший спосіб контролю температури обмотки якоря, заснований на непряму контролю температури якоря через опір обмотки збудження (ОЗ). Такий підхід пояснюється наступним чином: оскільки на тяговому рухомому складі в якості тягових двигунів використовуються двигуни постійного струму з послідовною обмоткою збудження, то струм, що протікає в обмотках якоря та збудження однаковий за величиною. Виходячи з цього, процеси нагрівання та охолодження в обмотках можна вважати однаковими, що дозволяє за температурою ОЗ визначити температуру якоря з достатньою ступінню точності.

Дослідження розподілу температур, проведені авторами, показали, що при максимально допустимій температурі обмотки якоря вона нагрівається на 25 °С вище, ніж ОЗ. Враховуючи, що допустима температура обмотки якоря для ізоляції класу F складає 155 °С, максимально допустима за нагріванням якоря температура ОЗ становить 130 °С. Тобто, на таку температуру повинна бути налаштована система захисту.

Матеріал досліджень системи примусового охолодження тягового двигуна. Як відомо, ТЕД в залежності від виду охолодження поділяються на закриті неVENTИЛЬОВАНІ, ТЕД з незалежною вентиляцією та самовентильовані. На електровозах, що експлуатуються на гірничих підприємствах України, застосовуються самовентильовані ТЕД з встановленими на валу вентиляторів. Таке рішення дозволило збільшити в 1,5 рази тривалу потужність ТЕД (рис. 1, крива 3). Але при такому способі охолодження через розташування вентиляційних вікон зверху двигуна разом з повітрям всередину попадає бруд, у тому числі вода та пил, що присутні в шахті. Крім того, в результаті аналізу ефективності існуючої системи охолодження двигуна ДТН-45 встановлено, що енергетичні можливості використовуються не повністю. У зв'язку з цим найбільш перспективним способом підвищення надійності ТЕД є застосування примусової вентиляції.

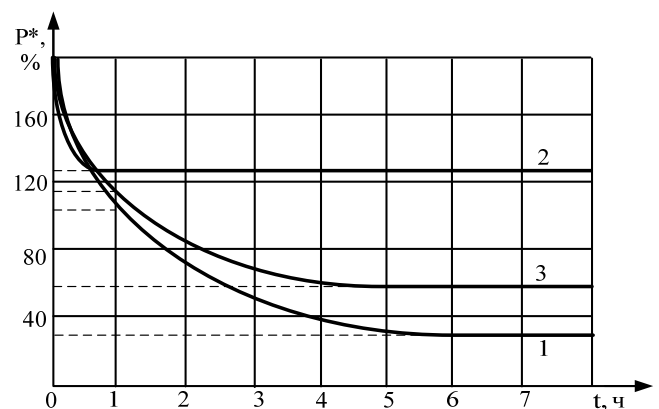


Рис. 1 – Залежність допустимого навантаження від тривалості при різних способах охолодження: 1 – природне, 2 – незалежне, 3 – самовентильована

Розроблений та запропонований спосіб охолодження двигуна полягає у подачі повітря через венти-

ляційні канали всередину з їх розподілом у міжполюсному просторі, повітряному просторі між якорем та полюсами, у аксіальних каналах якоря (рис. 2).

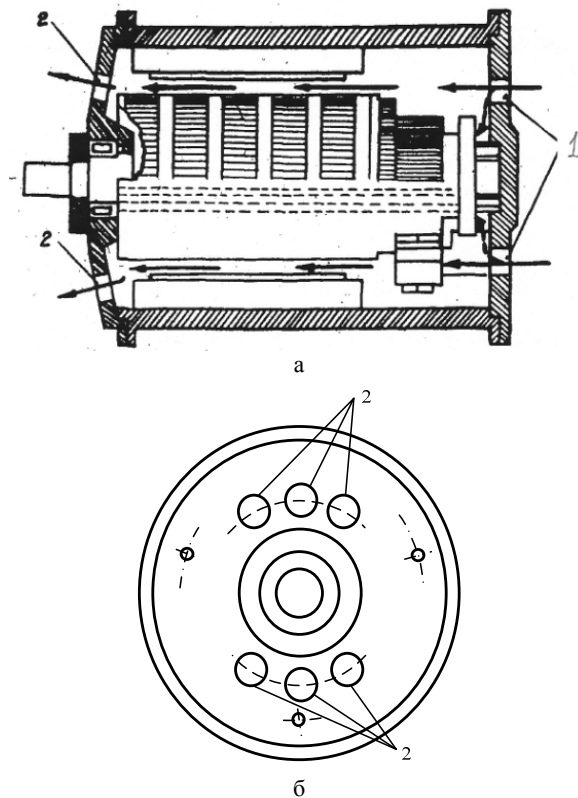


Рис. 2 – Запропонований варіант системи вентиляції двигуна ДТН-45: а – переріз двигуна; б – схема розташування отворів

Для вибору оптимальної кількості та величини отворів необхідно встановити кількість повітря, необхідного для достатнього охолодження двигуна:

$$Q_B = 60 \frac{10^3 \cdot \sum \Delta P}{\rho \cdot C_p \cdot \Theta_B}, \quad (2)$$

$$\sum \Delta P = I \cdot U \cdot (1 - \eta) \cdot 10^{-3}, \quad (3)$$

$$\eta = \frac{P_n}{I_n \cdot U_n}, \quad \Theta_B = \tau_{B2} - \tau_{B1},$$

де Q_B – витрата повітря; $\sum \Delta P$ – сумарні втрати потужності ТЕД; ρ – щільність повітря; C_p – питома теплоємність повітря; Θ_B – температура перегріву повітря; τ_{B2}, τ_{B1} – температура повітря відповідно на виході та вході ТЕД; η – ККД двигуна; P_n – номінальна потужність ТЕД; I_n, U_n – відповідно номінальний струм та напруга ТЕД.

Так, використовуючи дані залежності встановлено, що для охолодження досліджуваного ТЕД кількість повітря складає $5 \text{ м}^3/\text{хв}$. Таку величину витрат можна забезпечити за рахунок 6 отворів загальною площею 143 см^2 . При цьому, як встановлено під час експериментальних досліджень, на конструкційну надійність ТЕД це не впливає.

Результати досліджень системи захисту ТЕД від перегріву. В результаті проведених досліджень була розроблена схема захисту двигунів тягових електротехнічних комплексів від недопустимого підвищення температури. На рис. 3 представлено варіант реалізації схеми захисту ТЕД від перегрівання обмоток. Середнє значення напруги U знімають з ОЗ через коло, що складається з опорів $R1-R2$ та ємності C , яке обмежує імпульси напруги при комутаціях в силовому колі пристрою, що захищається. Середнє значення струму I , який протікає через ОЗ, визначають за допомогою шунта RS . Настроювання захисту на визначений опір та відповідну температуру здійснюють резистором підстройки $R3$. Блок пристрою захисту містить аналоговий інтегральний дільник, який виконує функцію ділення U_{cep}/I_{cep} – тобто безперервно визначає величину опору обмоток. При досягненні значення опорів, який відповідає температурі ОЗ $130 \text{ }^\circ\text{C}$, захист спрацьовує, температура обмотки якоря при цьому сягає температури $155 \text{ }^\circ\text{C}$. Схема не потребує встановлення в ТЕД датчиків температури, оскільки безпосередньо ОЗ ТЕД є датчиком, що набагато спрощує та підвищує надійність захисту.

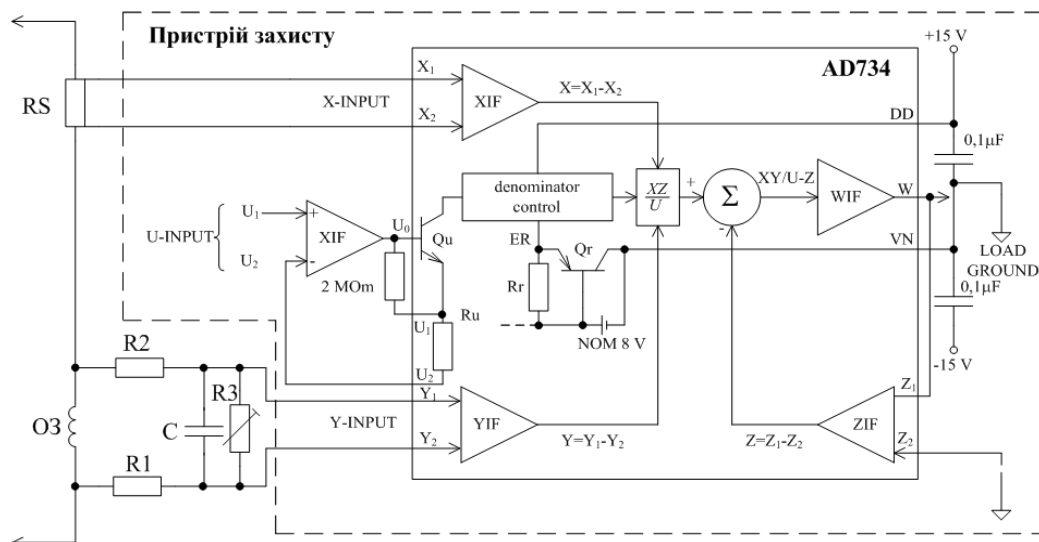


Рис. 3 – Схема захисту тягового двигуна електровоза від перегріву

Для підтвердження запропонованого способу контролю температури ТЕД та захисту від перегріву були проведені лабораторні дослідження. Для повної оцінки роботи системи контролю та захисту в ТЕД були закладені термопари. При цьому фактична температура обмотки якоря контролювалась за даними термопар, а обмотки збудження – визначалась через її опір та дублювалась за даними термопар. Дослідження показали, що при досягненні температури обмотки якоря 120°C спрацювала сигналізація, при цьому температура якірної обмотки досягла 140°C . При подальшій роботі ТЕД температура ОЗ збільшилась та досягла 130°C , що призвело до спрацювання захисту та відключення ТЕД від джерела живлення.

Дослідження ефективності запропонованого способу охолодження ТЕД (рис. 4) свідчить про те, що при нагнітанні всередину двигуна повітря значно знижується температура обмоток якоря, голосних та додаткових полюсів, при цьому температури ОЯ не перевищує 80°C .

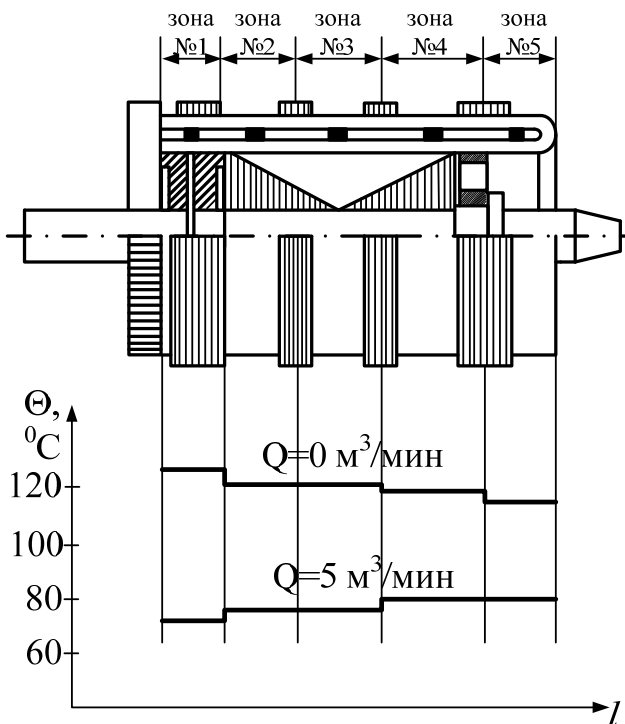


Рис. 4 – Розподіл температури обмотки ТЕД за довжиною при примусовому охолодженні та відсутності системи охолодження

Отже, з отриманих даних можна зробити висновок, що тепловіддача обмотки якоря збільшилась майже в 1,5 рази за рахунок вентиляції, що дозволяє природнім шляхом підвищити тривалу потужність та надійність ТЕД, збільшивши тим самим терміни міжремонтної експлуатації.

Висновки

1. В результаті досліджень проведений аналіз та оцінювання якісних показників функціонування пристроїв контролю температурних режимів, які застосовують в тягових електромеханічних системах з ТЕД

постійного струму послідовного збудження сучасних рудничних електровозів.

2. Запропоноване схемне рішення способу непрямого контролю температури обмотки якоря та захисту від її перевищення. Це дозволить при досягненні обмоткою якоря критичної температури 155°C спрацювати захисту та знеструмувати ТЕД, не допускаючи його роботу в аварійному режимі.

3. Запропонований спосіб примусового охолодження ТЕД без застосування додаткових механічних пристроїв дозволить в 1,5 рази збільшити тепловіддачу обмотки якоря, підвищивши надійність ТЕД.

Список літератури:

1. *Бабец, Е. К.* Сборник технико-экономических показателей горнодобывающих предприятий Украины в 2009–2010 гг. Анализ мировой конъюнктуры рынка ЖРС 2004–2011 гг [Текст] / *Е. К. Бабец, Л. А. Штанько, В. А. Салганик* – Кривой Рог: Издательский дом, 2011. – 329 с.
2. Електроотравитизм і шляхи його зменшення при експлуатації електрифікованих видів транспорту на підземних гірничорудних підприємствах [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.kdu.edu.ua/statti/Tezi_2011/0338.pdf
3. НПАОП 10.0-1.01-05. Правила безпеки у вугільних шахтах [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://dnaop.com/html/33608/doc-npaop-100-101-05-pravila-bezpeki-u-vugilynih-shahtah-ukr>
4. *Черная, В. О.* К вопросу анализа повреждений тяговых двигателей шахтных электровозов [Текст]: первая Всеукраинская научно-техническая конф. студентов, аспирантов и молодых ученых / *В. О. Черная* // Молодежь: наука и инновации, 2013. – С. 421–422.
5. *Волотковскій, С. А.* Рудничная электровозная тяга [Текст] / *С. А. Волотковскій*. – Москва: Недра, 1981. – 389 с.
6. *Носков, В. И.* Контроль и диагностика мотор-вагонных поездов с использованием нейронных сетей [Текст] / *В. И. Носков, М. В. Липчанский, В. С. Блиндаж* // Коммунальное хозяйство городов. – 2011. – № 101. – С. 278–283.
7. *Лагутін, В. М.* Випробування електричних машин і трансформаторів в електроенергетичних системах [Текст] / *В. М. Лагутін, В. Ц. Зелінський, О. Б. Бурікин*. – Вінниця: ВНТУ, 2010. – 115 с.
8. *Хечинашвили, А.* Микропроцессорные системы безопасности химических источников тока [Текст]: VI межд. конф. / *А. Хечинашвили* // Фундаментальные проблемы электротехнической энергетики, 2005. – С. 406–408.
9. *Бутт, Ю. Ф.* Шахтный подземный транспорт: справочное издание. Шахтный локомотивный и рельсовый транспорт [Текст] / *Ю. Ф. Бутт, В. Б. Грядущий, В. Л. Дебелый, А. Н. Коваль, А. Л. Фурман, В. М. Шука, В. А. Яценко*. – Донецк: «ВИК», 2009. – 481 с.
10. *Розенфельд, В. Е.* Теория электрической тяги [Текст] / *В. Е. Розенфельд, И. И. Исаев, Н. К. Сидоров, М. С. Озеров*. – Москва: Транспорт, 1995. – 294 с.

Bibliography (transliterated):

1. Babec, E. K., Shtanko, L. A., Salganik, V. A. (2011). Compilation technical and economic parameters of mining enterprises of Ukraine in 2009- 2010 years. Analysis of the global IO market conditions 2004–2011. Krivoy Rog: Publishing House, 329.
2. Electrical injuries and ways to reduce the operation modes of transport on electrified underground mining enterprises. Available at: http://www.kdu.edu.ua/statti/Tezi_2011/0338.pdf
3. NPAOP 10.0-1.01-05. Pravyla bezpeky u vuhilnykh shakhtakh. Available at: <http://dnaop.com/html/33608/doc-npaop-100-101-05-pravila-bezpeki-u-vugilynih-shahtah-ukr>
4. Chernaya, V. O. (2013). On the analysis of damage to electric traction motor shaft. First Ukrainian scientifically conference of students and young scientists, 421–422.
5. Volotkovskiy, S. A. (1981). Mine locomotive traction. Moscow: Nedra, 389.
6. Noskov, V. I., Lipchanskiy, M. V., Blindaj, V. I. (2011). Kontrol' i diagnostika motor-vagonnyh poezdov s ispol'zovaniem nejronnyh setej. Kommunal'noe hozjajstvo gorodov, 101, 278–283.

7. Lagutin, V. M., Zelinskiy, V. C., Burykin, O. B. (2010). Testing of electrical machines and transformers in power systems. Vinnica: VNTU, 115.
8. Hetchinashvili, A. (2005). Microprocessor security of chemical current sources. VI International Conference Fundamental Problems of the electrical power industry, 406–408.
9. Butt, Yu. F., Gryaduschiy, V. B., Debelyj, V. L., Koval, A. N., Furman, A. L. (2009). Mine underground transport: reference book. Mine locomotive and rail transport. Donetsk: «Vik», 481.
10. Rozenfeld, V. E., Isaev, I. I., Sidorov, N. K., Ozerov, M. S. (1995). Theory of electric traction. Moscow: Transport, 294.

Надійшла (received) 07.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Контроль температурних режимів та охолодження тягових двигунів електротехнічних комплексів в процесі експлуатації/ А. В. Некрасов, В. О. Чорна, Є. М. Кас'янов// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С.122–126. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Контроль температурных режимов и охлаждения тяговых двигателей электротехнических комплексов в процессе эксплуатации/ А. В. Некрасов, В. О. Черная, Е. М. Касьянов// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С.122–126. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Controlling temperature and cooled traction motors electrical systems during operation/A. Nekrasov, V. Chorna, E. Kasyanov//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 50 (1222).– P.122–126 . – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Некрасов Андрій Вікторович – кандидат технічних наук, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, доцент кафедри електричних машин та апаратів, вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, Україна, 39600.

Чорна Вікторія Олегівна – кандидат технічних наук, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, доцент кафедри систем електропостачання та енергетичного менеджменту, вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, Україна, 39600, e-mail: chornajav@gmail.com.

Кас'янов Євгеній Михайлович – аспірант, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, аспірант кафедри електричних машин та апаратів, вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, Україна, 39600.

Некрасов Андрей Викторович – кандидат технических наук, Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, доцент кафедры электрических машин и аппаратов, ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, Украина, 39600.

Черная Виктория Олеговна – кандидат технических наук, Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, доцент кафедры систем электропотребления и энергетического менеджмента, ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, Украина, 39600, e-mail: chornajav@gmail.com.

Касьянов Евгений Михайлович – аспирант, Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, аспирант кафедры электрических машин и аппаратов, ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, Украина, 39600.

Andrii Nekrasov – PhD, associate professor, Kremenchuk Mykhaylo Ostrohradskyi National University, Pershotravneva, 20, Kremenchuk, Ukraine, 39600.

Chorna Viktoriya – PhD, associate professor, Kremenchuk Mykhaylo Ostrohradskyi National University, Pershotravneva, 20, Kremenchuk, Ukraine, 39600, , e-mail: chornajav@gmail.com.

Evgenii Kasyanov – graduate student, Kremenchuk Mykhaylo Ostrohradskyi National University, Pershotravneva, 20, Kremenchuk, Ukraine, 39600.