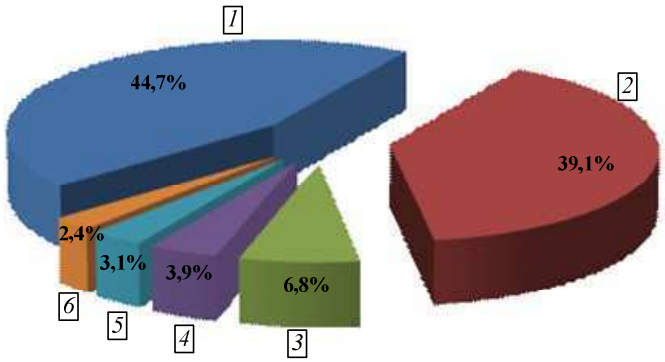
УДК 629.423.31

Е. С. ГУЗОВ, канд. техн. наук, доц. ДВНЗ «Криворізький національний університет»;
І. О. СІНЧУК, канд. техн. наук, доц. ДВНЗ «Криворізький національний університет»;
В. О. ЧОРНА, асист. Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського;
Л. М. СМЕНОВА, здобувач, Українська державна академія залізничного транспорту

РОЗРОБКА БЕЗСЕНСОРНОГО СПОСОБУ ЗАХИСТУ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ РУДНИЧНИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ ВІД ПЕРЕГРІВУ

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, наразі в експлуатації в умовах шахт України перебуває близько чотирьох тисяч електровозів двадцяти видів із застарілим обладнанням, яке потребує сучасної 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]. Зниження фактору неефективності функціонування електротехнічного транспорту, підвищення його експлуатаційної безпеки та надійності можливі за умови побудови й застосування сучасних систем управління поточними електричними та технологічними параметрами електровозоскладу під час руху з використанням бездатчикових систем контролю.

Постановка задачі. Вітчизняні рудничні (шахтні) електровози оснащені тяговими електроприводами (ТЕП) на базі електричних двигунів постійного струму послідовного збудження. Нажаль, як свідчить статистика несправностей електромеханічного обладнання тягового рухомого складу українських шахт, надійність даних двигунів в комплексі ТЕП електровозів досить низька. Так, міжремонтні терміни їх експлуатації складають від чотирьох до восьми місяців. При цьому, як показують численні дослідження [3], перевищення температурних показників над конструкційними є основною причиною більшості пошкоджень, особливо це стосується пошкоджень якірної обмотки та обмотки полюсів, що в цілому складають близько 80 % від усіх несправностей (рис. 1).



1 – головні та додаткові полюси, 2 – якір, 3 – щіткотримач, 4 – вивідні кабелі, 5 – підшипники, 6 – інші вузли
Рис. 1 – Дані про пошкодження елементів тягових двигунів типу ДТН45/27 при експлуатації на електровозах у залізорудних шахтах «Криворіжзалізрудком»

Тому актуальним в комплексі тягових електромеханічних систем є застосування системи контролю та захисту від перегріву тягових електричних двигунів (ТЕД) з метою підвищення їх надійності та ефективності функціонування рухомого складу в цілому.

Матеріали дослідження. Багаточисельні лабораторні та промислові дослідження процесу нагрівання показали, що в тепловому відношенні ТЕД являє собою складний об’єкт, температурне поле якого навіть при всіх спрощених передумовах класичної теорії нагрівання визначається складно і не завжди забезпечує співпадіння з розрахунковими значеннями [4]. Найскладнішим випадком теплового процесу ТЕД вважається такий, при якому час роботи двигуна не настільки великий, щоб температуру в кінці процесу можна було вважати близькою до сталої, і одночасно не настільки малий, щоб температуру можна було вважати такою, що змінюється за прямолінійним законом (через короткочасність теплового процесу можна вважати, що теплообмін не відбувається). Такий режим роботи характерний для роботи ТЕД.

При експлуатації тягового рухомого складу в умовах залізорудних шахт характерною рисою переважної більшості рейсів є чередування періодів навантаження і пауз (рис. 2), причому співпадіння навантажувальних діаграм не спостерігається, що обумовлено впливом багатьох факторів. До числа таких можна віднести: зміну опору руху електровоза при забрудненні рейок рудою, зміну коефіцієнта зчеплення коліс з рейками на окремих ділянках шляху, різке падіння напруги в тяговому ланцюзі під час завантаження вагонеток в ортах, зростання тягових зусиль в залежності від рівня завантаженості електровозоскладу, зміну рівня споживаного струму та тривалості окремих операцій.

Такі умови функціонування ТЕД негативно відображаються на його температурних характеристиках. Так, найбільше перевищення температури ТЕД спостерігається при розвантажувально-завантажувальних операціях, що пояснюється реалізацією електричної потужності в тяжких умовах з точки зору нагріву ТЕД.

© О.М. Сінчук, Е.С. Гузов, І.О. Сінчук, В.О. Чорна, Л.М. Сменова, 2015

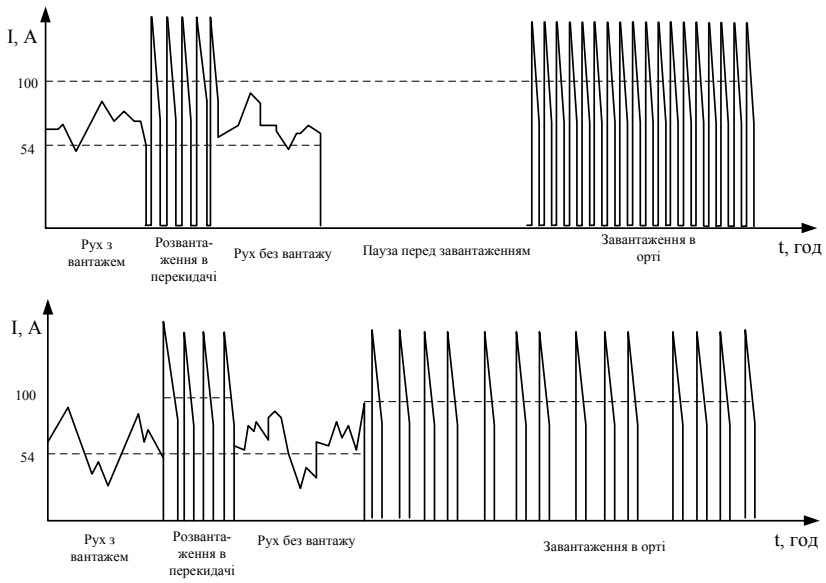
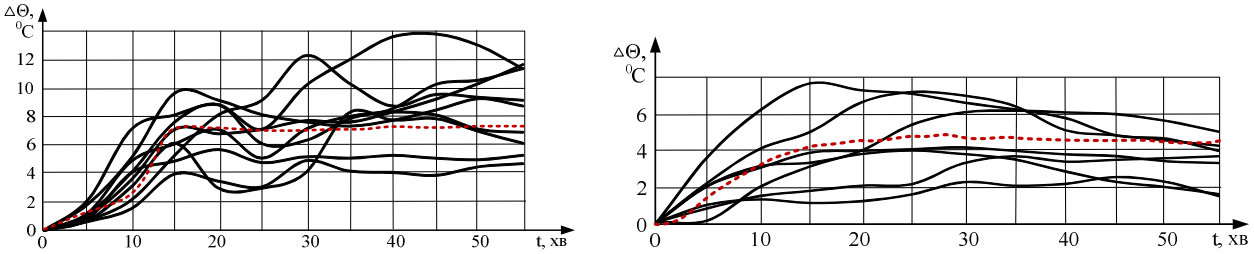


Рис. 2 – Діаграми навантажень тягових електричних двигунів шахтних контактних електровозів за циклами руху підземними горизонтами ПАТ «Криворізький залізорудний комбінат»

Результати експериментальних рейсів свідчать про те, що температура ТЕД протягом рейсу змінюється не прямолінійно, а має нерегулярний випадковий (коливальний) характер, як і навантаження, яке є джерелом таких коливань (рис. 3). Для підтвердження цього нижче наведені криві можливих реалізацій двох випадкових функцій перевищення температури для однієї величини відносного навантаження (I), але різної відносної тривалості дії навантаження (τ).



а) б)

Рис. 3 – Графіки реалізації випадкової функції перевищення температури тягового двигуна ДТН-45 за час рейсу електровоза К14: а) I=1,7 для τ=0,55;б) I=1,7 для τ=0,3.

Слід відзначити, що через інерцію теплових процесів, зміна температури складових ТЕД в часі відбувається приблизно однорідно і має вигляд безперервних випадкових коливань навколо деякого середнього значення, причому ні середня амплітуда, ні характер цих коливань не виявляють суттєвих змін протягом часу роботи двигуна.

Тим не менш, перевищення температурних показників ТЕД сприяє швидкому виходу з ладу останніх та погіршенню показників надійності функціонування усього комплексу рудничної відкатки. У зв'язку з чим як для існуючих, так і для нових ТЕД, що розробляються, необхідним є контроль температурних показників обмоток, так як й інших параметрів ТЕД.

Як було зазначено раніше, підвищення надійності роботи ТЕД неможливе без поточного контролю температури його складових під час функціонування у комплексі шахтного електрорухомого складу [4]. 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 – у 2,6…3,3 рази, кругових вогнів – у 3,1…3,7 рази [5]. Експлуатація ТЕД без систем контролю теплових режимів збільшує кількість їх відмов в 1,5…3,5 рази.

Серед численних способів контролю температури ТЕД можна виділити найбільш розповсюджені та широко застосовувані у промисловості, до яких належать:

– контроль температури за допомогою датчиків температури, закладених у двигун;
– контроль рівня нагріву за допомогою теплових реле;
– розрахункові методи;
– непряма оцінка, яка базується на вимірюванні опорів обмоток двигуна.

Найбільш точним та найбільш застосовуваним є метод безпосередньої оцінки температури обмоток закла-

деними в двигун датчиками температури, оскільки він дає безпосередню оцінку нагріву досліджуваного об'єкта. Разом з тим, даний метод має суттєвий недолік, що полягає у необхідності конструктивного закладення в обмотки двигуна датчиків, що потребує розбирання ТЕД, а технологічна необхідність виведення з двигуна додаткових проводів в умовах жорсткої вібрації ТЕД може стати причиною їх ушкодження та призвести до відмов системи контролю та некоректної роботи системи захисту.

Теплові реле раціонально застосовувати при захисті ТЕД з постійним або малозмінним навантаженням. Але як відомо, тягові навантаження – це навантаження, що безперервно змінюються в широкому діапазоні протягом технологічної зміни відкатки рудничним транспортом. Ефективний захист за умови подібних навантажень можливий лише у випадках рівності постійних часу нагріву та охолодження двигуна та реле. Для забезпечення надійного захисту ТЕД від перегріву теплові реле обираються за величиною струму тривалого режиму. Для тягових двигунів типу ДТН, які складають значну частину ТЕП шахтних електровозів, співвідношення струмів часового та тривалого режимів складає 1.7, при цьому час спрацювання реле складає 5 хв, хоча двигун в цьому режимі може працювати протягом години з допустимим навантаженням. Отже, за умови перевищення струмів тривалого режиму теплові реле спрацьовують занадто швидко, що може спричинити «перегони автоматів», а відтак непридатні для захисту ТЕД від перегріву.

Відомий розрахунковий метод визначення нагріву в функції часу для випадку довільного навантаження, що відповідає режиму роботи ТЕД [6]. Однак, розрахунок ступеню нагріву ТЕД за даним методом передбачає введення деяких спрощень класичної теорії нагрівання та може застосовуватись лише для найпростішого випадку, при якому весь період часу може бути розділений на проміжки часу, протягом яких функцію втрат можна вважати лінійною. Звісно, це спрощення віддаляє поставлену задачу від реальних фізичних процесів.

В рамках досліджень теплових режимів ТЕД існує немало розрахункових теплових моделей. Як правило, ці моделі базуються на представленні досліджуваних процесів в окремих елементах конструкції ТЕД, що завжди пов'язано зі значним обсягом розрахунків та робить нераціональним їх використання у складі комплексної моделі шахтного електровоза з її непередбачуваними та несталими режимами функціонування.

Один з поширених розрахункових методів визначення температури ТЕД передбачає визначення величини середньоквадратичного струму згідно виразу:

$$I_C = \sqrt{\frac{I^2_1 t_1 + I^2_2 t_2 + I^2_3 t_3 + ... + I^2_n t_n}{\sum_1^n t_i}}, \qquad (1)$$

де $I_1, I_2, I_3 \ldots I_n$ – струми навантаження відповідно в проміжки часу $t_1, t_2, t_3 \ldots t_n$.

Разом з тим, за результатами багаточисленних експериментальних досліджень [7] та подальшої оцінки режимів функціонування ТЕД рудничних електровозів було встановлено, що розрахунки, які проводяться за вищевказаним виразом, далекі від реальних значень оскільки величина визначеної температури якоря та полюсів нижче дійсної. Обумовлено це тим, що вказаним методом не враховується погіршення умов охолодження ТЕД при зниженні швидкості руху електровоза в ортах.

Так, на рис. 4 наведені залежності величини перевищення температури ТЕД типу ДТН-45 від часу його роботи під навантаженням, з яких видно, що протягом 20 хв роботи ТЕД його температура збільшилась на 7,2 °С (крива 2), а за час охолодження, який становить 21 хв, зменшилась на 7,4 °С. Т.ч. наприкінці рейсу температура стала нижчою за початкову. Насправді ж перевищення температури протягом наведеного в якості прикладу рейсу складає 5,8 °С (крива 1). За результатами розрахунків встановлено, що температура двигуна збільшилась в середньому на 2,8 °С (крива 3).

Отже, середньоквадратичний струм при несталих режимах роботи ТЕД з випадковим чергуванням періодів пауз та навантажень не відображає дійсної зміни температури нагріву двигуна протягом рейсу чи зміни.

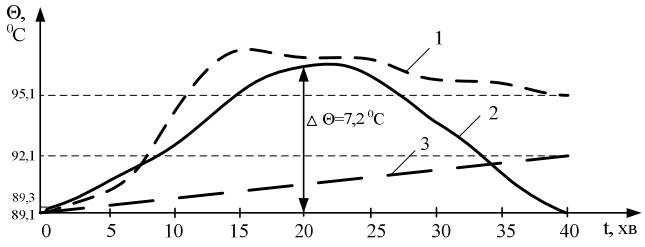


Рис. 4 – Порівняння дійсного нагріву з еквівалентним, отриманих за результатами розрахунків
1 – еквівалентна температура нагріву за час рейсу; 2 – результати експерименту; 3 – результат розрахунків

Крім того, як доведено багатьма дослідниками цієї проблеми [7-9], усі без виключення відомі теоретичні теплові моделі ТЕД в умовах їх функціонування в комплексі тягових електротехнічних систем рудничних контактних електровозів в тій чи іншій мірі далекі від реальних та не можуть бути рекомендовані до практичних розрахунків [7].

Таким чином, не зважаючи на достатню кількість способів контролю температурних режимів ТЕД, їх застосування для ТЕП рудничних електровозів не може забезпечити якісного вирішення головного завдання.

Як свідчать дослідження температурних режимів ТЕД рудничних електровозів, найбільш небезпечне нагрівання відбувається у обмотці якоря, але контроль її температури супроводжується певними труднощами, пов'язаними зі щітковими контактами, оскільки їх опір нестабільний та може змінюватися в десятки разів залежно від марки щіток, їх приробітки, стану поверхні колектора та його температури, швидкості обертання. До того ж щітки перекривають декілька колекторних пластин, шунтуючи секції обмотки якоря. Тому достатньо точне визначення температури якірної обмотки за її опором неможливе.

Однак існує інший шлях – контролювати температуру за опором обмотки збудження [10]. Це можливо виходячи з того, що обмотка збудження ТЕД рудничних електровозів підключена послідовно з обмоткою якоря, тому по ним протікає однаковий струм. Це дозволяє говорити про те, що нагрівання та охолодження обмоток взаємопов'язані, і дозволяє за температурою обмотки збудження точно визначити температуру обмотки якоря.

Дослідження розподілу температур ТЕД типу ДТН 45/27, проведені колективом авторів на лабораторному стенді, показали, що при максимально допустимій температурі обмотки якоря вона нагрівається на 25 ^{0}C вище, ніж обмотка збудження як в тривалому, так і в годинному режимі. Враховуючи, що допустима температура обмотки якоря для ізоляції класу F складає 155 ^{0}C, максимально допустима за нагріванням якоря температура обмотки збудження (клас ізоляції H) складає 130 ^{0}C. Отже, незважаючи на те, що обмотка збудження допускає й більш високу температуру (180 ^{0}C), захист від перегрівання ТЕД повинен спрацьовувати при досягненні температури обмотки збудження 130 ^{0}C, що відповідає опору:

$$R_{130} = R_x \frac{365}{235 + \tau_x}. \qquad (2)$$

Отже, логічним є висновок, що для контролю опору обмотки збудження в процесі роботи ТЕД зручно використовувати метод амперметра-вольтметра, при опорі обмотки, що дорівнює співвідношенню *U/I*. З метою реалізації функції визначення опору запропонована схема, представлена на рис. 5.

В схемі передбачено вимірювання середніх значень струму та напруги, які не залежать від частоти комутації робочого вентиля перетворювача та постійної часу обмотки збудження. При цьому середнє значення напруги *U* знімають з обмотки збудження ОЗ через коло, що складається з опорів *R1-R3* та конденсатора *C*, яке обмежує імпульси напруги при комутаціях в силовому колі пристрою, що захищається. Середнє значення струму *I*, який протікає через обмотку збудження, визначають за допомогою шунта *RS*. Настроювання захисту на визначений опір та відповідну температуру здійснюють резистором *R3*.

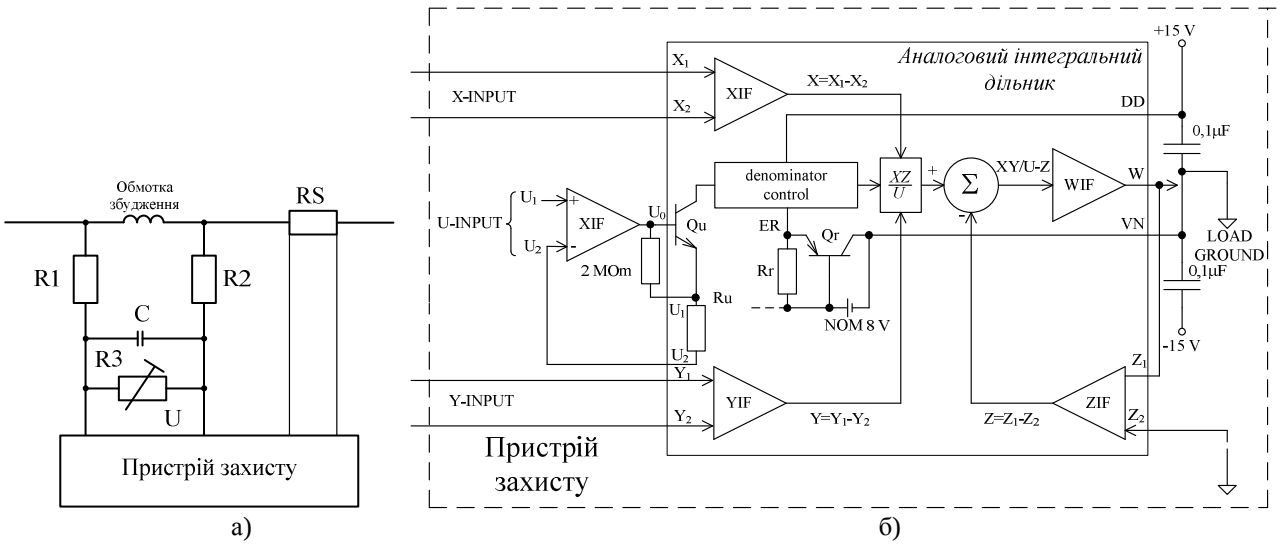


Рис. 5 – Структурна схема захисту тягового двигуна шахтного електровоза від перегрівання (а) та захисного пристрою на базі мікросхеми AD734 (б)

Блок пристрою захисту містить аналоговий інтегральний дільник, який виконує функцію ділення $U_{сер}/I_{сер}$ – тобто безперервно визначає величину опору обмоток. Пристрій функціонує наступним чином. При досягненні значення опору, що відповідає температурі обмотки збудження 130 ^{0}C, захист спрацьовує, температура обмотки якоря при цьому сягає температури 155 ^{0}C. Схема не потребує встановлення в ТЕД датчиків температури, – безпосередньо обмотка збудження двигуна є датчиком, що, безумовно, відображається на простоті та надійності захисту.

В даній структурі як реальний варіант дільника для практичної реалізації може слугувати мікросхема 4-Quadrant Multiplier/Divider AD734 © Analog Devices, Inc. Схема підтримує два режими аналогового ділення. Її рекомендовано використовувати як аналоговий дільник, який працює в режимі безпосереднього регулювання напруги. Цей режим є більш точним, гнучким та дозволяє підвищити частоту роботи мікросхеми, оскільки всі входи є доступними. Типовий дільник забезпечує виконання функції:

$$W = \frac{(X_1 - X_2)(Y_1 - Y_2)}{(U_1 - U_2)} + Z_2 \qquad (3)$$

де *X, Y, Z* – вхідні сигнали.

При цьому різниця сигналів *U=U1–U2* повинна бути додатньою величиною та знаходитись у межах 10 мВ÷10 В.

Розроблений та запропонований спосіб контролю температурних режимів ТЕД в процесі їх роботи дозволить підвищити надійність функціонування всього комплексу рудничної відкатки, оскільки дасть змогу контролювати температуру окремих складових ТЕД під час роботи та не допускати перевищення температурних режимів вище допустимих меж.

Висновки. Отже, проведений аналіз та оцінювання якісних показників функціонування пристроїв контролю температурних режимів, які застосовують в тягових електромеханічних системах з тяговими двигунами постійного струму послідовного збудження сучасних рудничних електровозів, дозволили виявити головні причини їх низької надійності. За результатами проведених досліджень розроблено структурну схему пристрою контролю, рекомендовану до практичної реалізації. Запропонований спосіб контролю та захисту ТЕД від перевищення температури нагріву їх елементів не передбачає встановлення датчиків температури, оскільки обмотка збудження двигуна є датчиком. Це робить захист простим та надійним, що особливо актуально для тягових електротехнічних комплексів промислових видів електровозів.

Список літератури: 1. *Бабец Е. К.* Сборник технико-экономических показателей горнодобывающих предприятий Украины в 2009 – 2010 гг. Анализ мировой коньюктуры рынка ЖРС 2004 – 2011 гг./ *Е. К. Бабец, Л. А. Штанько, В. А. Салганик* и др. – Кривой Рог: Видавничий дім, 2011. – 329 с. **2.** *Сінчук І. О.* Електротравматизм і шляхи його зменшення при експлуатації електрифікованих видів транспорту на підземних гірничорудних підприємствах / *І. О. Сінчук, Є. І. Скапа* // Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації : Зб. наук. праць наук.-техн. конф. молодих учених і спеціалістів. – Кременчук. – 2011. – С. 338–339. **3.** *Черная В. О.* К вопросу анализа повреждений тяговых двигателей шахтных электровозов / *В. О. Черная* // Молодь : наука та інновації. Перша Всеукр. наук.-техн. конф. студентів, аспірантів і молодих вчених. – Дніпропетровськ : ВНЗ «НГУ». – 2013. – С. 421–422. **4.** *Синчук И. О.* Исследование тепловых режимов тяговых электрических двигателей рудничных контактных электровозов / И. О. Синчук, В. О. Черная // Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика : наукове видання. – Кременчук, 2014. – № 1/2014 (2). – С. 98–100. **5.** *Банников Е.В.* Анализ причин повреждаемости тяговых двигателей рудничных электровозов на шахте «Ленинградская» / *Е. В. Банников, В. Н. Кордаков* // Горючие сланцы. – 1977. – № 5. – С. 18–23. **6.** *Сінчук О. М.* Побудова математичної теплової моделі тягового електричного двигуна постійного струму / *О. М. Сінчук, Д. Л. Сушко* // Вісн. Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, Техн. науки. Серія Транспорт. – Луганськ : СНУ ім. В. Даля. – 2005. – № 8(90). – Ч. 2. – С. 50–54. **7 .** *Оат Г.П.* Исследование нагрузок тяговых двигателей электровозов горнорудных шахт: автореф. дис. на соискание ученой степени к.т.н. – Кривой Рог, 1962. – 19 с. **8.** *Сінчук О. М.* Нештатні режими і структура системи захисту від них при функціонуванні двоосних електровозів / *О. М. Сінчук, В. О. Чорна* // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – № 2/2012. – С. 100–104. **9.** *Щербатов В.В.* Моделирование теплового состояния тягового электродвигателя для прогнозирования ресурса / В. В. Щербатов, О. Л. Рапопорт, А. Б. Цукублин // Известия Томского политехнического университета. Технические науки. – 2005. – Т. 308, № 7. – С. 156–159. **10.** *Богаенко И. Н.* Контроль температуры электрических машин / *И. Н. Богаенко*. – К. : Техника, 1975. – 176 с.

Bibliography (transliterated): 1. Babec, E. K., Shtanko, L. A., Salganik, V. A. *Sbornik techniko-ekonomitcheskih pokazateley gornodobyvajuschih predpriyatiy Ukrainy v 2009-2010 gg. Analys mirovoy konyuktury rynka ZRS 2004-2011*. Krivoy Rog: Vydavnytchiy dim, 2011. Print. **2.** Sinchuk, I. O., Skapa, E. I. Elektrotravmatyzm i shlyahy yogo zmenchennya pri ekspluatacii elektryfikovanyh vydiv transport na pidzemnyh girnyzhorudnyh pidpryemstvah. *Electromechanichni ta energetychni systemy, metody modelyuvannya nta optymizacii : Zb. nauk. prac nauk.-tehn. konf. molodyh uchenyh i specialistiv*. (2011): 338-339. Print. **3**. Chernaya, V. O. K voprosu analiza povrezhdeniy tyagovyh dvigateley shahtnyh electrovozov. Molod : nauka ta innovacii. *Persha Vseukr. nauk.-tehn. konf. studentiv, aspirantiv i molodyh uchenyh. Dnipropetrovsk : VNZ "NGU"*. (2013): 421-422. Print. **4.** Sinchuk, I. O., Chernaya, V. O. Issledovanie teplovyh rezhymov tyagovyh elektricheskih dvigateley rudnichnyh kontaktnyh electrovozov. *Problemy energeresursozberezhennya v electrotehnichnyh systemah. Nauka, osvita i practyka : naukove vydannya*. Kremenchuk. 1/2014(2). (2014): 98-100. Print. **5.** Bannikov, E.V., Kordakov V.N. Analiz prichin povrezhdaemosti tyagovyh dvigateley rudnichnyh electrovozov na shahte "Leningradskaya". *Goryuchie slancy*. 5 (1977): 18–23. Print. **6.** Sinchuk, O. M., Sushko D.L. Pobudova matematychnoi teplovoi modeli tyagovogo elektrychnogo dvyguna postiynogo strumu. *Visn. Shidnoukrainskoi nacionalnogo universytetu im. V. Dalya. Tehn. nauky. Seriya Transport*. Lugansk. 8(90).2 (2005): 50–54. Print. **7.** Oat, G.P. Issledovanie nagruzok tyagovyh dvigateley electrovozov gornorudnyh shaht. Avtoref. dis. na soiskaniye utchenoy stepeni k.t.n. Krivoy Rog. 1962. Print. **8.** Sinchuk, O. M., Cherna, V. O. Neshtatni rezhymy i struktura systemy zahystu vid nyh pry funkcionuvanni dvoosnyh electrovoziv. *Visnyk Vinnyckogo politehnichnogo institutu*. 2/2012. 100–104. Print. **9**. Scherbatov, V.V., Rapoport O.L., Zukublin A.B. Modelirovanie teplovogo sostoyaniya tyagovogo elektrodvigatelya dlya prognozirovaniya resursa. *Izvestiya Tomskogo Vinnyckogo politehnicheskogo universiteta. Tehnicheskie nauki*. 308.7 (2005): 156–159. Print. **10**. Bogaenko I.N. Kontrol temperatury elektricheskih mashin. K. : Tehnika, 1976. Print.

Надійшла (received) 05.08.2015