

УДК 621.313

В.П. ШАЙДА, О.Ю. ЮР'ЄВА, С.Є. ДЗЕНІС

## АНАЛІЗ ТЕПЛООВОГО СТАНУ РІЗНИХ МОДИФІКАЦІЙ РУДНИКОВОГО ТЯГОВОГО ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ТИПУ ДТН-45/27

Проведено дослідження можливостей підвищення годинної потужності тягових двигунів постійного струму типу ДТН-45/27. Встановлено, що основним обмежувачем підвищення потужності є тепловий стан двигуна. Шляхом фізичного моделювання виконано оцінку теплового стану різних модифікацій двигуна. Визначено тупикові напрямки модифікації двигуна, визначено шляхи подальших досліджень.

**Ключові слова:** рудниковий контактний електровоз, тяговий двигун постійного струму, годинна потужність, система вентиляції, тепловий стан, перевищення температури.

Проведены исследования возможностей повышения часовой мощности тяговых двигателей постоянного тока типа ДТН-45/27. Установлено, что основным ограничителем повышения мощности является тепловое состояние двигателя. Путем физического моделирования выполнена оценка теплового состояния различных модификаций двигателя. Определены тупиковые направления модификации двигателя, намечены пути дальнейших исследований.

**Ключевые слова:** рудничный контактный электровоз, тяговый двигатель постоянного тока, часовая мощность, система вентиляции, тепловое состояние, превышение температуры.

**Purpose.** Studies were made of the possibilities of increasing the hourly power of traction motors of direct current type ДТН-45/27. **Methodology.** Physical simulation of the DC motor was made to determine the influence of the geometry of the collector on the motor thermal state. Excess temperature of windings of the motor was measured by the method of resistance, collector and bearings – by the method of the thermometer **Results.** The results of the tests of the thermal state of the traction motor of the main modification, with the improved fan, with the shortened collector, have been obtained. The influence of modifications on the temperature of windings, collector and bearings of the motor has been analyzed. **Originality.** For the first time results of tests of the thermal state of traction motors of DC type ДТН 45/27 of different modifications were obtained. The greatest excess temperature in certain parts of the engine was determined. **Practical value.** It is proposed to consider variants of cooling (motor ventilation system) of the engine. For example, apply a two-circuit cooling system or install a motor-fan instead of an ordinary fan. It is proposed to apply axial ventilation ducts in the anchor, which will allow the flow of cold air through the core, under the front parts of the winding of the anchor and under the collector. This should solve the problem of temperature drop across the length of the anchor core and more effectively cool the collector.

**Keywords:** miner contact electric locomotive, traction motor DC, hourly power, ventilation system, thermal state, temperature rise.

**Вступ.** У гірничорудній промисловості більшості країн світу використовується електричний або дизельний локомотивний транспорт [1]. Однак найбільшого поширення набули електровози.

Існуючий парк рудничних і шахтних електровозів в Україні становить кілька тисяч штук [2], і практично всі вони оснащені тяговим приводом постійного струму.

На залізничних шахтах України основним транспортом для перевезення руди є рудниковий контактний електровоз типу К14 і його модифікації: К14У, К14М, К14Н, 14КР, КТ14, К14А [3] (рис. 1).



Рис. 1 – Зовнішній вигляд рудникового контактної електровоза К14Н

Зазначений тип електровоза натепер морально застарів, а існуючий парк цих електровозів застарів фізично, тобто потребує заміни. До того ж інтенсивна експлуатація електровозів призводить до частих виходів їх з ладу, в результаті чого скорочуються міжремонтні терміни експлуатації і ростуть витрати на обслуговування [4, 5]. Не потребує доказів той факт,

що найбільш оптимальним рішенням даної проблеми є перехід на привод змінного струму та зокрема тягові асинхронні двигуни [5]. Як зазначалося в [5, 6] неможливо одночасно замінити весь парк електровозів, тому що це вимагає значних коштів. До того ж потрібна заміна оснащення обслуговуючих підрозділів і обладнання ремонтних підприємств. Тому в Україні проводяться роботи по модернізації існуючого парку рудничних електровозів, як контактних, так і акумуляторних.

Роботи з модернізації електровозів проводяться як в напрямку заміни типу тягового приводу – на асинхронний [7] або вентильний [8], так і в поліпшенні існуючого приводу постійного струму [6, 9]. На жаль, існуючі приклади переходу на інший тип приводу носять одиничний характер, через наведені вище причини.

Аналогічна тенденція спостерігається і за кордоном. Але в економічно провідних країнах перехід на асинхронний тяговий привод розпочався на 20–30 років раніше від нашої країни (це стосується не тільки рудникового, але і залізничного та міського видів транспорту). Незважаючи на значно більші фінансові ресурси, перехід здійснювався поступово і триває дотепер. Тому, незважаючи на відмову від тягового приводу постійного струму, багато фірм досі випускають рудникові електровози з тяговими двигунами постійного струму. Також вони пропонують проекти з глибокої модернізації існуючих рудничних електровозів із заміною тягового приводу постійного струму на асинхронний привод. Так, наприклад, в [10] наводяться результати модернізації електровоза, що був розроблений в 1970 році, двигун постійного струму було замінено синхронним двигуном на постійних магнітах.

Зараз закордонні фірми не припиняють розвиток приводу постійного струму і здійснюють його модернізацію. Таким прикладом є британська компанія Clayton Equipment Ltd [11] і китайська компанія Rock Mining Machinery [12], на їх сайтах наведені відповідні проекти і продукція (рис. 2).



Рис. 2 – Зовнішній вигляд електровоза компанії Clayton Equipment Ltd

Таким чином, модернізація існуючого парку рудникових електровозів, і зокрема електровозів типу К14, є актуальною науково-технічною задачею для гірничорудної і електромашинобудівної промисловостей.

**Аналіз останніх досліджень та постановка проблеми.** Цілком природно, що дослідженнями шляхів модернізації рудничного електровоза К14 займаються в основному вітчизняні вчені. Можна навіть виділити територіальну прив'язку більшості спеціалістів, які займаються даним напрямком досліджень. Їх розташування пов'язано з основним місцем видобутку руди – м. Кривий Ріг, з місцем основного виробництва тягового двигуна – ПАТ «Електромашина», м. Харків, та з місцями виробництва самого електровоза – ДП «НВК Електровозобудування», м. Дніпро, і ПрАТ ВКФ «Амплітуда», м. Донецьк.

У якийсь момент часу вчені, які співпрацювали з підприємством-виробником та підприємством, що експлуатує електровози, об'єдналися в одну групу. Це видно з публікованих матеріалів. Основним напрямком досліджень цієї групи стало поліпшення системи керування тяговим двигуном постійного струму (ТДПС) і підвищення надійності його роботи шляхом розробки і створення засобів моніторингу та захисту. У цю групу входять О. М. Сінчук, А. В. Омельченко, Е. С. Гузов, І. О. Сінчук, які представляють ДВНЗ «Криворізький національний університет», та В. О. Чорна, А. В. Некрасов, К. П. Ляпота з Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського.

Автори цієї статті відносять себе до групи вчених, пов'язаних з виробниками ТДПС, і представляють НТУ «ХПІ» та спеціальне конструкторське бюро ПАТ «Електромашина». Основний напрямок нашої роботи – це модернізація самого ТДПС з метою підвищення його надійності.

Роботи вчених з даних груп відрізняються системністю і логічним зв'язком, так розробка першого

напряму однієї з груп ведеться протягом як мінімум 10 років [5].

Запропонована географічна класифікація не є абсолютною, розглянута тематика зустрічається і в поодиноких роботах інших авторів. Але виділені нами два напрямки досліджень відслідковуються досить явно [4–6].

Також варто відзначити, що раніше ПАТ «Електромашина» – основний виробник ТДПС типу ДТН-45/27 [6], яким комплектується рудниковий електровоз К14 – був фактично монополістом. Однак за останні п'ять років ситуація різко змінилася і з'явилися аналоги цього двигуна – ДК-812, СТК-45 і ДТНР-45, які загострили конкурентну боротьбу, а їх поява стала поштовхом до вдосконалення даного тягового приводу.

Питанню заміни реостатних систем керування ТДПС широтно-імпульсною системою керування присвячено чимало робіт. Ефективність такої заміни не викликає сумніву в плані підвищення надійності та енергоефективності. Основні переваги такої заміни досить докладно описані [5, 13]. За кордоном також досліджуються такі питання: моделюються режими роботи ТДПС з послідовним збудженням для використання отриманих результатів в системі керування двигуном [14]; моделюються системи контролю та управління ТДПС, сумісна робота двигуна з електровозом [15].

Особливу зацікавленість з боку споживача отримують роботи, спрямовані на підвищення надійності експлуатації електровозів. Встановлено [16, 17], що основною причиною більшої частини ушкоджень ТДПС є перевищення температури нагрівання обмоток вище допустимої. У загальній вазі всіх відмов пошкодження обмоток головних і додаткових полюсів складають 44,7 %, а обмотки якоря – 39,1 % [17].

Дослідження показали, що перегрів обмоток ТДПС виникають через невідповідності існуючих режимів експлуатації двигунів режимам, встановленим в технічних умовах. Велику частину часу двигуни працюють в невідновлених режимах. Наявність вологи і пилу в повітрі при існуючій системі охолодження ТДПС, а саме, самовентиляції, погано впливає на обмотки. Усунути ці невідповідності неможливо. В [18] виконано дослідження теплових режимів ТДПС, а саме двигуна ДТН-45/27. Для цього в обмотки двигуна було встановлено термопари і проведено експериментальні дослідження, які показали [18]:

- 1) обмотка якоря нагрівається на 15–30 °С більше, ніж обмотки головних і додаткових полюсів;
- 2) максимальна температура нагрівання обмотки якоря за результатами вимірювань становила 125 °С, а з урахуванням перепаду температури в ізоляції 135–145 °С;
- 3) є істотний перепад температури охолоджуючого повітря по довжині осердя якоря, що становить 30 °С.

Факти, викладені в першому і в третьому пункті, зрозумілі, і пояснюються відсутністю аксіальних вентиляційних каналів в осерді якоря. По суті, охолоджується тільки зовнішня поверхня якоря. Що стосується другого факту, то бентежить розкид температури в 10 °С, вказаний як діапазон перепаду температури в

ізоляції. Також бажано використовувати стандартизовані терміни, адже зазначена величина 135–145 °С є перевищенням температури обмотки якоря над температурою навколишнього повітря. Тоді стають зрозумілими запропоновані в роботі рекомендації про гранично допустиму температуру нагріву для обмотки якоря 140 °С, а для обмоток головних і додаткових полюсів – 165 °С. Деякі виробники аналогів двигуна встановлюють в котушку головного полюса датчик реле температури біметалічного типу, з точкою налагодження 165 °С.

Але в технічних умовах на двигун ДТН-45/27 зазначено, що гранично допустиме перевищення температури обмотки якоря над температурою навколишнього повітря має становити 120 °С, для обмоток головних і додаткових полюсів – 155 °С, для колектора – 105 °С.

У [18] увага акцентується на перегріві обмотки якоря, що підтверджується проведеними лабораторними експериментами, хоча за результатами, наведеними в [4], частіше виходять з ладу обмотки головних і додаткових полюсів. Цей факт залишається без пояснення.

До того ж випробуванням піддавався зразок двигуна ДТН-45/27 до модернізації, яку ПАТ «Електромашина» провело у 2014 році. Тоді було здійснено перевод системи ізоляції обмотки якоря з класу нагрівостійкості F на H [6, 9]. Також стала використовуватися технологія вакуум-нагнітального просочення. Решта змін більш докладно розглянута в [6].

На підставі отриманих фактів у [18] пропонується перейти від самовентиляції до примусової вентиляції, хоча вказано на неможливість такого переходу в силу обмеження габаритів електровоза. Також проводились експерименти з примусової вентиляції двигуна через отвори, які пропонується виконувати в підшипникових щитах. Було встановлено, що при витраті повітря 5 м<sup>3</sup>/хв перевищення температури обмотки якоря над температурою навколишнього повітря складе 80 °С, а для обмоток головних і додаткових полюсів – 55 °С і 45 °С відповідно. На жаль, в [18] автори не привели методику розрахунку, а також не вказали, чи працювала самовентиляція сумісно з примусовою вентиляцією. Адже використання цих двох видів разом є нераціональним, і викликатиме турбулентність повітря при зустрічі різних охолоджувальних потоків. Результати, наведені в [18], свідчать про те, що застосування тільки системи захисту не вирішує проблему підвищення надійності роботи двигуна, а ще треба модернізувати сам двигун.

Природно найменш витратним для виробника є створення системи захисту, тому дослідження розпочаті в [18] знайшли своє продовження в роботах [4, 9, 17, 19]. Фактично всі ці роботи пов'язані з розробкою методів і засобів контролю теплового стану в експлуатаційних режимах роботи ТДПС. Основною проблемою, що розв'язувалась в [4, 9, 17, 19], є отримання достовірних даних про нагрів обмотки якоря, адже отримати дані з обертового якоря в умовах експлуатації вкрай важко.

Оскільки автори цієї статті ведуть дослідження в іншому напрямку, а саме модернізації ТДПТ, детально ці роботи розглядатися не будуть. Винятком є ро-

бота [9], де були надані деякі рекомендації по поліпшенню конструкції ТДПС типу ДТН-45/27, більшу частину з яких було проаналізовано в [6]. Також в [9] запропоновано для поліпшення самозбудження двигунів в гальмівних режимах пропонується здійснювати реверс за допомогою обмотки якоря, а осердя якоря виготовляти зі сталі з підвищеною коерцитивною силою. На жаль, цю рекомендацію важко виконати, тому що виробники навпаки намагаються здешевити двигун. Це призводить до того, що для головних полюсів виробники використовують звичайну конструкційну сталь.

Продовженням роботи [18] в напрямку модернізації ТДПС стали роботи [20, 21]. У першій частині роботи [20] більш детально описуються дослідження примусової вентиляції ТДПС, розпочаті в [18], а у другій частині розглядається робота системи захисту двигуна від перегріву. Подібний підхід свідчить про комплексність вирішення проблеми забезпечення надійності роботи ТДПС. Також в роботі наводяться формули для визначення витрати охолоджуючого повітря

$$Q_{air} = 60 \cdot \frac{10^3 \cdot \Delta P}{\rho \cdot C_p \cdot \theta_v},$$

де  $\Delta P$  – втрати потужності двигуна;

$\rho$  – щільність повітря;

$C_p$  – теплоємність повітря;

$\theta_v$  – перевищення температури повітря, що виходить з машини, над температурою повітря, що входить в машину.

На жаль, перевірити результати розрахунку неможливо, тому що в роботі не вказані прийняті значення і одиниці вимірювання щільності повітря, питої теплоємності повітря і, найголовніше, перевищення температури повітря. Але відомий результат розрахунків – витрата охолоджуючого повітря становить 5 м<sup>3</sup>/хв. [18].

У практиці проектування двигунів постійного струму прийнято використовувати формулу:

$$Q_{air} = \frac{\Sigma P}{C_v \cdot \theta_v},$$

де  $C_v$  – теплоємність повітря, Дж/с·м<sup>3</sup>.

При цьому значення  $Q_{air}$  отримується в м<sup>3</sup>/с.

На рис. 3, який взято з роботи [20], стрілками показано напрямок руху охолоджуючого повітря всередині двигуна, аналіз розташування яких свідчить про відсутність осьових каналів в осерді якоря.

Також з рис. 3. важко судити про наявність вентилятора на валу і вікнах для самовентиляції, тому що і в тексті про це нічого не сказано. Ми акцентуємо увагу на цьому факті, тому що при застосуванні примусової вентиляції, так званої «продувки», відпадає необхідність в самовентиляції, навпаки вона навіть буде шкідлива.

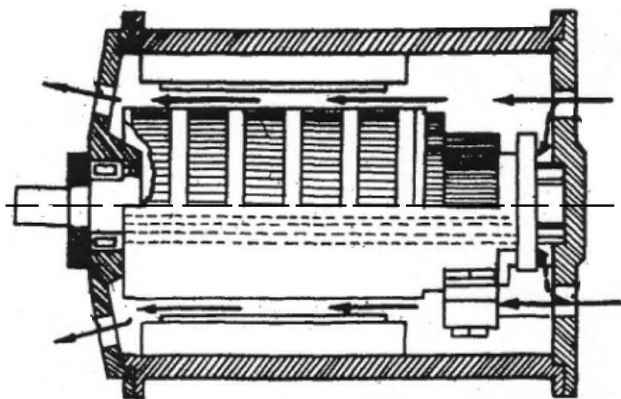


Рис 3 – Напрямок потоків повітря при примусовій вентиляції [20]

В роботі [21] ще раз наголошується на необхідності переходу до примусової вентиляції і вказується, що подібний підхід дозволить підвищити не тільки тривалу, але і годинну потужність на 20–30 %. Вказується, що з досвіду зарубіжних країн подібне рішення дозволяє підвищити потужність двигуна на 30–35 % при збереженні габаритів [21]. Однак тут же стверджується, що подібне рішення не знаходить підтримки і розуміння у вітчизняних виробників електровозів.

Ми розуміємо, що наші ТДПС за своїм рівнем відстають від провідних світових зразків, але не настільки, щоб використовувати для зразка технічних рішень ТДПС фірми ASEA, як це зроблено в роботі [21]. Фірма ASEA припинила своє існування ще в 1988 році, і після злиття з фірмою Brown Boveri стала фірмою ABB. Прикладом цьому може служити технічне рішення, запропоноване як актуальне в роботі [21], а саме, встановлення заземлюючої бронзової щітки на валу коліс для захисту від підшипникових струмів. Фірма ABB натепер використовує гібридні підшипники фірми SKF, що мають сталеві кільця і керамічні елементи кочення [22].

Ми згодні, що примусова вентиляція ефективніша, але в сучасних транспортних засобах вже використовується водяне охолодження електродвигуна, таке рішення має місце в міському транспорті. Однак, потрібно оцінювати можливості споживача і виробника в сучасних реаліях економічної ситуації. Повернемося до роботи [21], в кінці роботи запропонований варіант модернізованого ТДПС, якого названо ДТН-45М. Наведено його параметри і параметри вентиляційної установки, що забезпечує примусову вентиляцію. Хочеться відзначити, що годинна потужність залишилася незмінною 45 кВт, хоча на початку роботи стверджувалося про можливість її підвищення як мінімум на 20 %. Тривала потужність збільшена до 36 кВт, але вона і так збільшена до 35 кВт у ДТН-45/27 і всіх його аналогів. Пропонований ТДПС типу ДТН-45М має спосіб охолодження ІС37, підведення і відведення охолоджуючого повітря проводиться крізь гофровані трубки. Виникає сумнів в можливості підведення трубок з боку вільного кінця вала, адже там здійснюється зчленування з редуктором. Якщо така можливість забезпечується, то краще змінити напрямок потоку повітря, з вказаного на рис. 3, на протилежний. В такому випадку вугільний (щітковий) пил не буде продуватися крізь всю машину. Збентежив зазначений

ступінь захисту IP52, такої не існує, є IP50, IP54 і IP55 (думаємо це просто помилка). Хотілося б дізнатися докладніше, якими технічними рішеннями забезпечується цей ступінь захисту. Найнезрозумілішим для нас є вказана витрата повітря вентиляційної установки  $0,35 \text{ м}^3/\text{с}$ . До цього в роботах [18, 20, 21] вказувалося, що витрата повітря повинна складати  $5 \text{ м}^3/\text{хв}$ , зробивши прості підрахунки,  $0,35 \times 60 = 21 \text{ м}^3/\text{хв}$ . Видно, що витрата повітря зросла в 4 рази в порівнянні з представленими раніше даними. Ми сподіваємося, що ця плутанина виникла при використанні різних одиниць розмірності однієї і тієї величини, про що ми гадували раніше.

Як зазначалося в [6, 23] замовник запропонував ПАТ «Електромашина» підвищити годинну потужність двигуна ДТН-45/27 з 45 кВт до 60 кВт без зміни габариту. В роботі [6] нами були проаналізовані конструкція модернізованого двигуна ДТН-45/27 і його аналогів, а також намічений план спільної роботи з спеціальним конструкторським бюро (СКБ) підприємства. В результаті СКБ запропонувало розглянути варіант збільшення довжини осердя якоря на 30 мм. Це стало можливим завдяки зміні конструкції траверси. Звичайно використовувалася траверса з двома бракетами по дві щітки на кожному, вирішили використовувати чотири бракети по одній щітці. В роботі [23] було виконано попередній аналіз і оцінено збільшення густини струму в обмотках. Потім був виконаний електромагнітний розрахунок зі збереженням поперечної пазової зони якоря, який не задовольнив вимогам, тобто геометрію активної зони потрібно міняти. Новий розрахунок з зміненою геометрією пазової зони показав можливість реалізації такої потужності. Однак перевірений тепловий розрахунок, забракував цей варіант. На жаль методика теплового розрахунку, яка використовується на ПАТ «Електромашина», не дає адекватних результатів навіть для базового варіанту двигуна.

У свою чергу на ПАТ «Електромашина» було вирішено перевірити ідею про можливість збільшення довжини пакета. Для цього в серпні 2017 року було виготовлено кілька дослідних зразків ТДПС типу ДТН-45/27 з укороченим колектором. Подібне рішення було обґрунтовано можливістю економії колекторної міді і зниженням ціни двигуна.

У вересні 2017 року були проведені типові випробування одного з цих двигунів. Вони показали зростання перевищення температури обмоток і колектора у порівнянні з базовим зразком. Така ситуація пов'язана зі зменшенням площі охолодження колектора. Як відзначено в [18] ТДПС представляє складний об'єкт, тому тепловий стан в динамічних режимах роботи не можливо точно визначити розрахунком його температурного поля. Ми згодні, що це важка задача, але шляхи її вирішення є, треба тільки визначити вірний. Зокрема в роботах [24, 25] наводяться результати дослідження температурного поля двигунів з постійними магнітами для приводу шахтних електровозів. У дослідженні [24, 25] використовувалися сучасні пакети програм. Із аналізу виконаних досліджень видно, що завдання модернізації ТДПС типу ДТН-45/27 є актуальною, тому що споживач вимагає підвищити надійність і часову потужність двигуна.

Вирішення цього завдання можливе шляхом застосування системи примусової вентиляції, однак виробники електровозів не згодні на такі «глобальні» зміни в його конструкції. На нашу думку двигун потребує перепроектування, чому вже не дуже «радіють» виробники ТДПС, але вони готові розглядати такий варіант. Основною проблемою є необхідність визначення реального теплового стану двигуна. Все проведені дослідження свідчать про відсутність «інженерного» інструменту, для оцінки теплового стану двигуна. Основна інформація про тепловий стан двигуна отримується тільки при випробуваннях.

**Ціль та задачі дослідження.** Використовуючи аналіз теплового стану різних модифікацій ТДПС типу ДТН-45/27, оцінити можливість його подальшої модернізації з метою підвищення часової потужності.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі задачі:

- проаналізувати тепловий стан різних варіантів модернізованого ТДПС типу ДТН-45/27;
- виконати порівняльну оцінку теплового стану трьох варіантів двигунів: базового, з модернізованим вентилятором та з укороченим колектором.
- розглянути подальші шляхи дослідження та модернізації двигуна ДТН-45/27.

**Результати випробувань на нагрівання різних модифікацій ТДПС типу ДТН-45/27.** Тяговий двигун постійного струму типу ДТН-45/27 виробництва ПАТ «Електромашина» – це двигун з послідовним збудженням, має класичну конструкцію з головними та додатковими полюсами. Двигун має конструктивне виконання рудникове нормальне, захищене IP43 (забезпечується корпусом електровоза), з самовентиляцією IC01.

Випробування проводились для трьох зразків двигунів: перший – це звичайний серійний двигун (рис. 5); другий – має поліпшений вентилятор (змінилася довжина і ширина вентиляційних лопаток); третій – має укорочений колектор (рис. 6).

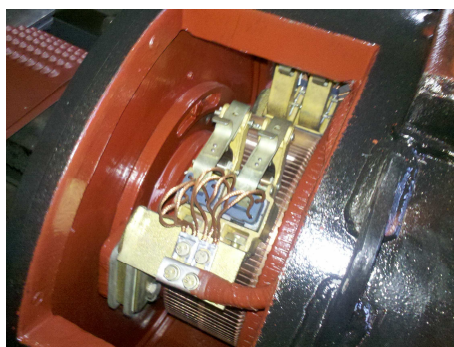


Рис. 5 – Зовнішній вигляд звичайного колектора, у вікні спостерігаємо дві щітки на бракеті

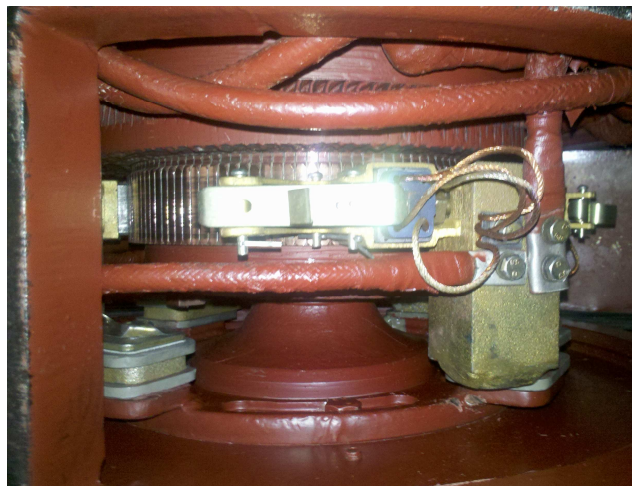


Рис. 6 – Зовнішній вигляд укороченого колектора, у вікні спостерігаємо одну щітку на бракеті

Всі розглянуті двигуни мають ізоляцію однакового класу нагрівостійкості Н.

Випробування ТДПС типу ДТН-45/27 проводились на випробувальній станції ПАТ «Електромашина» (рис. 7).

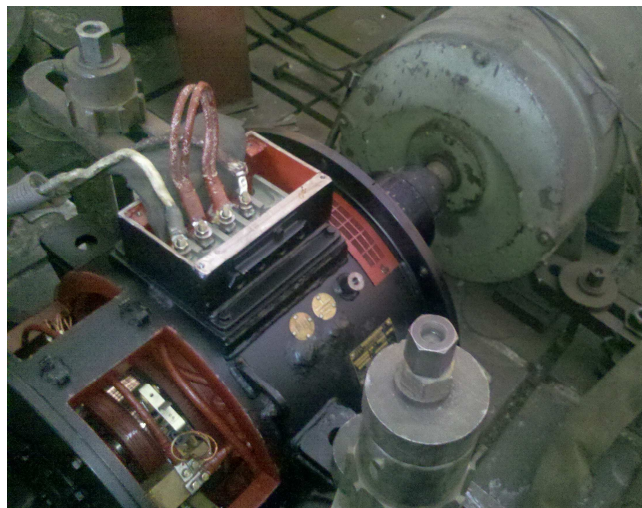


Рис. 7 – Випробувальний стенд ПАТ «Електромашина», на якому проходить випробування ТДПС типу ДТН-45/27 з укороченим колектором

У табл. 1 представлені результати випробувань для годинного режиму роботи (S2, тривалістю роботи 60 хв.) при потужності двигуна 45 кВт, в табл. 2 – для тривалого режиму роботи (S1) і потужності 27 кВт, в табл. 3 – для тривалого режиму роботи (S1) і потужності 35 кВт. Також в таблиці наведені результати випробувань електродвигуна ДТН-45/27 виробництва ТОВ «Харківський завод електричних машин», якого було надано для випробувань. На жаль, в наданому зразку був відсутній вентилятор. Вимірювання перевищення температури обмоток двигуна проводилося методом опорів, колектора і підшипників – методом термометра.

Таблиця 1 – Перевищення температур обмоток и частин двигунів для годинного режиму роботи (S2, 60 хв.) при потужності 45 кВт

Тип двигуна	Струм якоря, А	Частота обертання, об/хв	Виміряні перевищення температур, °С				
			Обмотка якоря	Обмотка додаткових полюсів	Обмотка головних полюсів	Колектор	Підшипники
Двигун ДТН-45/27	204	1310	96	122	130	72	38
ДТН-45/27 з поліпшеним вентилятором		1310	80	114	111	71	–
ДТН-45/27 з укороченим колектором		1305	111	130	137	110	24
ДТРН-45/27		1315	119	227	195	124	27

Таблиця 2 – Перевищення температур обмоток и частин двигунів для тривалого режиму роботи (S1) при потужності 27 кВт

Тип двигуна	Струм якоря, А	Частота обертання, об/хв	Виміряні перевищення температур, °С				
			Обмотка якоря	Обмотка додаткових полюсів	Обмотка головних полюсів	Колектор	Обмотка якоря
Двигун ДТН-45/27	122	1540	70	86	89	69	35
ДТН-45/27 з поліпшеним вентилятором		1540	41	45	46	45	–
ДТН-45/27 з укороченим колектором		1575	96	73	79	78	32
ДТРН-45/27		1640	95	182	112	118	43

Таблиця 3 – Перевищення температур обмоток и частин двигунів для тривалого режиму роботи (S1) при потужності 35 кВт

Тип двигуна	Струм якоря, А	Частота обертання, об/хв	Виміряні перевищення температур, °С				
			Обмотка якоря	Обмотка додаткових полюсів	Обмотка головних полюсів	Колектор	Обмотка якоря
Двигун ДТН-45/27	158	1460	90	97	101	71	35
ДТН-45/27 з поліпшеним вентилятором		1540	41	45	46	45	–
ДТН-45/27 з укороченим колектором		1410	117	111	116	118	38
ДТРН-45/27		1470	113	236	171	134	47

**Аналіз результатів випробувань, що характеризують тепловий стан різних модифікацій досліджуваного ТДПС.** Аналізуючи результати випробувань на нагрівання різних модифікацій ТДПС типу ДТН-45/27 виробництва ПАТ «Електромашина», очевидно, що самим навантаженим за тепловим станом є годинний режим роботи. А найнагрітою частиною двигуна є обмотка головних полюсів, далі за ступенем нагрівання йдуть обмотка додаткових полюсів, обмотка якоря і колектор. Це відповідає висновкам, зробленим в роботі [4], про те, що найчастіше виходять з ладу обмотки головних і додаткових полюсів.

Застосування вентилятора з поліпшеними параметрами дозволяє забезпечити більш ефективне охолодження частин двигуна, різниця становить 10–15 °С в найскладнішому за тепловим станом режимі роботи S2, 60 хв. Перевищення температури обмоток також зросло на 7–15 °С у порівнянні з серійним двигуном.

Однак це не стосується колектора.

Результати випробувань двигуна з укороченим колектором показують, що його перевищення температури становить 111 °С, а значить перевищує допустиме значення, яке дорівнює 105 °С. Це свідчить про недостатнє охолодження колектора через зменшення його зовнішньої поверхні.

Порівняння даних, отриманих нами, з експериментальними даними, отриманими в роботі [18], не проводилось, тому що випробуванням підлягала застаріла «версія» двигуна ДТН-45/27, яка виготовлялась з ізоляцією обмотки якоря класу нагрівостійкості F. Крім того, при дослідженнях використовувалися різні методи вимірювань: у [18] – застосовувались термомари (метод термометра), в нашому – вимірювання здійснювались методом опору.

Результати випробувань двигуна ДТРН-45/27 не можна порівнювати внаслідок відсутності у зразка

вентилятора.

### Висновки та перспективи подальшого розвитку досліджень.

1. Аналіз робіт та виконаних досліджень показав, що спостерігається недолік охолодження ТДПС типу ДТН-45/27. Однак ця ситуація характерна тільки для годинного режиму роботи, до того ж вона пояснюється недотриманням затверджених в технічних умовах режимів роботи і важкими умовами експлуатації.

2. Застосування різних способів і методів захисту двигуна від перегріву не вирішує проблему, а лише дозволяє двигуну не вийти з ладу.

3. Застосування примусової вентиляції двигуна, запропоноване в роботах [18, 20, 21], могло б вирішити проблему надмірного нагріву двигуна. Однак це призведе до необхідності розташування в електровозі вентиляційної установки, на що не погоджуються виробники електровозів. Крім того, така вентиляція буде ефективною тільки при розміщенні вентиляційних каналів в осерді якоря. Це потребує перерахунку двигуна через зміни розподілу магнітного поля в двигуні, тобто зміняться його параметри. Перевагою такої системи є кращий у порівнянні з самовентильацією захист частин, що знаходиться в середині двигуна.

4. Вважаємо за необхідне розглянути різні варіанти охолодження (системи вентиляції) двигуна. Наприклад, застосувати двоконтурну систему охолодження або встановити мотор-вентилятор замість звичайного вентилятора.

5. На даному етапі досліджень ідея підвищення годинної потужності ТДПС до 60 кВт за рахунок зменшення довжини колектора показала себе неспроможною через надмірний перегрів колектора.

6. У подальших планах нашої роботи проведення досліджень щодо розміщення осьових вентиляційних каналів в якорі, що дозволить пустити потік холодного повітря по осердю, під лобовим частинами обмотки якоря і під колектором. Це має вирішити проблему перепаду температури повітря по довжині осердя якоря і більш ефективно охолоджувати колектор.

7. Фізичне моделювання вимагає значних коштів, тому планується провести подальші дослідження з використанням пакета програм Ansys Maxwell. Даний пакет дозволяє розрахувати магнітне і теплове поле двигуна, провести оптимізаційні розрахунки. Також в наших планах перевірити ефективність методу еквівалентних схем заміщень для теплового розрахунку двигуна ДТН-45/27. Ми не залишаємо надії підвищити годинну потужність двигуна до 60 кВт.

### Список літератури

1. Mine locomotion. Режим доступу : <http://www.infomine.com/library/publications/docs/InternationalMiningMoore2012k.pdf>. – Дата звертання : 17 вересня 2017.
2. Дебелый В. Л. Основные направления развития шахтного локомотивного транспорта / В. Л. Дебелый, Л. Л. Дебелый, С. А. Мельник // Уголь Украины. – № 6. – 2006. – С. 30–31.
3. Бутт Ю. Ф. Шахтный подземный транспорт: справочное издание: в 2-х т. / Ю. Ф. Бутт, В. Б. Грядущий, В. Л. Дебелый [и др.]. Под общ. ред. Б. А. Грядущего. – Т. 1. – Донецк: «ВИК», 2009. – 481 с.
4. Гузов Э. С. Розробка безсенсорного способу захисту тягових електричних двигунів рудничних електровозів від перегріву / Э. С. Гузов, И. О. Синчук, В. О. Черная, Л. Н. Сменова // Вісник НТУ «ХП». – 2015. – № 12 (1121). – С. 204–208.
5. Синчук И. О. К вопросу выбора типа и системы управления тяговым электроприводом рудничных электровозов / И. О. Синчук, К. П. Ляпота, Э. С. Гузов, О. Е. Мельник // Електротехнічні і енергозберегаючі системи. – Вип. 1/2007 (1). – 2007. – С. 27–31.
6. Шайда В. П. Анализ путей модернизации тягового привода постоянного тока ДТН-45/27, предназначенного для привода рудничного контактного электровоза / В. П. Шайда, Е. Ю. Юрьева, Д. А. Гринь // Вісник НТУ «ХП». Серія Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – 2016. – №32(1204). – С. 53–57.
7. Синчук И. О. Синергетический тяговый асинхронный электро-технический привод для контактно-аккумуляторного двухосного электровоза / О. Н. Синчук, Д. А. Шокарев, Е. И. Скана, Э. С. Гузов, Ф. И. Караманец // Електротехнічні і енергозберегаючі системи. – 2011. – Вип. 4/2011 (16). – С. 65–68.
8. Офіційний сайт ВАТ «Електротехніка Нові Технології». Режим доступу : <https://ukrainemotors.com.ua/projects/elektrotransport/ventilnii-tyagovii-e-1>. Дата звертання : 17 вересня 2017.
9. Синчук И. О. Вопросы повышения надежности системы мониторинга температурных режимов тяговых электрических двигателей рудничных электровозов / О. Н. Синчук, Э. С. Гузов, И. О. Синчук, Д. О. Кальмус, В. О. Чорная // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Вип. 4/2014 (87). – 2014. – С. 44–50.
10. Polnik B. Effective Control of a Battery Supplied Mine Locomotive Unit / B. Polnik, Z. Budzynski, B. Miedzinski // Elektronika ir elektrotechnika. – 2014. – VOL. 20. – no. 3 – P. 39–43. – doi: <http://dx.doi.org/10.5755/j01.eee.20.3.3319>.
11. Офіційний сайт Clayton Equipment Ltd. Режим доступу : <http://claytonequipment.co.uk/2014/12/17/product-development>. Дата звертання : 17 вересня 2017.
12. Офіційний сайт ZIBO GOD ROCK MINING MACHINERY CO., LTD. Режим доступу : <http://www.rockloaders.com/products.asp>. Дата звертання : 17 вересня 2017.
13. Карпухин А. П. Энергоэффективность шахтных и карьерных электровозов / А. П. Карпухин, И. В. Андросов, В. Э. Демин, В. П. Степаненко // VII Международная студенческая электронная научная конференция «СТУДЕНЧЕСКИЙ НАУЧНЫЙ ФОРУМ 2015». – Режим доступу: <https://www.scienceforum.ru/2015/833/10020>
14. Barna G. Simulation model of a series DC motor for traction rail vehicles / G. Barna // 2016 21st International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), Miedzyzdroje. – 2016. – P. 531–536. – doi: 10.1109/MMAR.2016.7575192
15. Devarajan M. Implementation of Single and double stage control of DC traction motor using matlab / M. Devarajan // International Journal of Mechatronics, Electrical and Computer Technology. – 2014. – Vol. 4(13). – P. 1404–1415.
16. Черная В. О. К вопросу анализа поврежденных тяговых двигателей шахтных электровозов / В. О. Черная // Молодь: наука та інновації. Перша всеукраїнська науково-технічна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених. – Дніпропетровськ : ВНЗ «НГУ». – 2013. – С. 421–422.
17. Синчук О. М. До питання комплексності контролю параметрів функціонування електромеханічних систем шахтних електровозов / О. М. Синчук, Е. С. Гузов, І. О. Синчук, В. О. Чорна // Електрифікація транспорту. – 2015. – № 9. – С. 94–101.
18. Синчук И. О. Исследования тепловых режимов тяговых электрических двигателей рудничных контактных электровозов / И. О. Синчук, В. О. Черная // Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика. – Кременчук : КрНУ, 2014. – Вип. 1/2014 (2). С. 98–100.
19. Черная В. О. Оценка температурных режимов тяговых электрических двигателей рудничных электровозов посредством использования корреляционной теории случайных функций / В. О. Черная, А. В. Омельченко // Електромеханічні і енергозберегаючі системи. – 2015. – Випуск 4/2015 (32). – С. 82–88.
20. Некрасов А. В. Контроль температурных режимов та охолодження тягових двигунів електротехнічних комплексів в процесі експлуатації / А. В. Некрасов, В. О. Чорна, Є. М. Кас'янов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХП», 2016, № 50(1222), р. 122–126.
21. Черная В. О. Разработка усовершенствованной конструкции тяговых двигателей постоянного тока для шахтных контактных электровозов / В. О. Черная // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – 2016. – вип. 29. – С. 287–292.

22. Новый стандарт // Evolution. – 21 Декабрь 2010. – Режим доступу : <http://evolution.skf.com/ru/новый-стандарт/>
23. Гринь Д. О. Дослідження можливості підвищення годинної потужності тягового двигуна постійного струму ДТН-45/27 / Д. О. Гринь, В. П. Шайда // Матер. 11-ї університетської наук.-прак. студентська конф. магістрантів НТУ "ХПІ", 18-21 квітня 2017 р. – Харків : НТУ "ХПІ", 2017. – Ч. 2. – С. 16–17.
24. Матющенко А. В. Анализ теплового состояния тягового вентиляционного двигателя с постоянными магнитами для шахтного электровоза / А. В. Матющенко // Электротехника и Электромеханика. – 2016. – №6. – С. 15–18. – doi: 10.20998/2074-272X.2016.6.03.
25. Tsarafidy Raminosa. Test Results for a High Temperature Non-Permanent Magnet Traction Motor / Tsarafidy Raminosa, Ayman El-Refaie, David Torrey, Kevin Grace, Di Pan, Stefan Grubic, Karthik Bodla, Kum-Kang Huh // Industry Applications IEEE Transactions. – 2017. – Vol. 53. – no. 4. – P. 3496–3504. – DOI 10.1109/TIA.2017.2687870.
- References (transliterated)**
- Mine locomotion. Available at: <http://www.infomine.com/library/publications/docs/InternationalMiningMoore2012k.pdf>. (accessed: 17.09.2017).
  - Debelyi V. L., Debelyi L. L., Mel'nik S. A. *Osnovnye napravleniya razvitiya shahtnogo lokomotivnogo transporta* [The main directions of development of the mine locomotive transport]. *Ugol' Ukrainy – Ukraine Coal*. 2006, no. 6, p. 30–31
  - Butt Yu. F., Gryaduschiy V. B., Debelyiy V. L., Koval' A. N., Furman A. L., Schuka V. M., Yatsenko V. A. *Shahtnyy podzemnyy transport: spravochnoe izdanie: v 2-h t.* [Mine underground transport: a reference book: in 2 vol., Vol. 1], Donetsk: «VIK», 2009, 481 p.
  - Guzov E., Sinchuk I., Cherna V., Smenova L. *Rozrobka bezsensoro-noho sposobu zakhystu tyahovykh elektrichnykh dvyhunyv rudnykhnykh elektrovoziv vid perehrivu* [Development sensorless way to protect the electric motor traction mine electric locomotives overheating]. *Visnyk NTU "KhPI"*. – Bulletin of NTU "KhPI". 2015, № 12 (1121), p. 204–208.
  - Sinchuk I. O., Ljapota K. P., Guzov Je. S., Mel'nik O. E. *K voprosu vybora tipa i sistemy upravleniya tjagovym jelektroprivodom rudnichnykh elektrovozov* [On the question of the choice of the type and control system electric traction miner electric locomotives]. *Elektromekhanichni i energozberigayuchi sistemi – Electromechanical and energy saving systems*. Release 1/2007 (1), 2007, p. 27–31
  - Shayda V. P., Yurieva O. Yu., Hryn' D. O. *Analiz putey modernyzatsyy tyahovoho dvyhatela postoyannoho toka DTN-45/27, prednazhachenoho dlya pryvoda rudnychnoho kontaktneho elektrovoza* [Analysis of ways to modernize the traction motor DC DTH-45/27 for the drive of miner contact electric locomotive]. *Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Problemy udoskonalyuvannya elektrichnykh mashyn i aparativ.* – Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. 2016, №32(1204), p. 53–57.
  - Sinchuk O. N., Shokarev D. A., Skapa E. I., Guzov Je. S., Karamanec F. I. *Sinergeticheskij tjagovyj asinhromnyj jelektrotekhnicheskij privod dlja kontaktno-akkumuljatornogo dvuhosnogo elektrovoza* [Synergetic asynchronous traction drive for electrical contact battery two-axle locomotive]. *Elektromekhanichni i energozberigayuchi sistemi – Electromechanical and energy saving systems*, release 4/2011 (16), 2011, p. 65–68.
  - The official website of the company Ltd "Electrical New Technology". Available at: <https://ukrainemotors.com.ua/projects/elektrotransport/ventilnij-tyagovii-e-1>. (accessed: 17.09.2017).
  - Sinchuk O. N., Guzov Je. S., Sinchuk I. O., Kal'mus D. O., Chornaja V. O. *Voprosy povysheniya nadezhnosti sistemy monitoringa temperaturykh rezhimov tjagovykh elektricheskikh dvigatelej rudnichnykh elektrovozov* [Questions of increase of reliability of the monitoring system of temperature modes of traction electric motors mine electric locomotives]. *Visnyk Kremenchuts'koho natsional'noho universytetu imeni Mykhayla Ostrogradsk'oho – Bulletin of Kremenchuk National University named Mykhailo Ostrogradsky.* – Bulletin of Kremenchuk National University named Mykhailo Ostrogradsky. 2014, release 4/2014 (87), p. 44–50.
  - B. Polnik, Z. Budzynski, B. Miedzinski Effective Control of a Battery Supplied Mine Locomotive Unit, *Elektronika ir elektrotehnika*, vol. 20, no. 3. doi: <http://dx.doi.org/10.5755/j01.eee.20.3.3319>
  - The official website of the company Clayton Equipment Ltd. Available at: <http://claytonequipment.co.uk/2014/12/17/product-development>. (accessed: 17.09.2017).
  - The official website of the company ZIBO GOD ROCK MINING MACHINERY CO., LTD. Available at: <http://www.rockloaders.com/products.asp>. (accessed: 17.09.2017).
  - Karpukhyn A. P., Androsoy Y. V., Demyn V. E., Stepanenko V. P. *Energoeffektivnost shahtnykh i karernykh elektrovozov* [Energy efficiency of mine and quarry electric locomotives]. *VII Mezhdunarodnaya studencheskaya elektronnyaya nauchnaya konferentsiya «STUDENCHESKIY NAUCHNIY FORUM 2015».* – VII International Student Electronic Scientific Conference "STUDENT SCIENTIFIC FORUM 2015". – Available at: <https://www.scienceforum.ru/2015/833/10020>
  - G. Barna. Simulation model of a series DC motor for traction rail vehicles, "2016 21st International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), Miedzyszdroje, 2016, pp. 531–536. doi: 10.1109/MMAR.2016.7575192.
  - Devarajan M. Implementation of Single and double stage control of DC traction motor using matlab, *International Journal of Mechatronics, Electrical and Computer Technology*, 2014, Vol. 4(13), p. 1404–1415.
  - Chornaja V. O. *K voprosu analiza povrezhdeny tyahovykh dvyhateley shakhtnykh elektrovozov* [To the issue of the analysis of damage to traction motors of mine electric locomotives]. *Molod' nauka ta innovatsiyi. Persha vseukrayins'ka naukovo-tekhnichna konferentsiya studentiv, aspirantiv ta molodykh vchenykh* – [Youth: science and innovation. The first All-Ukrainian scientific and technical conference of students, postgraduates and young scientists.]. Dnipropetrovs'k : VNZ «NHU», 2013, p. 421–422.
  - Sinchuk O. N., Guzov E. S., Sinchuk I. O., Chorna V. O. *Do pytannya kompleksnosti kontrolyu parametriv funktsionuvannya elektromekhanichnykh system shakhtnykh elektrovoziv* [To the issue of the complexity of the control operation parameters of electromechanical systems of mine electric locomotives]. *Transport electrification. – Elektrifikatsiya transportu*, 2015, № 9, p. 94–101.
  - Sinchuk I. O., Chorna V. O. *Yssledovannya teplovykh rezhimov tyahovykh elektricheskyykh dvyhateley rudnychnykh kontaktnykh elektrovozov* [Investigation of thermal modes of traction electric motors of mine contact electric locomotives]. *Problems of energy saving in electrical engineering systems. Science, education and practice. – Problemy enerhoresursozberezhennya v elektrotekhnichnykh systemakh. Nauka, osvita i praktyka.* Kremenchuk: KrNU, 2014, release 1/2014 (2), p. 98–100.
  - Chornaja V. O., Omelchenko A. V. *Otsenka temperaturnykh rezhimov tyahovykh elektricheskyykh dvyhateley rudnychnykh elektrovozov posredstvom yspol'zovannya korrelyatsionnoy teoryi sluchaynykh funktsiy* [Estimation of temperature regimes of traction electric motors of mine electric locomotives using the correlation theory of random functions]. *Electromechanical and energy saving systems. – Elektromekhanichni i enerhozberihayuchi systemy*, 2015, release 4/2015 (32), p. 82–88.
  - Nekrasov A., Chorna V., Kasyanov E. *Kontrol' temperaturnykh rezhymiv ta okholodzheniya tyahovykh dvyhunyv elektrotekhnichnykh kompleksiv v protsesi ekspluatatsiyi* [Controlling temperature and cooled traction motors electrical systems during operation], *Bulletin of NTU "KhPI"*. Series: Mechanical-technological systems and complexes, Kharkov: NTU "KhPI", 2016, No 50 (1222), p.122–126.
  - Chornaja V. O. *Razrabotka usovershenstvovannoy konstruktсии tyagovykh dvigateley postoyannogo toka dlya shahtnykh kontaktnykh elektrovozov* [Development of an improved design of DC traction motors for mine electric locomotives]. *Engineering in agricultural production, branch engineering, automation*, 2016, release 29, p. 287–292.
  - New standard. Evolution. – 2010, December, 21. – Available at: <http://evolution.skf.com/ru/новый-стандарт>.
  - A.V. Matyuschenko *Analiz teplovoho sostoyannya tyahovoho ventyl'noho dvyhatela s postoyannymy mahnytamy dlya shakhtnoho elektrovoza* [Analysis of thermal state of traction brushless permanentmagnet motor for mine electric locomotive]. – *Electrical engineering & electromechanics*, 2016, №6, p. 15–18. – doi: 10.20998/2074-272X.2016.6.03.
  - T. Raminosa et al. Test Results for a High Temperature Non-Permanent-Magnet Traction Motor, in *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2017, vol. 53, no. 4, pp. 3496–3504. doi: 10.1109/TIA.2017.2687870.

Надійшло (received) 02.10.2017



## Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Аналіз теплового стану різних модифікацій рудникового тягового двигуна постійного струму типу ДТН-45/27 / В.П. Шайда, О.Ю. Юр'єва, С.Є. Дзеніс // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 34 (1256). – С. 38–46. – Библиогр.: 25 назв. – ISSN 2079-3944.**

**Анализ теплового состояния различных модификаций рудничного тягового двигателя постоянного тока типа ДТН-45/27 / В.П. Шайда, Е.Ю. Юрьева, С.Е. Дзенис // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 34 (1256). – С. 38–46. – Библиогр.: 25 назв. – ISSN 2079-3944.**

**Analysis of the thermal state of various modifications of the mining traction motor DC type ДТН-45/27 / V.P. Shayda, O.Yu. Yurieva, S.E. Dzenis // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of improvements electrical machinery and apparatus. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No. 34 (1256). – P. 38–46. – Bibliogr: 25. – ISSN 2079-3944.**

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Шайда Віктор Петрович** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних машин, тел. (057) 707-68-44; e-mail: viktor-shayda@ukr.net.

**Шайда Виктор Петрович** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры электрических машин, тел. (057) 707-68-44; e-mail: viktor-shayda@ukr.net.

**Shaida Viktor Petrovich** – Ph.D., Associate Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Associate Professor of the Department of Electrical machines, tel. +38 (057) 707-68-44; e-mail: viktor-shayda@ukr.net.

**Юр'єва Олена Юр'ївна** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних машин, тел. (057) 707-68-44; e-mail: ele6780@gmail.com.

**Юрьева Елена Юрьевна** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры электрических машин, тел. (057) 707-68-44; e-mail: ele6780@gmail.com.

**Yurieva Olena Yuriyivna** – Ph.D., Associate Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Associate Professor of the Department of Electrical machines, tel. +38 (057) 707-68-44; e-mail: ele6780@gmail.com.

**Дзеніс Сергій Євгенович** – начальник Спеціального конструкторського бюро ПАТ «Електромашина», м. Харків, тел. (057)373–75–30, +380506328429, e-mail: s\_dzenis@rambler.ru

**Дзенис Сергей Евгеньевич** – начальник Специального конструкторского бюро ПАО «Электромашина», г. Харьков, тел. (057)373–75–30, +380506328429, e-mail: s\_dzenis@rambler.ru

**Dzenis Sergii Evgenovych**, Chief of the Special Design Bureau of Public Company "Electromashina", Kharkiv, (057) 373–75–30, +380506328429, e-mail: s\_dzenis@rambler.ru