

УДК 629.423.315

В.О. ЧЕРНАЯ, Д.А. ШОКАРЕВ**ТЯГОВЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА ДЛЯ ШАХТНЫХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ С УЛУЧШЕННОЙ СИСТЕМОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ**

В работе проведен анализ существующих способов охлаждения тяговых электрических машин рудничных электровозов и условий их эксплуатации в подземных выработках горнорудных предприятий. Рассмотрены известные конструктивные варианты тяговых электрических двигателей отечественного и зарубежного производства, выявлены их преимущества и недостатки. Проведена оценка эффективности системы вентиляции тягового электрического двигателя ДТН-45 шахтного контактного электровоза. Представлены результаты лабораторных исследований по определению температуры нагрева элементов тягового двигателя при естественной и принудительной вентиляции. Установлены оптимальные значения напора и расхода охлаждающего воздуха.

Ключевые слова: электровоз, тяговый электрический двигатель, нагрев, вентиляция, температура, надежность

В роботі проведено аналіз існуючих способів охолодження тягових електричних машин рудничних електровозів і умов їх експлуатації в підземних виробках гірничорудних підприємств. Розглянуто відомі конструктивні варіанти тягових електричних двигунів вітчизняного та зарубіжного виробництва, виявлено їх переваги та недоліки. Проведено оцінку ефективності системи вентиляції тягового електричного двигуна ДТН-45 шахтного контактного електровоза. Представлені результати лабораторних досліджень з визначення температури нагріву елементів тягового двигуна при природній і примусовій вентиляції. Встановлено оптимальні значення напору і витрати охолоджуючого повітря.

Ключові слова: електровоз, тяговий електричний двигун, нагрів, вентиляція, температура, надійність

In the article the analysis of the existing ways of cooling of traction electrical machines of miner electric locomotives and conditions of their operation in mine working of the mining enterprises was carried out. The known constructive options of traction electric motors of domestic and foreign production are considered, their advantages and disadvantages were revealed. The assessment of system effectiveness of ventilation of the traction DTN-45 electric motor of a mine contact electric locomotive was carried out. The results of laboratory researches on the determination of temperature of heating of elements of the traction engine at natural and compulsory ventilation were presented. The optimum values of pressure and consumption of the cooling air were established.

Key words: electric locomotive, traction electric motor, heating, ventilation, temperature, reliability

Введение. Известно, что используемые на современных типах рудничных контактных электровозов К14 тяговые электрические двигатели (ТЭД) типа ДТН-45, с их различными модификациями, по своему конструктивному исполнению и отсутствию действенной системы контроля параметров тяговых машин не соответствуют условиям эксплуатации в железорудных шахтах и требованиям служб эксплуатации внутришахтного транспорта (ВШТ) этих предприятий [1, 2].

Так, ПАО «Электромашина» (г. Харьков) – до недавнего времени отечественный монополист по выпуску двигателей ДТН-45 различных их модификаций – делал и продолжает делать немало усилий по совершенствованию конструкции, начиная с предшественников нынешних ДТН-45 и ЭТ-45. Однако ожидаемого ощутимого совершенства пока не достигнуто, как не достигнуто это в той или иной мере в новых образцах тяговых двигателей производства Смелянского машиностроительного завода.

Актуальность исследований. Перед изыскателями-конструкторами ТЭД для тяговых электротехнических комплексов шахтных контактных электровозов при построении тактики выбора электрических параметров двигателей по-прежнему, как и ранее, стоит архиважная задача – достижение высокого уровня надежности и создание условий для максимально возможного приближения длительной мощности ТЭД к часовой. В значительной степени это связано с вопросами охлаждения двигателей, поскольку уровень компенсации недостаточности естественной эксплуатационной вентиляции ТЭД искусственным путем в контексте габаритов и условий работы шахтных электровозов сопряжено с невозможностью решения данной проблемы известными способами [3, 4]. Суть же задачи вентиляции ТЭД (как естественной, так и искусствен-

ной) – это отвод тепла при работе двигателя. Отвод этого тепла особенно актуален для охлаждения таких элементов ТЭД как якорь и обмотки элементов, наименее обдуваемых потоком воздуха [5].

Цель исследований. Усовершенствование конструкции тягового электродвигателя рудничного контактного электровоза с учетом необходимости улучшения отвода тепла в процессе его функционирования на электроподвижном составе в условиях железорудных шахт.

Материал исследований. Проблема охлаждения ТЭД является непростой для любого вида электрифицированного транспорта. В силу имеющихся возможностей каждого отдельно взятого вида транспорта эта проблема решается по-разному.

В частности, на магистральных и промышленных типах электровозов необходимую вентиляцию обеспечивают мотор-вентиляторы [6, 7]. Однако такой вариант, как и многие аналогичные, для условий отечественных шахтных электровозов неприемлем в силу жестких массогабаритных ограничений [8].

В то же время, как свидетельствуют многочисленные исследования, проведенные в условиях действующих шахт Криворожского железорудного бассейна [5], общей тенденцией большинства рейсов шахтных электровозов является колебательный процесс изменения температуры нагрева ТЭД с превышением температурных показателей выше допустимых пределов (рис. 1). Невозможность спрогнозировать характер изменения температуры ТЭД в процессе рейса и рабочей смены требует решения вопроса повышения надежности функционирования как самого двигателя, так и всего электротехнического комплекса, которое видится в создании эффективной системы охлаждения ТЭД и разработке комплексного

© В.О. Черная, Д.А. Шокарев, 2017

технического решения по контролю и защите ТЭД от превышения температурных режимов [5].

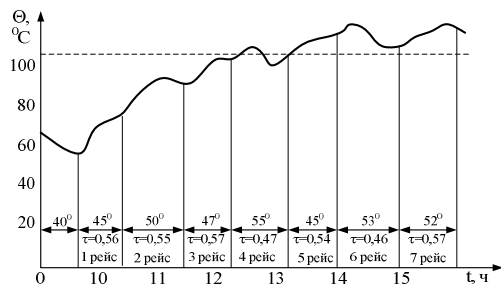


Рис. 1 – Изменение температуры обмотки якоря тягового двигателя ДТН-45 в течение рабочей смены электровоза К14

Следует отметить, что по видам охлаждения ТЭД подразделяются на:

- закрытые неветилируемые двигатели, к которым относятся большинство двигателей отечественных рудничных электровозов;
- двигатели с независимой вентиляцией от отдельных вентиляторов – двигатели зарубежных тяжелых электровозов;
- самовентилируемые двигатели с вентиляторами, устанавливаемыми на валу двигателя, – на отечественных тяжелых контактных электровозах.

В зависимости от вида системы вентиляции изменяются допустимые нагрузки ТЭД и их продолжительность (рис. 2). С усилением охлаждения ТЭД возрастает не только продолжительная мощность двигателя, но и часовая, но в меньшей степени – 20–30 %. При независимом охлаждении можно несколько уменьшить размеры двигателя, но в целом за счет дополнительной вентиляционной установки размеры системы привода возрастают, возрастают также затраты, поэтому данный вариант на отечественных электровозах не нашел применения.

На тяжелых отечественных электровозах массой 14 т применены самовентилируемые ТЭД за счет вентилятора, установленного на валу внутри двигателя, и через окна на концах двигателя происходит продувка. Это довольно простое решение, позволившее более чем в 1,5 раза увеличить продолжительную мощность.

Вместе с тем, в этом варианте вместе с воздухом в двигатель попадает грязь, тем более, что вентиляционные окна расположены сверху, а в рудничных условиях присутствуют и вода, и пыль. В целях повышения надежности эта конструкция требует доработки.

Следует отметить, что эффективность системы охлаждения можно охарактеризовать, используя коэффициент использования Эссона:

$$C_Э = \frac{P}{l \cdot D^2 \cdot n} 10^6, \quad (1)$$

где P – мощность двигателя;

l – длина пакета активной стали;

D – диаметр внутренней расточки статора;

n – скорость вращения.

Коэффициент $C_Э$ для большинства машин находится в пределах 2–5 [9].

Двигатель ДТН-45 имеет следующие энергетические и технические параметры: $P = I_n U_n = 50$ кВт,

$l = 20,4$ см, $D = 45$ см, $n = 1320$ об/мин.

Подставив численные значения переменных в выражение 1, получим:

$$C_Э = 0,92 \ll 2.$$

Это говорит о том, что при существующей схеме охлаждения – самовентиляции – энергетические возможности двигателя ДТН-45 не используются полностью, что вызывает необходимость доработки конструкции ТЭД с учетом специфики их функционирования в условиях шахт.

Для повышения мощности тяговых двигателей шахтных электровозов за счет применения более эффективной системы охлаждения предлагается использование нагнетательной аксиальной схемы вентиляции с разомкнутым циклом (рис. 2).

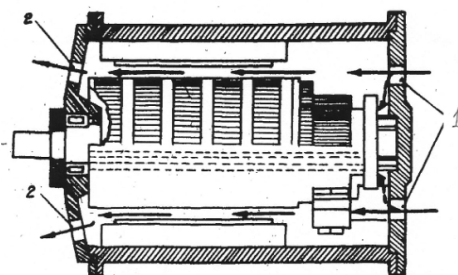


Рис. 2 – Предлагаемый вариант системы вентиляции тягового электрического двигателя РН исполнения ДТН-45 (1,2 – соответственно входные и выходные отверстия)

Принцип охлаждения ТЭД заключается в нагнетании воздуха через вентиляционные отверстия в околосекторную камеру и распределении по параллельным путям: междуполусному пространству, воздушному зазору между якорем и полюсами и по аксиальным каналам якоря.

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

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

Количество воздуха, необходимое для охлаждения двигателя, определяется на основании тепловых потерь и допустимого перегрева по формуле:

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

где Q_B – расход воздуха;

$\sum \Delta P$ – суммарные потери в машине;

ρ – плотность воздуха;

C_p – удельная теплоемкость воздуха (при постоянном давлении);

Θ_B – температура перегрева воздуха;

τ_{B2}, τ_{B1} – температура соответственно выходящего и входящего воздуха;

η – КПД двигателя;

P_n – номинальная мощность двигателя;

I_n, U_n – соответственно номинальные ток и напряжение двигателя.

Температура перегрева воздуха принята равной 55 °С для часового режима нагрузки [9]. Учитывая, что по длине пакета стали двигателя температура изменяется линейно, средний перегрев воздуха составляет:

$$\Theta_{cp} = \frac{\Theta_B}{2} = 27,5^\circ\text{C}.$$

При этой температуре удельная теплоемкость и плотность воздуха $C_p = 1008$ Дж/кг град, $\rho = 1,165$ кг/м³.

Подставляя значения переменных в уравнение (2), находим

$$Q_B = 5,1 \text{ м}^3/\text{мин}.$$

Напор, необходимый для подачи заданного количества воздуха, определяется исходя из выражения [10]:

$$H = 2300 \left(\frac{8Q}{D_a^2 - D_i^2} \right)^2, \quad (3)$$

где D_a – диаметр якоря, 2,75 см;

D_i – внутренний диаметр стального пакета якоря, 7,5 см;

Q – максимальный расход, 5 м³/мин.

После подстановки значений переменных в уравнение (3), находим:

$$H = 7,8 \text{ кг/м}^2.$$

Для подтверждения вышеприведенных теоретических расчетов были проведены экспериментальные исследования в условиях шахт Криворожского железорудного бассейна научными коллективами Криворожского национального университета, в т.ч. с непосредственным участием авторов по установлению эффективности предложенного способа охлаждения ТЭД типа ДТН-45.

Основная цель исследований – определение температуры нагрева обмоток якоря, главных и дополнительных полюсов при естественной и принудительной вентиляции ТЭД, поэтому для оценки температурных режимов были использованы хромель-копелевые термопары, основные достоинства которых заключаются в следующем:

- высокая механическая прочность чувствительного элемента;
- отсутствие теплового сопротивления между измерительным элементом и окружающей средой;
- высокая стабильность показаний;
- линейность градуировочной характеристики.

Измерения температуры нагрева обмотки якоря производились с помощью 5 термопар, расположенных как показано на рис. 3. Термопары 1-4 размещены между проводниками секций обмотки якоря (1 – в зоне петушков, 2, 3, 4 – в пазах, 5 – в лобовой части), принимая во внимание, что в этой зоне наиболее высокая температура по сечению паза.

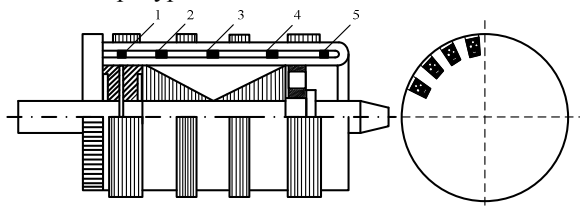


Рис. 3 – Расположение термопар в обмотке якоря

Исследования зависимости требуемых напоров охлаждающего воздуха от заданных расходов показали, что при 6 выходных отверстиях общей площадью 143 см² напор в 200 Н/м² обеспечивает расход 5 м³/мин (рис. 4).

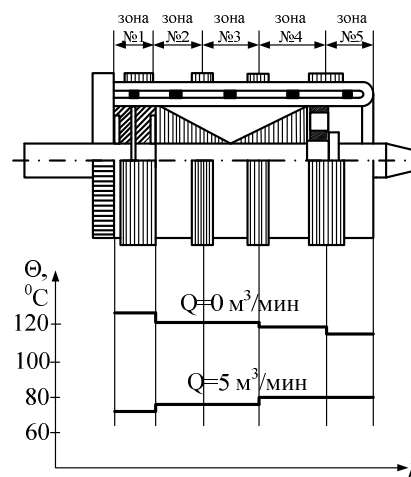


Рис. 4 – Распределение температуры обмотки по длине якоря

С целью оценки влияния аэродинамического сопротивления на нагрев якорной обмотки проведено нагревание и охлаждение ТЭД с одновременным регулированием площади выходных отверстий. Установлено, что наиболее благоприятные условия охлаждения при полностью открытых отверстиях.

Исследования скорости движения охлаждающего воздуха показали следующее:

- скорость воздуха в межполюсном пространстве значительно изменяется по высоте полюса;
- в межполюсном пространстве преобладает аксиальная составляющая, скорости воздуха, среднее значение которой 6,8 м/сек при расходе 5 м³/мин.

Выводы. 1. Проведенный анализ видов охлаждения ТЭД для условий рудничных контактных электровозов позволил выявить наиболее перспективные направления, заключающиеся в использовании дополнительно к естественной принудительной вентиляции.

2. Применение принудительной вентиляции позволит устранить перепад температуры по длине якоря, снизить температуру нагрева обмоток на 30–45 % и позволит без изменения веса и габаритов повысить мощность ТЭД до 30 % с одновременной реальностью повышения надежности и срока службы двигателей в 4–5 раз.

3. В результате лабораторных исследований установлено, что оптимальный расход воздуха при принудительной вентиляции тягового двигателя находится в пределах 5–7 м³/мин.

Список литературы

1. Дебелый, В.Л. Основные направления развития шахтного локомотивного транспорта [Текст] / В.Л. Дебелый, Л.Л. Дебелый, С.А. Мельников // Уголь Украины. – 2006. – №6. – С. 30–31. – ISSN 0041-5804.
2. Найш, Н.М. Современный железнодорожный транспорт [Текст] / Н.М. Найш, Ю.В. Белецкий, А.В. Маслов // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2013. – № 18 (207). – С. 79–84. – ISSN 1998-7927.
3. Черная, В.О. К вопросу анализа повреждений тяговых двигателей шахтных электровозов [Текст] / В.О. Черная // Молодь: наука та інновації : І Всеукраїнська науково-технічна конференція студентів, аспірантів і молодих учених: матеріали конференції. – Дніпропетровськ, 2013. – С. 421–422.
4. Вопросы повышения надежности системы мониторинга температурных режимов тяговых электрических двигателей рудничных электровозов [Текст] / О.Н. Синчук, Э.С. Гузов, И.О. Син-

- чук, Д.О. Кальмус, В.О. Черная // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2014. – № 4 (87). – С. 44–50. – ISSN 1995-0519.
5. Синчук, И.О. Исследование тепловых режимов тяговых электрических двигателей рудничных контактных электровозов [Текст] / И.О. Синчук, В.О. Черная // Проблемы энергоресурсосбережения в электротехнических системах. Наука, освіта і практика : наукове видання. – Кременчук, 2014. – № 1/2014 (2). – С. 98–100. – ISSN 2221-5160.
 6. Пухов, Ю.С. Рудничный транспорт [Текст] / Ю.С. Пухов. – М. : Недра, 1991. – 238 с.
 7. Теория электрической тяги [Текст] / В.Е. Розенфельд [и др.]. – М. : Транспорт, 1995. – 294 с. – ISSN 5-277-01462-4.
 8. Черная, В.О. Анализ тепловых режимов тяговых электрических двигателей рудничных двоосных электровозов [Текст] / В.О. Черная, Я.В. Федорова, В.О. Черный // Проблемы энергоресурсосбережения в промышленном регионе. Наука і практика. Тези доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених, спеціалістів, аспірантів. 20-24 квітня 2015 р. – Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2015. – С. 40.
 9. Розробка безсенсорного способу захисту тягових електричних двигунів рудничних електровозів від перегріву [Текст] / О.М. Синчук [та ін.] // Вісник НТУ «ХПІ» : зб. наук. пр. темат. вип. : Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2015. – № 12 (1121). – С. 204-208
 3. Chernaja, V.O. K voprosu analiza povrezhdenij tjagovykh dvigatelej shahtnykh jelektrovozov [Tekst]. V.O. Chernaja. Molod' nauka ta innovacii : I Vseukraïns'ka naukovo-tehnichna konferencija studentiv, aspirantiv i molodih uchenih: materialy konferencii. – Dnipropetrovsk, 2013. – S. 421–422.
 4. Voprosy povyshenija nadezhnosti sistemy monitoringa temperaturnykh rezhimov tjagovykh jelektricheskikh dvigatelej rudnichnykh jeltkrovozov [Tekst]. O.N. Sinchuk, Je.S. Guzov, I.O. Sinchuk, D.O. Kal'mus, V.O. Chernaja. Visnik Kremenchuc'kogo nacional'nogo universitetu imeni Mihajla Ostrogradskogo. – 2014. – № 4 (87). – S. 44–50. – ISSN 1995-0519.
 5. Sinchuk, I.O. Issledovanie teplovykh rezhimov tjagovykh jelektricheskikh dvigatelej rudnichnykh kontaktnykh jelektrovozov [Tekst]. I.O. Sinchuk, V.O. Chernaja. Problemi energoresursozberezhennja v elektrotehnichnih sistemah. Nauka, osvita i praktika : naukove vidannja. – Kremenichuk, 2014. – № 1/2014 (2). – S. 98–100. – ISSN 2221-5160.
 6. Puhov, Ju.S. Rudnichnyj transport [Tekst]. Ju.S. Puhov. – M. : Nedra, 1991. – 238 s.
 7. Teorija jelektricheskoi tjaqi [Tekst]. V.E. Rozenfel'd [i dr.]. – M. : Transport, 1995. – 294 s. – ISSN 5-277-01462-4.
 8. Chernaja, V.O. Analiz teplovykh rezhimov tjagovykh jelektricheskikh dvigatelej rudnichnykh dvoosnykh jelektrovozov [Tekst]. V.O. Chernaja, Ja.V. Fedorova, V.O. Chernyj. Problemi energoresursozberezhennja v promisl'ovomu regioni. Nauka i praktika. Tezi dopovidej Vseukraïns'koï naukovo-praktichnoï konferencii molodih uchenih, specialistiv, aspirantiv. 20-24 kvitnja 2015 r. – Mariupol': DVNZ «PDTU», 2015. – S. 40.
 9. Rozrobka bezsensornogo sposobu zahystu tyagovykh elektrychnykh dvyguniv rudnychnykh elektrovoziv vid peregrivu [Tekst]. O. Sinshuk [ta in.]. Visnyk NTU "KhPI" : zb.nauk. pr. temat. vyp. Problemy avtomatyzovanogo elektropryvodu. Teoriya i praktyka. – Kharkiv : NTU "KhPI". – 2015. – № 12 (1121). – S. 204-208.

References (transliterated)

1. Debelyj, V.L. Osnovnye napravlenija razvitiya shahtnogo lokomotivnogo transporta [Tekst]. V.L. Debelyj, L.L. Debelyj, S.A. Mel'nikov. Ugol' Ukrainy. – 2006. – №6. – S. 30–31. – ISSN 0041-5804.
2. Najsh, N.M. Sovremennyy zheleznodorozhnyj transport [Tekst]. N.M. Najsh, Ju.V. Beleckij, A.V. Maslov. Visnik Shidnoukraïns'kogo nacional'nogo universitetu imeni Volodimira Dalja. – 2013. – № 18 (207). – S. 79–84. – ISSN 1998-7927.

Поступила (received) 31.08.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Тяговий електродвигун постійного струму для шахтних електровозів з покращеною системою вентиляції / В.О. Чорна, Д.А. Шокарев // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2017. – № 34 (1256). – С. 76–79. – Библиогр.: 9 назв. – ISSN 2079-3944.

Тяговый электродвигатель постоянного тока для шахтных электровозов с улучшенной системой вентиляции / В.О. Черная, Д.А. Шокарев // Вісник Національно-го технічного університету "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2017. – № 34 (1256). – С. 76–79. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-3944.

DC tractive electric motor for mine electric locomotives with improved ventilation system / V.O. Chorna, D.A. Shokarov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No. 34 (1256). – P. 76–79. – Bibliography: 9. – ISSN 2079-3944.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Чорна Вікторія Олегівна – канд. техн. наук, доцент кафедри систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, Україна, вул. Першотравнева, 20, 39600, тел. (067)8575375, chornajav@gmail.com.

Черная Виктория Олеговна – канд. техн. наук, доцент кафедри систем електропотреблення и энергетического менеджмента, Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, г. Кременчуг, Украина, ул. Первомайская, 20, 39600, тел. (067)8575375, chornajav@gmail.com.

Chorna Viktoriia – PhD. Sc. Associate Professor, Electricity consumption systems and power management department, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine, st. Pershotravneva, 20, 39600, tel. (067) 8575375, chornajav@gmail.com

Шокарьов Дмитро Анатолійович – канд. техн. наук, доцент кафедри електричних станцій, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", м. Харків, Україна, вул. Багалия, 21, 61002, shokareff@gmail.com.

Шокарев Дмитрий Анатольевич – канд. техн. наук, доцент кафедры электрических станций, Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", г. Харьков, Украина, ул. Багалия, 21, 61002, shokareff@gmail.com.

Shokarov Dmitro – PhD. Sc. Associate Professor, Department of Power Stations, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine st. Bahalii 21, 61002, shokareff@gmail.com.