

А.П. ЧЕРНЫЙ, д-р техн. наук, проф., Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, Кременчуг
В.Н. СИДОРЕНКО, канд. техн. наук, доц., КрНУ, Кременчуг
А.Н. АРТЕМЕНКО, ст. викл., КрНУ, Кременчуг

РЕЖИМЫ РАБОТЫ МНОГОДВИГАТЕЛЬНОГО ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА КАРЬЕРНЫХ ЭЛЕКТРОВЗОВ

Введение. Проблема повышения эффективности работы карьерных электровозов решается на протяжении десятилетий [1, 2, 3], но до сих пор окончательно не решена. Современные достижения и новейшие разработки ученых в области управления электромеханическими системами (ЭМС), и в частности, электроприводами промышленных электровозов [4, 5], не позволяют получить необходимые результаты, так как состояние рельсовых путей, механического оборудования и тяговых электродвигателей крайне неудовлетворительное. Необходимо учитывать, что перечисленные факторы непосредственно связаны между собой и решить проблему качественного ремонта электродвигателей без улучшения состояния путей и колесных пар невозможно. На рис. 1 показаны фрагменты рельсовых путей карьерных электровозов, обеспечивающих транспортирование горной массы.

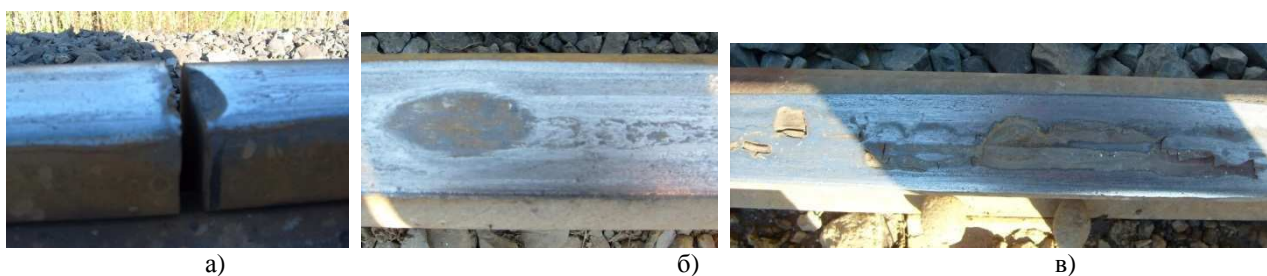


Рис. 1 – Фрагменты состояния рельсового полотна: а) – разрыв, б) – выемка, в) – выщербленность

Такие дефекты отражаются на состоянии поверхностей колесных пар (рис. 2). Снижение диаметра колеса в отдельных случаях составляет 10-12 мм (рис. 2, а), а появляющиеся выщербленности приводят к аналогичному повреждению поверхности рельса (рис. 2, б), и в отдельных случаях даже изменения геометрии головки рельса.



Рис. 2 – Фрагменты состояния колесных пар: а) – изменение диаметра колеса, б) – выщербленность

Появление выемок, каверн, выщербленностей приводит к проскальзываниям, дополнительно повреждая рельсовое полотно и колеса в месте контакта. При уменьшении диаметра колеса появляется вращение колесных пар с разной скоростью приводящее к непрерывному проскальзыванию поверхности колеса по поверхности рельса [6]. При проскальзывании происходит неравномерное распределение нагрузки между тяговыми двигателями. Двигатели с большей нагрузкой перегреваются и быстро выходят из строя. Ремонт двигателей осуществляется на специализированных ремонтных предприятиях, обеспечивающих, согласно ГОСТ отклонения в выходных параметрах 10% по якорной обмотке и 2% по обмотке возбуждения [7, 8]. Неравномерность параметров приводит к неравномерной жесткости механических характеристик и к неравномерному распределению нагрузки между двигателями. Поэтому актуальной задачей является исследование режимов работы карьерного электровозного транспорта.

Цель работы. Исследование режимов работы карьерных электровозов с учетом состояния рельсовых путей и разброса параметров тяговых электродвигателей.

Материалы исследования. Основным типом карьерного электровоза на карьере АО «Полтавский горно-обогатительный комбинат» является электровоз ОПЭ-1А (ОПЭ-1АМ), который предназначен для работы на железных дорогах открытых горных разработок, электрифицированных на переменном токе напряжением 10000В, частотой 50Гц, с руководящими подъемами

© А.П. Черный, В.Н. Сидоренко, А.Н. Артеменко, 2015

(уклонами) до 60%. Экипажная часть тягового агрегата состоит из шести двухосных тележек, по две на каждую секцию. На тележках подвешены по два колесно-моторных блока, состоящих из колесной пары и тягового двигателя. В качестве тяговых двигателей используются двигатели постоянного тока последовательного возбуждения ДТ9Н (НБ-511 для ОПЭ-1АМ), которые имеют в продолжительном режиме номинальную мощность 418 кВт, при номинальном напряжении и токе, соответственно 1500 В и 300 А, максимальная частота вращения 160 с⁻¹.

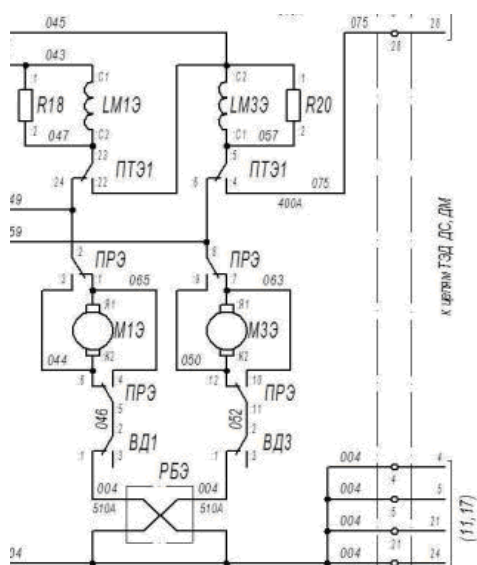


Рис. 3 – Фрагмент принципиальной схемы силовых цепей питания ТЭД электровоза

Электровоз выпускается в трехсекционном варианте и состоит из электровоза управления; дизельной секции; моторного думпкара. Иногда вместо дизельной секции устанавливается второй моторный думпкара. Всего на электровозе установлено 12 тяговых двигателей. В тяговом, автономном и тормозных режимах тяговые двигатели соединены параллельно в каждой тяговой единице (рис. 3).

Допустимые отклонения параметров якорной обмотки при ремонте тяговых двигателей в 10% установлены по условию нагрева [7, 8] и, при наличии принудительной вентиляции двигателей, допускает длительную эксплуатацию. Однако следует учесть, что на электровозе установлены 12 тяговых двигателей, и они не проходят дополнительный подбор по условию работы в системе многодвигательного электропривода, так как это двигатели одного типа. При этом может возникнуть ситуация когда на одном электровозном агрегате окажутся двигатели, отклонения параметров которых находятся в пределах допуска, но по величине противоположны. Рассмотрим вероятность возникновения такой ситуации.

Пусть в ремонтном фонде имеется N двигателей, который характеризуется вектором отклонений некоего параметра от нормы $\Delta = [\Delta_1 \ \Delta_2 \ \dots \ \Delta_i \ \dots \ \Delta_N]^T$. Значение Δ_i , характеризующее i -ый двигатель, может принимать как положительные, так и отрицательные значения и может повторяться m раз ($1 \leq m \leq N$).

Введем верхнетреугольную матрицу модулей первых конечных попарных разностей ∇ , характеризующую попарное отличие двигателей между собой по заданному параметру:

$$\nabla = \begin{pmatrix} 0 & \nabla_{12} & \nabla_{13} & \dots & \nabla_{1j} & \dots & \nabla_{1N} \\ 0 & 0 & \nabla_{23} & \dots & \nabla_{2j} & \dots & \nabla_{2N} \\ 0 & 0 & 0 & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \nabla_{ij} & \dots & \nabla_{iN} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \nabla_{(N-1)N} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

размерностью $N \times N$ (количество элементов $\frac{(N^2 - N)}{2}$), элементы которой вычисляются по следующему правилу:

$$\nabla_{ij} = \begin{cases} |\Delta_i - \Delta_j|, & \forall i < j \\ 0, & \forall i \geq j. \end{cases} \quad (2)$$

Если $\nabla_{ij} \approx 0$ или $\nabla_{ij} = 0$, то это говорит о том, что отличие между i -ым и j -ым двигателем по заданному параметру, соответственно, минимально или отсутствует вообще.

Нас интересует максимальное значение $\nabla_{\max} = \max(\nabla_{ij})$. Естественно, что ∇_{\max} может повторяться k_{\max} раз (теоретически $1 \leq k_{\max} \leq N - 1$).

Оценим вероятность того, что при отборе 12-ти двигателей для тепловозов попадет пара, соответствующая ∇_{\max} : а) один раз; б) хотя бы один раз.

Исходя из гипергеометрического распределения вероятностей можно записать вероятность того, что при отборе 12-ти двигателей из N среди отобранных окажется ровно k ($1 \leq k \leq k_{\max}$), соответствующим ∇_{\max} :

$$p(\nabla_{\max}, k) = \frac{C_{k_{\max}}^k \cdot C_{N-k_{\max}}^{12-k}}{C_N^{12}}. \quad (3)$$

Тогда для вероятности извлечения одной такой пары можно записать (одна пара – $k = 2$):

$$p(\nabla_{\max}, 2) = \frac{C_{k_{\max}}^2 \cdot C_{N-k_{\max}}^{10}}{C_N^{12}}.$$

На практике $N = 100..400$. Рассмотрим «наихудший» случай, когда ремонтный парк минимален, т.е., $N = 100$ и, например, есть шанс отобрать $k_{\max} = 12$ (6 пар) двигателей с максимальным отличием по параметру. Тогда

$$p(\nabla_{\max}, 2) = \frac{C_{12}^2 \cdot C_{88}^{10}}{C_{100}^{12}}.$$

Учитывая, что $C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}$ и n велико, для вычисления факториалов используем формулу Стирлинга:

$$n! \approx \sqrt{2\pi n} \left(\frac{n}{e}\right)^n.$$

Тогда

$$p(\nabla_{\max}, 2) = \frac{C_{12}^2 \cdot C_{88}^{10}}{C_{100}^{12}} = 0,284, \text{ то есть } 28,4\%. \quad (4)$$

Вероятность того, что при отборе 12-ти двигателей попадет хотя бы одна пара с максимальным отличием в условиях:

$$p(\nabla_{\max}, (k=2) \vee (k=4) \vee (k=6) \vee (k=8) \vee (k=10) \vee (k=12)) = \sum_{m=2,4..12} \frac{C_{12}^m \cdot C_{88}^{12-m}}{C_{100}^{12}} = 0,314, \quad (5)$$

то есть 31,4% .

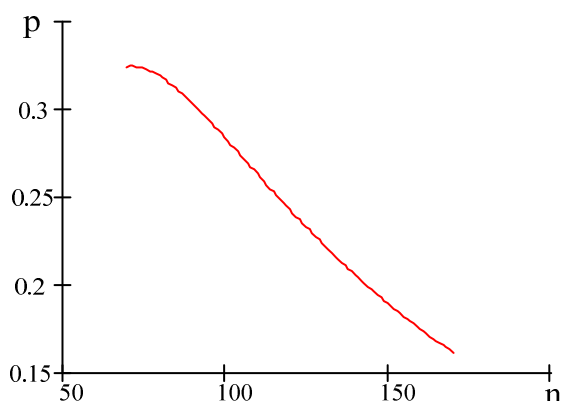


Рис. 4 – Вероятность того, что при отборе 12-ти двигателей из n двигателей ремонтного парка попадет одна пара с максимальным отличием параметров

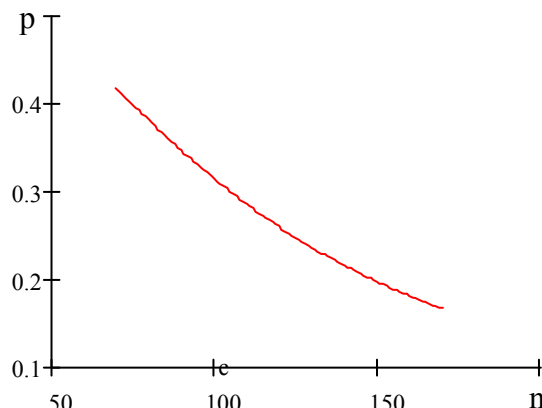


Рис. 5 – Вероятность того, что при отборе 12-ти двигателей из n двигателей ремонтного парка попадет хотя бы одна пара с максимальным отличием параметров

Оценка закона распределения величины Δ_i даст возможность более точной оценки параметра гипергеометрической модели k_{\max} и, соответственно, оценки соответствующих вероятностей.

Получим аналитически распределение моментов двигателей при отклонении параметров. Из уравнения механической характеристики двигателя последовательного возбуждения $\omega = \frac{U_d}{\sqrt{k\alpha M}} - \frac{r}{k\alpha}$, где U_d – напряжение на якоре двигателя, r – активное сопротивление якоря, k, α – конструктивный коэффициент и тангенс

угла наклона кривой намагничивания, получим выражение для момента в виде $M = k\alpha U_d^2 \left(\omega + \frac{r}{k\alpha}\right)^{-2}$. Тогда

$\frac{M_1}{M_2} = \frac{\Delta_{\alpha 1}(r\Delta_{r2} + \Delta_{\alpha 2}k\alpha\omega)^2}{\Delta_{\alpha 2}(r\Delta_{r1} + \Delta_{\alpha 1}k\alpha\omega)^2}$, где $\Delta_{\alpha 1}, \Delta_r$ – относительное отклонение активного сопротивления якоря и параметров кривой намагничивания.

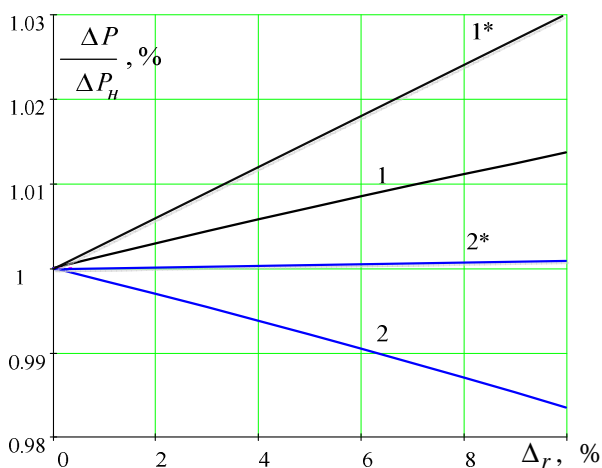


Рис. 6 – Зависимость неравномерность электрических потерь в обмотках якоря тяговых электродвигателей от несимметрии параметров двигателей

при номинальной температуре, лет. Кратность снижения срока службы составит $\gamma = \frac{1}{z} = 1,157$.

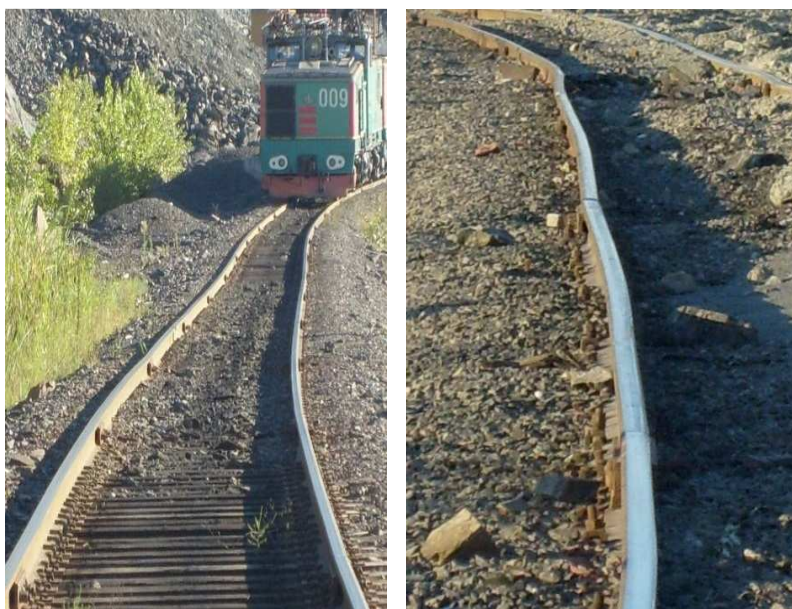


Рис. 7 – Реальная форма рельсовых путей на карьере

которое еще называют упругим, псевдоскольжением [10]. При этом мы рассматриваем только продольный крип, хотя как видно из рис. 1-2 может иметь место и спин или поворотный крип. Кроме того необходимо принимать во внимание реальную форму рельсовых путей на карьерах (рис. 7). При входе колес в кривые участки пути и при выходе из них, коэффициент сцепления уменьшается на 5-10%, а в зависимости от состояния поверхности рельсов может изменяться с 0,13 до 0,07 [11].

Проанализируем режим работы двухдвигательного электропривода тяговых электродвигателей электровоза методом математического моделирования. В качестве неравномерности параметров приняты предельно допустимые по ГОСТ 10% отклонения активных сопротивлений якорных обмоток для первого двигателя -10%, а для второго +10%, при снижении коэффициента сцепления с 0,13 до 0,07. Превышение переменных потерь над номинальными, в режиме работы с номинальной нагрузкой, составляет 3% (рис. 6, кривые 1*, 2*). С учетом допустимой температуры 130°C нагрева обмотки якоря с изоляцией класса В (5), продолжительность жизни изоляции составит $z = 0,708D$ лет. Кратность снижения срока службы изоляции $\gamma = 1,412$ возрастает практически на 25%.

Выводы. Выполненный анализ состояния механического, электромеханического оборудования карьерного электровозного транспорта, а также рельсовых путей показывает, что по причине отклонения параметров тяговых двигателей после ремонта, в многодвигательном электроприводе электровоза, происходит неравномер-

Проанализируем режим работы двухдвигательного электропривода тяговых электродвигателей электровоза методом математического моделирования. В качестве неравномерности параметров приняты предельно допустимые по ГОСТ 10%-ные отклонения активных сопротивлений якорных обмоток. Однако, учитывая вероятность (4), (5), примем, что первый двигатель имеет отклонение активного сопротивления +10%, а второй -10%.

Превышение переменных потерь над номинальными, в режиме работы с номинальной нагрузкой, составляет 1,6% (рис. 6, кривые 1,2). Полагая, что условия вентиляции, а значит коэффициент теплоотдачи остаются неизменными, найдем снижение срока службы тягового двигателя с учетом допустимой температуры 130°C нагрева обмотки якоря с изоляцией класса В [9].

$$z = D2^{\frac{\theta_n - 1,013\theta}{8}}, \quad (5)$$

Откуда продолжительность жизни изоляции $z = 0,864D$ лет, где D - срок службы для данного класса изоляции

$$\gamma = \frac{1}{z} = 1,157.$$

Как видно из изложенного выше, выполненные расчеты относятся к случаю абсолютной жесткости соединения валов. Между тем, как видно из рис. 1, б-в), имеют место пятна, образованные проскальзыванием колеса по рельсу. Вследствие различия деформаций колеса и рельса в зоне контакта (рис. 1, 2) путь, пройденный геометрическим центром колеса, меньше пути, подсчитанного по угловой скорости вращения колеса в предположении качения без скольжения, следовательно за один оборот колеса проходит расстояние, меньшее развернутой длины окружности катания. В соприкасающихся поверхностях колеса и рельса происходит непрерывное перемещение волокон навстречу друг другу, при этом волокна колеса «проползают» по волокнам рельса. Наблюдается крип или проскальзывание,

ное распределение нагрузки между двигателями, перегрев более нагруженных двигателей и выходу их из строя. Неравномерное распределение нагрузки приводит к проскальзываниям, в результате чего повреждаются также рельсовые пути и колеса электровоза. Рассчитанная вероятность комплектации электропривода двигателями с наибольшим разбросом параметров достигает 30% при существующем ремонтном парке тяговых двигателей. Для этого случая выполнен расчет механических характеристик двухдвигательного электропривода с учетом проскальзывания вызванного состоянием рельсовых путей. Рост потерь перегруженного двигателя приводит к сокращению срока службы его изоляции на 25%. Учитывая, что возможность управления отдельным тяговым двигателем на электровозах отсутствует, то высокая аварийность будет сохраняться в дальнейшем. Выравнивание нагрузки между двигателями по причине неравномерности параметров, так и снижением коэффициента сцепления вызванного состоянием путей возможно лишь дополнительного управления магнитным потоком двигателей. А синтез SMART-системы управления тяговым электроприводом с функциями самоконтроля и анализа, обеспечит повышение эффективности работы тяговых электродвигателей карьерных электровозов.

Список литературы: 1. Айзеншток Л. И. Выбор тяговых характеристик локомотивов / Л. И. Айзеншток, Ю. А. Иванов, Е. А. Чернов // Шахтный карьерный транспорт. – 1990. – Вып. 11. – С. 205–208. 2. Зиборов К. А. Принципы построения системы согласования тягового усилия приводных колесных пар шахтного локомотива / К. А. Зиборов, А. М. Твердохлеб, С. А. Воскобойник // Гірнична електромеханіка та автоматика. – 2012. – № 88. – С. 115–120. 3. Вериго М. Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава / М. Ф. Вериго, А. Я. Коган. – М.: Транспорт, 1986. – 559 с. 4. Синчук О. Н. Структура и способ управления тяговым асинхронным электроприводом рудничного контактно-аккумуляторного электровоза / О. Н. Синчук, Д. А. Шокарев, С. И. Выпанасенко // Електротехніка і енергетика. Наукові праці Донецького національного технічного університета. – 2013. – Вип. № 2(15). – С. 223–226. 5. Синчук О. Н. Рудничный гибридный электровоз с асинхронным приводом и автоматизированным управлением / О. Н. Синчук, Э. С. Гузов, И. О. Синчук, М. А. [и др.] // Електромеханічні та енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – 2012. – Вип. 2(18). – С. 95–100. 6. Процив В. В. Алгоритм работы системы регулирования тягового усилия шахтного локомотива / В. В. Процив, А. М. Твердохлеб. – Режим доступа: <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/1176>. – Дата обращения: 10 июня 2015. 7. Котеленец Н. Ф. Испытания, эксплуатация и ремонт электрических машин / Н. Ф. Котеленец, Н. А. Акимова, М. В. Антонов. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 384 с. 8. Справочник по электрическим машинам: в 2 т. / [под общ. ред. И. П. Копылова, Б. К. Клокова]. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – Т. 1. – 456 с. 9. Старение изоляции и срок службы машин. – Режим доступа: <http://www.motorremont.ru/books/book004/book220p63.htm>. – Дата обращения: 12 июня 2015. 10. Движение колесной пары с учетом деформации бандажа и рельса. – Режим доступа: <http://edu.dvgups.ru/metdoc/gdtran/nts/eps/dineps/metod/up/webumk/frame/11.htm>. – Дата обращения: 14 июня 2015. 11. Коэффициент сцепления и коэффициент трения. – Режим доступа: http://edu.dvgups.ru/metdoc/gdtran/nts/teplovov/avtt_bezdv/umk_do/avtorm/11_3.htm. – Дата обращения: 15 июня 2015.

Bibliography (transliterated): 1. Ayzenshtok, L. I., Ivanov, Yu. A. and Chernov, E. A. "Vybor tyagovykh kharakteristik lokomotivov". *Shakhtnyy karemyy transport*. No. 11. 1990. 205–208. Print. 2. Ziborov, K. A., Tverdokhle, A. M. and Voskoboynik, S. A. "Printsipy postroeniya sistemy soglasovaniya tyagovogo usiliya privodnykh kolesnykh par shakhtnogo lokomotiva". *Girnycha elektromekhanika ta avtomatyka*. No. 88. 2012. 115–120. Print. 3. Verigo, M. F. and Kogan, A. Ja. *Vzaimodeystviye puti i podvizhnogo sostava*. Moscow: Transport, 1986. Print. 4. Sinchuk, O. N., Shokarev, D. A. and Vypanasenko, S. I. "Struktura i sposob upravleniya tyagovym asinkhronnym elektroprivodom rudnichnogo kontaktno-akkumulyatornogo elektrovoza". *Elektrotekhnika i energetyka. Naukovi pratsi Donetskogo natsionalnogo tekhnichnogo universyteta*. No. 2. 2013. 223–226. Print. 5. Sinchuk, O. N., Guзов, E. S., Sinchuk, I. O. et al. "Rudnichnyy gibridnyy elektrovoz s asinkhronnym privodom i avtomatizirovannym upravleniyem". *Elektromekhanichni ta energozberigayuchi systemy. Shchokvartalnyy naukovo-vyrobnychyy zhurnal*. No. 2. 2012. 95–100. Print. 6. Protsiv, V. V. and Tverdokhle, A. M. "Algoritm raboty sistemy regulirovaniya tyagovogo usiliya shakhtnogo lokomotiva". Web. 10 June 2015 <<http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/1176>>. 7. Kotelenets, N. F., Akimova, N. A. and Antonov, M. V. *Ispytaniya, ekspluatatsiya i remont elektricheskikh mashin*. Moscow: Izdatelskiy tsentr «Akademiya», 2003. Print. 8. *Spravochnik po elektricheskim mashinam*. Vol. 1. Moscow: Energoatomizdat, 1988. Print. 9. *Stareniye izolyatsii i srok sluzhby mashin*. Web. 12 June 2015 <<http://www.motorremont.ru/books/book004/book220p63.htm>>. 10. *Dvizheniye kolesnoy pary s uchetom deformatsii bandazha i relsa..* Web. 14 June 2015 <<http://edu.dvgups.ru/metdoc/gdtran/nts/eps/dineps/metod/up/webumk/frame/11.htm>>. 11. *Koeffitsiyent stsepleniya i koeffitsiyent treniya*. Web. 15 June 2015 <http://edu.dvgups.ru/metdoc/gdtran/nts/teplovov/avtt_bezdv/umk_do/avtorm/11_3.htm>.

Поступила (received) 14.07.2015