

**И. О. СИНЧУК**, канд. техн. наук, доц. ГВУЗ «Криворожский национальный университет»;  
**А. В. ОМЕЛЬЧЕНКО**, канд. техн. наук, доц. ГВУЗ «Криворожский национальный университет»;  
**В. А. ФЕДОТОВ**, ст. преподаватель ГВУЗ «Криворожский национальный университет»

## **АНАЛИЗ УСЛОВИЙ И РЕЖИМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ РУДНИЧНЫХ КОНТАКТНЫХ ЭЛЕКТРОВЗОВ В УСЛОВИЯХ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ШАХТ**

**Введение.** Практически на всех отечественных горнодобывающих предприятиях, с подземным способом добычи железорудного сырья (ЖРС), для его доставки используется около 20-ти видов и типов двухосных электровозов, классифицируемые как рудничные виды [1]. К сожалению, ухудшение условий добычи ЖРС, в связи с понижением уровней ведения горных работ до глубин 1500-2000м, отрицательно сказывается на показателях транспортировки ЖРС [2-4]. В силу этого, из года в год доля затрат на доставку ЖРС в общей его себестоимости добычи увеличивается, что негативно сказывается на конкуренции выпускаемой продукции на мировом рынке сырья [2-3]. Т.е. доставка ЖРС, а точнее – электровозный транспорт, должен иметь естественную тенденцию постоянного совершенствования путем модернизации основной тяговой единицы – электровоза, а точнее его тяговой электромеханической системы (ТЭМС) [4-6].

На железорудных шахтах, в отличие от угольных шахт, где используется смешанная циклично-поточная система доставки полезных ископаемых (ПИ) вида: конвейер – электровозосоставов ведомый аккумуляторными типами электровозов, используется циклическая доставка ПИ при помощи контактных электровозов со сцепной массой 14 т и, реже, 10 т. Именно технология транспортирования сырья определяет режимы функционирования ТЭМС, систем управления ими, способ управления уровнем напряжения на зажимах тяговых электрических двигателей, выбор параметров последнего и вид исполнения электрооборудования электровозов [7].

**Постановка задачи.** Совершенствование конструкции рудничных электровозов с точки зрения ожидаемого повышения эффективности функционирования электровозосоставов в подземных выработках железорудных шахт напрямую зависит от вида применяемой ТЭМС и системы управления ею. Безусловно, это должно быть связано с энергоэффективностью, надежностью, долговечностью и возможностью автоматического управления комплексом внутришахтного электровозного транспорта (ВШТ).

Опыт эксплуатации контактных типов электровозов в условиях рудных шахт показывает, что недостаточное внимание специфики этих предприятий, с точки зрения функционирования ВШТ, снижает прогнозируемый положительный результат применения нового оборудования, в т.ч. систем управления (ВШТ) и их тяговыми системами.

Связано это с тем, что, во-первых, конструкционные усовершенствования рудничных типов электровозов в нашей стране носят пока явно условное содержание – они практически мало чем отличаются от первых образцов эксплуатируемых более 100 лет тому назад. Во – вторых, при конструировании анализируемых типов электровозов, а точнее их электромеханических систем (тяговых электроприводов) не учитывается специфика железорудных шахт и отличие этой специфики, например, от угольных [8].

Под спецификой следует понимать, что для выяснения ее качественной стороны необходимо основываться на горногеологических особенностях месторождения и на технологическом процессе производства. Эти слабые необходимо учитывать с целью получения положительных результатов – основы для создания требуемого эффективного электровозного парка по всем показателям всего комплекса ВШТ.

К горногеологическим особенностям относятся: ограниченность размеров поперечного сечения откаточных выработок, обводнение и повышенная влажность, отсутствие естественного (дневного) света, наличие в воздухе абразивной пыли, относительное постоянство температуры, движение воздуха, коэффициент сцепления колёс с рельсами.

К особенностям технологического процесса доставки ПИ относятся: схема транспортировки руды и породы, путевое хозяйство шахты, циклический характер откатки, скорость движения электровозов, коэффициент сцепления.

Технико-экономические причины обуславливают прохождение подземных выработок оптимальных размеров, в которых совмещается работа электровозов и перемещение людей. Для обеспечения безопасности людей это значительно сказывается на технологии движения электровозосоставов и, следовательно, на режиме функционирования их ТЭМС.

Постоянное осаждение пыли и влаги значительно ухудшает работу электрических контактных групп электровозов, а также снижает качество изоляции. Сама по себе запыленность воздуха не представляет специфических свойств подземных выработок по сравнению с поверхностью, но непрерывно действуя совместно с прочими факторами, еще более усугубляет непростые рудничные условия эксплуатации ВШТ.

Рельсовые пути ВШТ подразделяют на магистральные, ортовые и маневровые. Каждый вид пути характеризуется своей особенностью заключающейся в строении и соответствующем состоянии.

При этом следует отметить, что рельсовые пути в ортах, содержатся в неудовлетворительном состоянии: балласт не подбивается, путь не отрихтован и часто засыпан рудной мелочью, значительно увеличивая сопротивление движению. Указанное выше положение реально существует в отечественных шахтах и не может не учитываться при рассмотрении условий работы электровозосоставов и, естественно, их электромеханических систем.

Важным показателем, определяющим режимы функционирования ТЭМС, особенно при пуско-тормозных режимах, является коэффициент сцепления колес электровоза с рельсами, который в рудных шахтах значительно выше, чем в угольных. По данным [10] он достигает значения 0,22-0,24, вместо 0,13 для угольных шахт. В связи с этим тяговые возможности электровозов одного сцепного веса в рудных шахтах выше, чем в угольных, что должно соответственно отражаться на обосновании в выборе мощности тяговых электрических двигателей (ТЭД) [9].

**Материал исследования.** Режимы функционирования электровозного ВШТ для рудных шахт исследовались в разные временные периоды Рысьевым В.П., Рентгевичем А.А., Гузовым Э.С., Кордаковым В.Н., Карагаевым В.П., Оатом Г.П., Синчуком О.Н, Синчуком И.О. и др.

Все эти исследования имеют значительный срок давности: 25-50 лет. Условия шахт после этих сроков изменились и значительно. С увеличением глубины разработки сокращаются рудные площади и одновременно, увеличивается длина транспортных магистралей. Это обусловлено как ухудшением горногеологических условий (выклиниванием залежей) с понижением уровня ведения горных работ, так и спецификой вскрытия железорудных месторождений – вертикальными стволами в лежачем боку залежей. Так если в 1981 г. эксплуатационные площади шахт ПАО «Криворожский железорудный комбинат» по сравнению с 1975 г. сократились на 12%, то в 2007 году уже на 52% [2-3]. При существующей интенсивности разработки понижение горных работ составляет 18-20 м в год. Эти факторы отрицательно сказываются на показателях работы предприятия в целом и откатки в частности.

Для уяснения специфики динамики ВШТ в современных железорудных шахтах авторами в течение 2011-2014 годов были проведены «точечные» экспериментальные исследования в шахтах ПАО «Криворожский железорудный комбинат». Было установлено, что структура транспортировки ПИ осталась неизменной. Однако изменились длины откаточных горизонтов и их участков. С точки зрения режимов функционирования электровозов и их ТЭМС это существенно, т.к. изменилась пропорция режимов – установившиеся или переходные. Доля переходных уменьшилась в объеме цикла на 7-10%. Однако по-прежнему эта доля весьма значима и является определяющей с точки зрения влияния на долговечность слагаемых ТЭМС.

Для наглядности оценки режимов работы приводов рудничных электровозов было произведено осциллографирование основных параметров ТЭМС электровозов в различных условиях и в различных железорудных шахтах. В ходе исследований фиксировались ток тяговых двигателей и скорость движения электровозосостава (рис. 1 – 5).

Из анализа осциллограмм установлено, что при расположении состава под уклон (рис. 1, 3), разгон происходит с плавным нарастанием скорости. Реализуемые при этом ускорения – около  $0,1 \text{ м/с}^2$ . При тяжелых условиях пуска – разгон того же электровозосостава 235 т на подъем (рис. 2, 4) работа системы управления, а следовательно, и вид погрузочной диаграммы другие, т.е. очевидно, что режимы функционирования ТЭД ныне эксплуатируемых электровозов и их ТЭМС, в силу «бросков» токов и напряжения, динамичнонеустойчивы.

При этом, в очередной раз, следует констатировать факт того, что контакторно-резисторное управление уровнем напряжения на зажимах ТЭД, как ступенчатый вид регулирования, является далеко не оптимальным как по электроэффективности, так и по динамике ТЭМС (рис. 5).

Более того, в очередной раз констатируем, в т.ч. исходя из осциллограмм (рис. 1 – 5), что существующие структуры ТЭМС эксплуатируемых контактных электровозов (К10, К14) являются носителями массы технических и экономических недостатков, главным из которых является необоснованно большие потери электрической энергии в пуско-регулирующих реостатах, броски тока и напряжения при пуске-торможении, и низкая надежность (рис. 6).

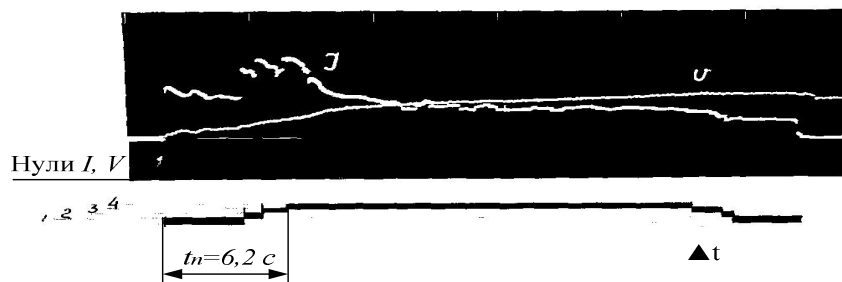


Рис. 1. Осциллограмма тока и напряжения тягового двигателя при пуске и движении с пониженной скоростью груженого электровозосостава весом 235 т (ш. Родина, горизонт 1320м): ▲ 1 – сработало РТ, фиксируя превышение скорости  $V=5,6 \text{ км/ч}$ ; масштабы тока  $M_I=13,5 \text{ А/мм}$ , скорости  $M_V=0,615 \text{ (км/ч)/мм}$ ; времени  $M_T=0,333 \text{ с/мм}$ .

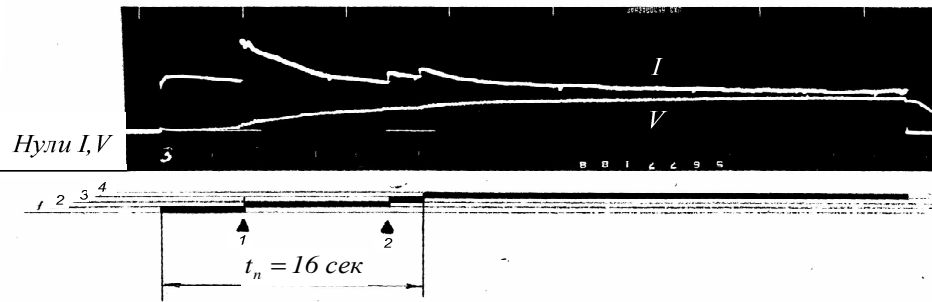


Рис. 2. Осциллограмма тока и напряжения тягового электрического двигателя при пуске и движении электровозосостава с пониженной скоростью на подъеме (ш. Гвардейская, горизонт 1342м):  
 ▲ 1 – сработало РТ,  $I=262 \text{ A}$ ; ▲ 2 – отпускание РТ,  $I=348 \text{ A}$ .

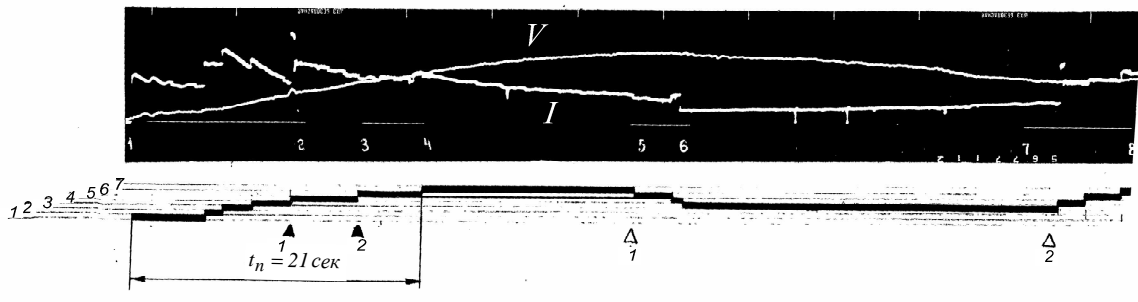


Рис. 3. Осциллограмма тока и напряжения тягового электрического двигателя при пуске и движении с полной скоростью груженого состава весом 235 т (ш. Гвардейская, горизонт 1342м): ▲ 1 – срабатывание РТ,  $\Delta 1$  – превышение скорости  $V=16,1 \text{ км/ч}$ ; ▲ 2 – отпускание РТ,  $\Delta 2$  – снижение скорости  $V=6,76 \text{ км/ч}$ .

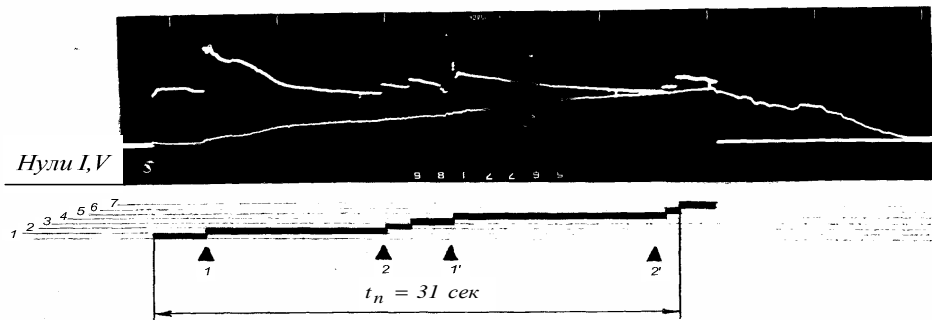


Рис. 4. Осциллограмма тока и напряжения тягового электрического двигателя при пуске до полной скорости груженого состава весом 235 т на подъем (ш. Гвардейская, горизонт 1342м): ▲ 1, ▲ 1' – срабатывание РТ; ▲ 2, ▲ 2' – отпускание РТ.

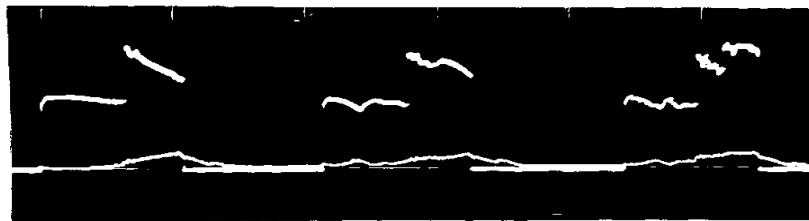


Рис. 5. Осциллограмма электрических параметров тягового двигателя в пусковых режимах при погрузочной операции в орт-заезд (ш. Родина, горизонт 1320м).

С целью устранения одного из вышеперечисленных параметров – бросков тока и напряжения, авторами были предложены модификации существующих схем (рис. 7), которые обеспечивают улучшенные показатели функционирования ТЭМС при пуске (торможении).

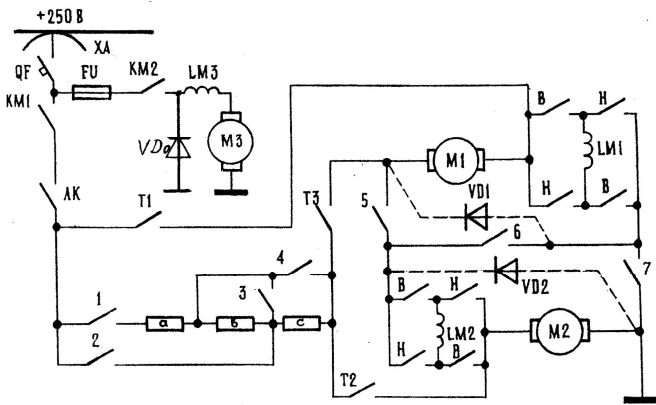


Рис. 6. Принципиальная схема шахтного контактного электровоза

зок на оси, и достичь ожидаемой энергоэффективности всего комплекса ВШТ.

Но и этого недостаточно при современной трактовке требований к ТЭМС и техническим возможностям их реализации существующими техническими возможностями аппаратной реализации. Более того, в последние годы были разработаны варианты энергоэффективных ТЭМС с IGBT инверторами и тяговыми асинхронными двигателями в двух и трехфазном исполнении. [4-6, 8], рис. 8. В данных вариантах каждый тяговый двигатель M1 и M2 получает питание от своего инвертора Инв.1 и Инв.2, что обеспечивает их независимую работу. Это позволяет максимально использовать тяговые возможности электровоза, как в двигательном, так и в тормозном режимах с учетом расхождения характеристик двигателей и нагрузки на оси, и достичь ожидаемой энергоэффективности всего комплекса ВШТ.

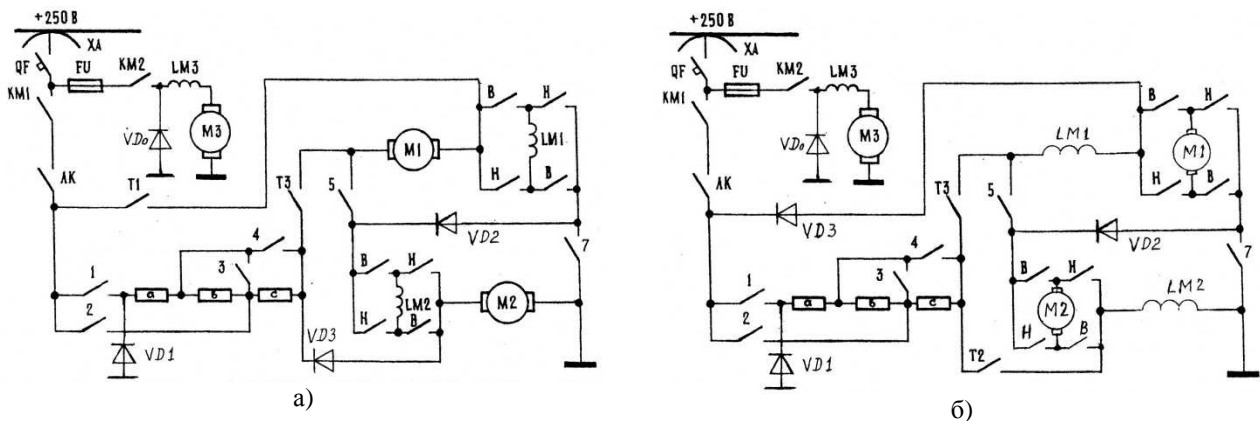


Рис. 7. Скорректированная схема контактного электровоза: а) с реверсом обмоток возбуждения; б) с реверсом обмоток якорей

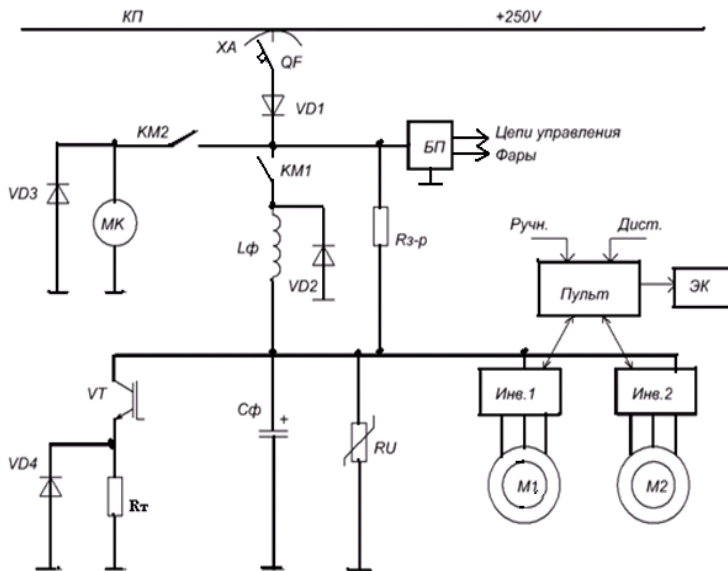


Рис. 8. Упрощенная схема контактного электровоза с асинхронным приводом

На рис. 9 представлены машинограммы механических характеристик тягового асинхронного электропривода с векторным управлением при неравномерной нагрузке тяговых двигателей. С представленных графиков видно, что разгон электропривода под нагрузкой до установившегося значения составляет 0,0334с и 0,074с, отработка сброса загрузки потребовала 0,003с и 0,006с, наброс нагрузки не отразился на скорости и был отработан за 0,03с. Перерегулирование при пуске составило 0,16% и 0,13%, при сбросе нагрузки 0,096% и 0,048%, при набросе нагрузки практически отсутствует. Все это подтверждает эффективность функционирования данных типов ТЭМС, а, следовательно, электровозов в целом.

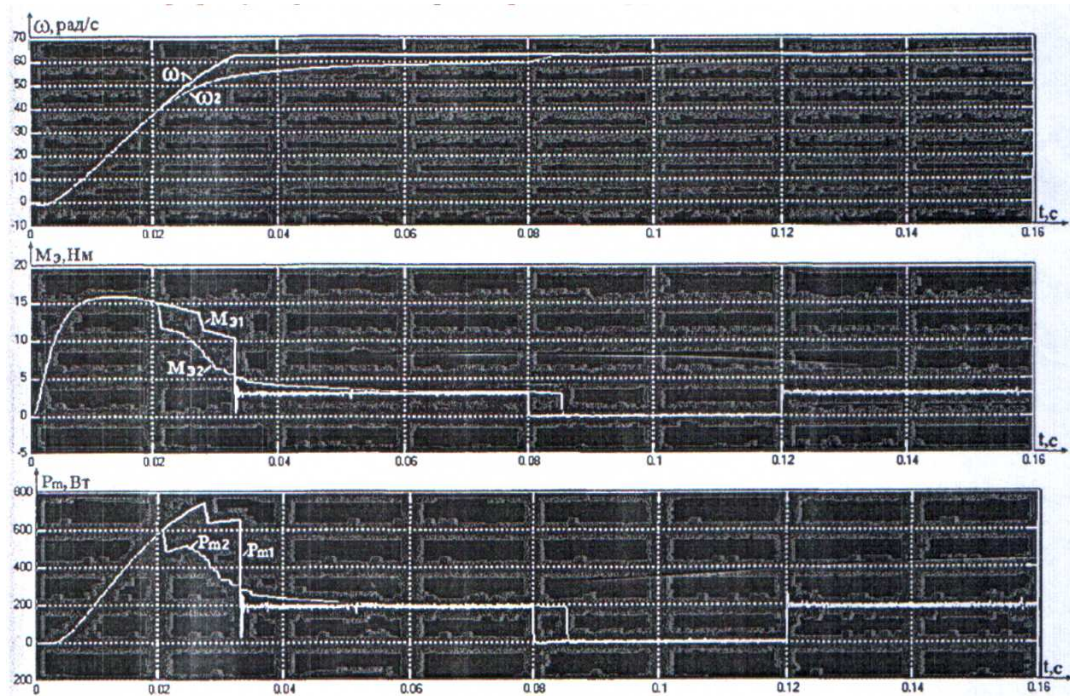


Рис. 9. Машинограммы механических характеристик двухдвигательного тягового асинхронного электропривода с векторным управлением

**Выводы.** 1. Существующие контактно-резисторные системы управления тяговым электроприводом рудничных электровозов не могут обеспечить достаточно эффективные режимы функционирования последних.

Предлагаемые варианты тяговых электровозов типа IGBT-тяговые асинхронные электрические двигатели позволяют достичь требуемого уровня эффективности функционирования ТЭМС рудничных электровозов, особенно в пуско-тормозных условиях.

**Список литературы:** 1. Дебелый В. Л. Основные направления развития шахтного локомотивного транспорта / В. Л. Дебелый, Л. Л. Дебелый, С. А. Мельников // Уголь Украины. – 2006. – №6. – С.30-31. 2. Сборник технико-экономических показателей горнодобывающих предприятий Украины в 2009-2010 гг. : Анализ мировой конъюнктуры рынка ЖРС 2004-2011 гг. / Е. К. Бабец, Л. А. Штанько, В. А. Салганик [и др.]. – Кривой Рог : Видавничий дім, 2011. – 329 с. 3. Комплекс ресурсо- та енергозберігаючих геотехнологій видобутку та переробки мінеральної сировини, технічних засобів їх моніторингу із системою управління і оптимізації гірничорудних виробництв / А. А. Азарян, Ю. Г. Вілкул, Ю. П. Капленко [та ін.]. – Кривий Ріг : Мінерал, 2006. – 219 с. 4. О варианте энергоэффективной структуры управления тяговым электромеханическим комплексом двухосных электровозов / О. Н. Синчук, И. О. Синчук, А. Ю. Давыдов [и др.] // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук, 2010. – №3/(11). – С. 27-29. 5. Коржев А. А. Повышение тяговых свойств рудничных электровозов за счет применения комбинированного привода: автореф. дис. к.т.н. – Санкт-Петербург, 2004. – 21 с. 6. Шокарев Д. А. Асинхронный тяговый электротехнический комплекс двухсистемного рудничного электровоза / Д. А. Шокарев, Е. И. Скапа // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук, 2011. – №4/(16) – С. 45-48. 7. Волотковский С. А. Опыт эксплуатации рудничных контактных электровозов с импульсной системой управления / С. А. Волотковский, Ю. С. Ремха, В. Х. Пироженко [и др.] // Горный журнал. – 1976. – №7. – С. 51 - 53. 8. К вопросу стратегии создания энергоэффективного и безопасного в эксплуатации двухосного электровоза для рудных шахт / О. Н. Синчук, Э. С. Гузов, И. О. Синчук [и др.] // Гірничий вісник. Науково-технічний збірник. – 2012. – Вип. 95(1). – С. 139-143. 9. Оат Г. П. Исследование нагрузок тяговых двигателей электровозов горных шахт: автореф. дис. к.т.н. – Ленинград, 1962. – 18 с. 10. Ренгевич А. А. Показатели рейсовой работы рудничных контактных электровозов / А. А. Ренгевич // Вопросы рудничного транспорта – 1961. – Вып. 5. – С. 118-124.

**Bibliography (transliterated):** 1. Debelyj, V. L., Debelyj, L. L., S. A. Melnikov "Osnovnye napravleniya razvitiya shahtnogo lokomotivnogo transporta." *Ugol Ukrainy*. No. 6. 2006. 30-31. Print. 2. Babets E. K., Shtanko L. A., Salganik V. A. [i dr.]. "Analiz mirovoy konyunktury rynka ZhRS 2004-2011 gg. ". Krivoy Rog : Vidavnichiy dim, 2011. – 329. Print. 3. Azaryan A. A., Vilkul Y. G., Kaplenko Y. P. [ta in.]. "Kompleks resurso- ta energozberigayuchih geoteknologiy vidobutku ta pererobki mineralnoyi sirovini, tehnicnih zasobiv yih monitoringu iz sistemoju upravlinnya i optimizatsiyi girnichorudnih virobntstv". Kriviy Rig : Mineral, 2006. –219. Print. 4. Sinchuk O. N., Sinchuk I. O., Davydov A. Y. [i dr.]. "O variante energoeffektivnoy struktury upravleniya tyagovym elektromehanichekim kompleksom dvuhosnyh elektrovozov". *Kremenchuk*, No №3/(11). 2010. 27-29 Print. 5. Korzhev A. A. "Povyshenie tyagovyh svoystv rudnichnyh elektrovozov za schet primeneniya kombinirovannogo privoda". Sankt-Peterburg, 2004. – 21. Print. 6. Shokarev D. A., Skapa E. I. "Asinhronnyy tyagovyy elektrotehnicheskyy kompleks dvuhsystemnogo rudnichnogo elektrovoza". *Kremenchug*, No. №4/(16). 2011. 45-48. Print. 7. Volotkovskiy S. A. Remha Yu. S., Pirozhenko V. H. [i dr.]. "Opyt ekspluatatsii rudnichnyh kontaktnykh elektrovozov s impulsnoy sistemoy upravleniya". No. 7. 1976. 51 - 53. Print. 8. Sinchuk O. N., Guзов E. S., Sinchuk I. O. [i dr.]. "K voprosu strategii sozdaniya energoeffektivnogo i bezopasnogo v ekspluatatsii dvuhosnogo elektrovoza dlya rudnyh shaht". No. 95(1). 2012. 139-143. Print. 9. Oat G. P. "Issledovanie nagruzok tyagovykh dvigateley elektrovozov gornyh shaht". Leningrad, 1962. 18. Print. 10. Rengevich A. A. "Pokazateli reysovoy raboty rudnichnyh kontaktnykh elektrovozov". No. 5. 1961. 118-124. Print.

Поступила (received) 24.08.2015