

Б. Г. ЛЮБАРСКИЙ, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»

ВЫБОР ТИПА ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ПРИГОРОДНОГО ЭЛЕКТРОПОЕЗДА

В настоящее время при разработке нового электроподвижного состава (ЭПС) встает вопрос о выборе концепции тягового электропривода. В работе рассматривается методика выбора типа тягового электромеханического преобразователя на основе комплексного критерия эффективности включающего в себя расход энергии электропоезда, средняя скорость его движения и предложенного показателя эффективности – отношение энергии, преобразованной ЭПС из электрической энергии в механическую энергию силы тяги или торможения к предельно возможной энергии, которую можно реализовать по условиям контакта колесо-рельс при максимально возможной скорости движения на участке пути. Определены рациональные типы электромеханических преобразователей для пригородного электропоезда при различных скоростях движения. Установлено, что для максимальных скоростей движения 50, 90, 120 и 140 км/ч целесообразно выбрать синхронный двигатель с возбуждением постоянных магнитов, для остальных рассматриваемых скоростей движения, 60, 70, 80, 100 и 110 км/ч, асинхронный тяговый двигатель.

Ключевые слова: критерий эффективности, электропоезд, электромеханический преобразователь энергии, кривые движения поезда, показатель эффективности.

Введение. Сердцем электроподвижного состава (ЭПС) является тяговый электропривод – совокупность устройств, предназначенных для преобразования электрической энергии, получаемой из контактной сети, в полезную работу по перемещению электроподвижного состава. Его эффективность определяет в большей степени эффективность всего электропоезда.

Анализ основных достижений и литературы. В работах [1, 2, 3, 4] отмечается, что определяющим для структуры тягового электропривода является электромеханический преобразователь энергии (ЭМП) –тяговый двигатель. Рассмотрены перспективные типы ЭМП для ЭПС такие, как: асинхронный тяговый двигатель (АТД), синхронный тяговый двигатель с возбуждением от постоянных магнитов (СДПМ), реактивный индукторный двигатель (РИД) и реактивный индукторный двигатель с аксиальным магнитным потоком (АИД).

Цель работы. разработать методику определения эффективности тягового привода и выбора типа электромеханического преобразователя энергии для пригородного подвижного состава железных дорог.

Материал исследования. Расчет кривых движения основан на интегрировании уравнения движения [5, 6]:

$$m \frac{dv}{dt} = \frac{1}{1+\gamma} (F - W - B), \quad (1)$$

где m – масса электропоезда;

v – скорость движения электропоезда;

$1+\gamma$ – коэффициент инерции вращающихся частей;

t – текущее значение времени;

F – сила тяги;

B – тормозная сила;

W – полное сопротивление движению;

γ – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние вращающихся частей на ускорение движения электропоезда.

Сила тяги и торможения зависят от режима работы тягового привода. На реально существующих участках пути минимизация расхода энергии является сложной многокритериальной задачей. Однако для выбора типа ЭМП нами предлагается для рассматриваемых задач движения ЭПС на участке пути при требовании минимизации времени движения на участке пути с заданным профилем и графиком движения предложить следующие режимы движения ЭПС: движение с максимальной допустимой силой тяги, которое осуществляется для разгона ЭПС; движение на выбеге при движении на скорости близкой к заданной; движение с максимальной силой торможения при требовании резкого снижения скорости движения ввиду ограничения скорости движения согласно графику движения; движение при работе электропривода с максимальным КПД в режиме тяги при движении со скоростями близкими к заданной скорости движения при больших сопротивлениях движению (на затяжных подъемах); движение при работе электропривода с максимальным КПД в режиме торможения – движении со скоростями близкими к заданной скорости движения при больших отрицательных сопротивлениях движению (на затяжных спусках). Эти режимы согласуются с принципом Понтрягина [7], согласно которому, движение поезда должно осуществляться с максимальной силой тяги для достижения установленной скорости движения или на выбеге.

Основная часть. В качестве показателя эффективности для ЭПС рассматривались различные величины. Наибольшее распространение получил показатель расхода энергии A [8, 9]. Однако при рассмотрении вопроса о создании скоростного ЭПС на первый план выходит время движения ЭПС поэтому в качестве этого показателя возможно выбрать среднюю скорость движения ЭПС v_{sr} . Эти два показателя могут быть взаимно противоречивы, поэтому для принятия решения по определению лучшего типа предлагается ввести относительный показатель эффективности.

Под показателем эффективности, который есть мера степени соответствия результата операции требуемому [7] есть показатель определяющий отличие реализуемой кривой движения поезда от идеализированной, позволяющей осуществлять движения поезда по участку пути с предельной для данного участка скоростью реализуя при этом все СЭМП по преобразованию энергии который можно выразить следующим выражением:

$$W_{oeemsi} = \frac{W_{real}}{W_{pred}}, \quad (2)$$

где W_{real} – энергия, преобразованная ЭПС из электрической энергии в механическую энергию силы тяги или торможения;

W_{pred} – предельно возможная энергия которую может реализовать по условиям контакта колесо рельс при максимально-возможной скорости движения на участке пути.

Электрическая энергия которую преобразовывала СЭМП можно определить по выражению:

$$W_{real} = \frac{n}{3600} \left[\int_0^{t_{кп}} \frac{P_{2ПСП}}{\eta_C} dt + \int_{t_{нт}}^{t_{кт}} P_{2ТСП} \eta_{СП} dt \right] \quad (3)$$

где n – количество тяговых двигателей ЭП;

$P_{2ПСП}$, $P_{2ТСП}$ – средняя мощность на валу двигателя при разгоне и торможении соответственно;

$t_{кп}$ и $t_{кт}$ – время конца пуска и торможения;

$t_{нт}$ – время начала торможения;

η_C и $\eta_{СП}$ – КПД электропривода соответственно в режиме тяги и рекуперативного торможения.

Предельно возможная энергия которую может реализовать по условиям контакта колесо рельс при максимально-возможной скорости движения на участке пути:

$$W_{real} = \frac{n}{3600} \int_0^{t_{\Sigma}} \frac{60\mu v_{max}}{3.6\pi D} \frac{M'_k(v_{max})}{9.55} dt \quad (4)$$

где v_{max} – максимальная скорость на рассматриваемом участке движения;

μ – передаточное отношение редуктора ЭПС;

D – диаметр среднеизношенного бандажа колесной пары;

$M_k'(v_{\max})$ – максимально возможный момент на валу тягового двигателя по условию контакта колесо-рельс.

В результате в работе предлагается ввести комплексный критерий эффективности в виде:

$$W = \rho \left(\left[\begin{array}{c} MIN(A_{emsi}) \\ MAX(v_{sri}) \end{array} \right], W_{oeemsi} \right), \quad (5)$$

где A_{emsi} – расход энергии i-го ЭПС;

v_{sri} – средняя скорость i-го ЭПС.

Выбор типа перспективного ЭМП проведем на примере реализованных и перспективных конструкций: асинхронный (АТД) – АД 917, синхронный с возбуждением от постоянных магнитов (СДПМ) – RTRI 10], реактивный индукторный (РИД) – НТИ 350 [11] и реактивный индукторный двигатель с аксиальным магнитным потоком (АИД) – концептуальный проект разработанный в НТУ «ХПИ» [12]. Для определения кривых движения поезда проведено интегрирование дифференциального уравнения (1) методом Эйлера. Результаты решения уравнения (1) для электропоездов на синтезированных профилях удовлетворяющего требованиям [13] приведены на рис. 1-4.

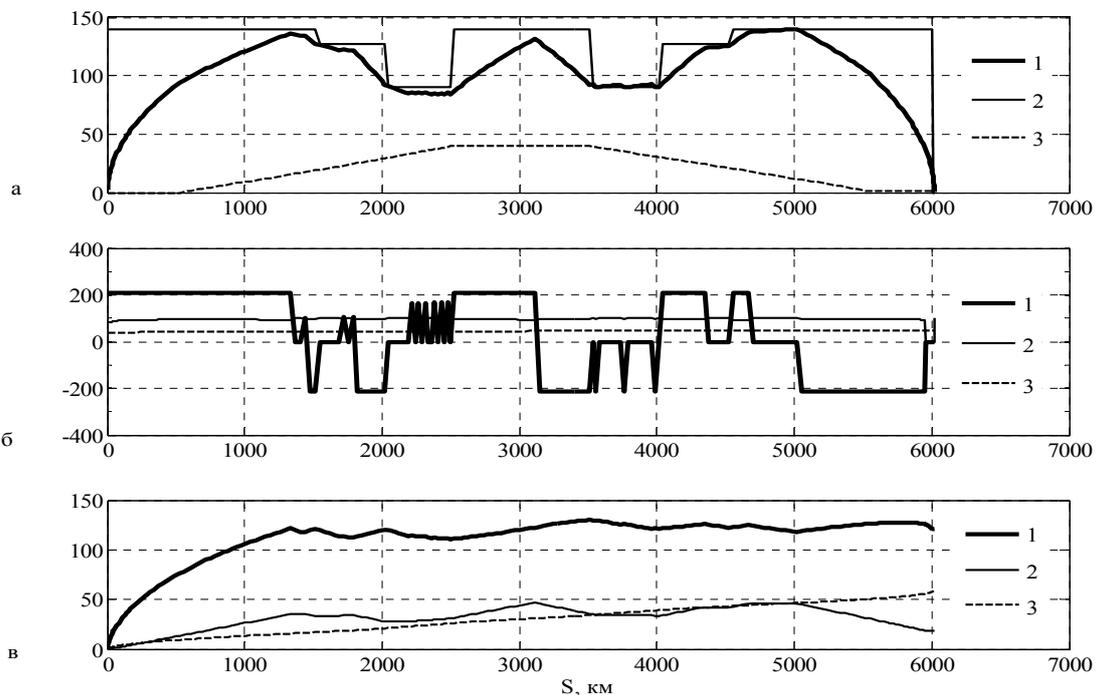


Рис. 1 – Кривые движения пригородного электропоезда с ЭМП АТД:
 а: 1 – скорость движения, км/ч; 2 – заданная скорость движения, км/ч; 3 – профиль пути, м; б: 1 – $M_2 / 100$; 2 – КПД, %; 3 – температура тягового двигателя, °С;
 в: 1 – $W_{oeemsi} \cdot 1000$; 2 – расход энергии, кВт ч; 3 – время движения / 4, с.

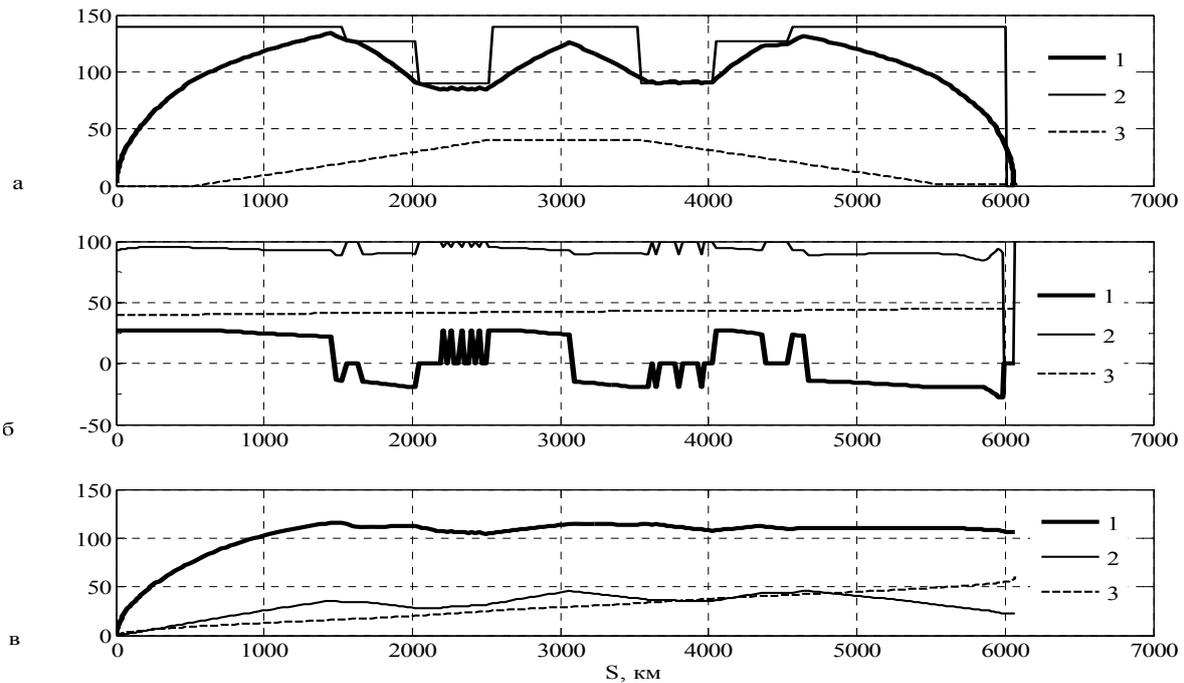


Рис. 2 – Кривые движения пригородного электропоезда с ЭМП СДПМ: *а*: 1 – скорость движения, км/ч; 2 – заданная скорость движения, км/ч; 3 – профиль пути, м; *б*: 1 – $M_2 / 100$; 2 – КПД, %; 3 – температура тягового двигателя, °C; *в*: 1 – $W_{oemsi} \cdot 1000$; 2 – расход энергии, кВт ч; 3 – время движения / 4, с.

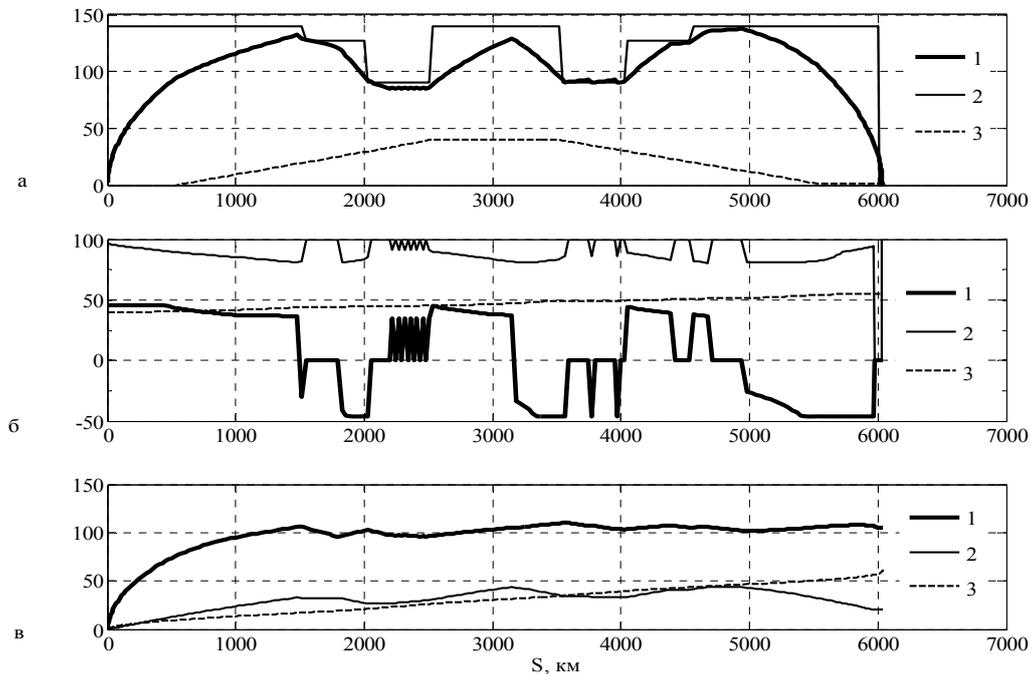


Рис. 3 – Кривые движения пригородного электропоезда с ЭМП РИД: *а*: 1 – скорость движения, км/ч; 2 – заданная скорость движения, км/ч; 3 – профиль пути, м; *б*: 1 – $M_2 / 100$; 2 – КПД, %; 3 – температура тягового двигателя, °C; *в*: 1 – $W_{oemsi} \cdot 1000$; 2 – расход энергии, кВт ч; 3 – время движения / 4, с.

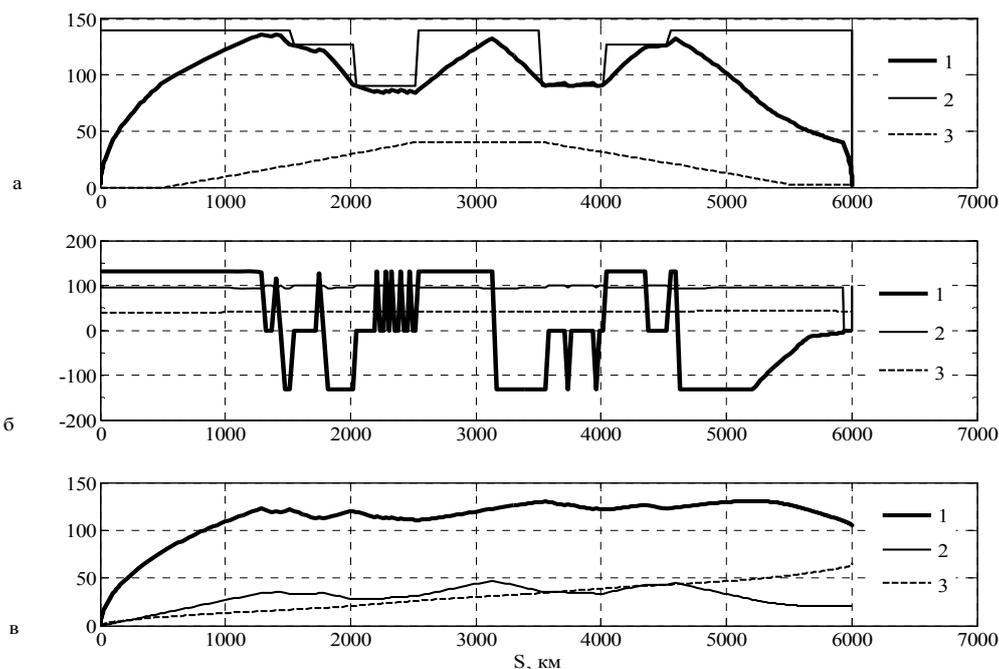


Рис. 4 – Кривые движения пригородного электропоезда с ЭМП АИД: *а*: 1 – скорость движения, км/ч; 2 – заданная скорость движения, км/ч; 3 – профиль пути, м; *б*: 1 – $M_2 / 100$, 2 – КПД, %; 3 – температура тягового двигателя, °С; *в*: 1 – $W_{oeemsi} \cdot 1000$; 2 – расход энергии, кВт ч; 3 – время движения / 4, с.

Как видно из кривых движения для пригородных электропоездов скорость электропоездов всех типов монотонно возрастает тяговый привод работает в режиме максимальной силы тяги, однако только у ЭПС АТД и ЭПС АИД она достигает заданной на очень коротком интервале времени, далее она снижается ввиду заданного графика движения с применением электрического торможения, у ЭПС СДПМ и заданная скорость не была достигнута. Далее скорость поддерживается ниже заданной скорости движения, чередуется режим тяги при максимальном КПД и выбега. На интервале от 2500 до 3500 м от начала движения ровный участок без кривых ограничений скорости движения на котором также наблюдается разгон ЭПС. Однако на этом участке заданная скорость не была достигнута не одним из ЭПС так как для соблюдения графика движения приблизительно на расстоянии 3100 м ЭПС перешли в режим рекуперативного торможения. На участке от 3500 м до 5500 м затыжной спуск. На от 3500 м до 4000 м скорость поддерживается постоянной путем включения рекуперативного торможения. В интервале времени от 3500 м до 5000 м скорость возрастает ввиду с постепенным снятием ограничений, тяговый привод работает в режиме тяги в сочетании с режимом выбега. У ЭПС АТД и ЭПС РИД скорость достигает заданной и поддерживается в интервале от 4600 м до 5000 м далее снижается до полной остановки с применением всех видов торможения (рекуперативного с полной силой торможения, рекуперативного в режиме

максимального КПД и остановочного электропневматического). У ЭПС СДПМ и ЭПС АИД заданная скорость не была достигнута ввиду меньшего ускорения на высоких скоростях движения, чем у ЭПС АТД или ЭПС РИД. На участке 4500 м начинается остановочное торможение. Расход Энергии поезда возрастает в режиме тяги (положительная сила тяги) и достигает величины и снижается в режиме рекуперативного торможения. Максимальная величина расхода энергии составляет 50 кВт·ч, а энергия рекуперации 25...27 кВт·ч. Температура ЭМП изменяется незначительно ввиду малого интервала движения поезда.

Таблица 1 – Оптимальные типы электромеханических преобразователей

Максимальная скорость движения ЭПС, км/ч	Оптимальный тип ЭМП, по критерию расхода энергии	Оптимальный тип ЭМП, по критерию средней скорости движения	Оптимальный тип ЭМП, согласно комплексного критерия эффективности
50	АТД	СДПМ	СДПМ
60	АТД	СДПМ	АТД
70	АТД	СДПМ	АТД
80	АТД	СДПМ	АТД
90	АТД	СДПМ	СДПМ
100	АТД	СДПМ	АТД
110	АТД	СДПМ	АТД
120	АТД	СДПМ	СДПМ
140	АТД	СДПМ	СДПМ

Как видно из таблицы для пригородных электропоездов лучшие показатели расхода энергии показывает ЭПС с ЭМП АТД, а лучшую среднюю скорость ЭПС с ЭМП СДПМ, результаты по этим критериям противоречивы, поэтому применен показатель эффективности, согласно которому максимальных скоростей движения 50, 90, 120 и 140 целесообразно выбрать ЭМП СДПМ, для остальных рассматриваемых скоростей движения ЭМП АТД. Это обусловлено тем фактом, что ЭПС с ЭМП АТД и ЭМП СДПМ в большей степени соблюдали график движения на рассмотренном участке.

Выводы. В работе рассмотрена методика определения эффективности тягового привода пригородного электропоезда. В качестве критерия эффективности выбран комплексный критерий со следующими составляющими: расход энергии электропоезда, средняя скорость движения, и показателей эффективности. Установлено, что для максимальных скоростей движения 50, 90, 120 и 140 км/ч целесообразно выбрать ЭМП СДПМ, для остальных рассматриваемых скоростей движения ЭМП АТД.

Список литературы: 1. *Омельяненко В. И., Любарский Б. Г., Рябов Е. С., Демидов А. В., Глебова Т. В.* Анализ и сравнение перспективных тяговых электродвигателей // *Залізничний транспорт України.* – 2008. – №2/1. – С. 26–31. 2. *Омельяненко В. И., Любарский Б. Г., Рябов Е. С., Демидов А. В., Глебова Т. В.* Электродвигатели для перспективного электроподвижного состава // *Локомотив-информ.* – 2008. – №1. – С. 16 – 19. 3. *Колпахчян Г. И.* Электроприводы перспективного электроподвижного состава / *Г. И. Колпахчян, В. И. Захаров* // *Электровозостроение : сб. научн. тр. ОАО «Всерос. н.-и. и проектно-конструктр. ин-т электровозостроения» (ОАО «ВЭЛНИИ»).* – Т.45 – Новочеркасск, 2001. – с.62 – 67. 4. *Любарский Б. Г., Рябов Е. С., Демидов А. В.* Перспективный тяговый привод на базе двигателей с поперечным полем // *Залізничний транспорт України.* – 2007. – №2/1 – С.46 – 48. 5. *Правила тяговых расчетов поездной работы.* – М. : Транспорт. 1985. – 287с. 6. *Основы локомотивной тяги. Учебник для техникумов ж.-д. трансп. / С. И. Осипов, К. А. Миронов, В. И. Ревич.* 3-е изд., доп. и перераб. – М. : Транспорт, 1979. – 440 с. 7. *Постол Б. Г.* Теоретические основы разработки рациональных режимов вождения поездов и расчета масс составов : Уч. пособие. – Хабаровск : ДВГУПС. 1998. 61с. 8. *Мугиншейн Л. А., Илютович А. У., Ябко И. А.* Энергооптимальные методы управления движением поездов : сб. науч. тр. «ВНИИЖТ». — М. : Интекст, 2012. – 80с. 9. *Логина Е. Ю., Солдатенко Д. А.* Использование критериев эффективности при выборе тягового электродвигателя для электрической передачи тепловоза / *Транспорт : наука, техника, управление.* – 2009. – №2. С. 22 – 27. 10. *Совершенствование синхронного тягового двигателя на постоянных магнитах // Железные дороги мира.* – 2009. – №7. – С.56 – 69. 11. *Киреев А. В.* Тяговый вентильно-индукторный привод электроподвижного состава // *Железнодорожный транспорт.* – 2008. – №7. – С. 50 – 54. 12. *Рябов Е. С.* Реактивный индукторный двигатель с аксиальным магнитным потоком // *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».* – 2010. – № 38. – С. 80 – 83. 13. *Распоряжение ОАО "РЖД" от 30.01.2009 N 181р Об утверждении типов и основных характеристик моторвагонного подвижного состава.*

Bibliography (transliterated): 1. *Omelyanenko V. I., Lyubarskiy B. G., Ryabov E. S., Demidov A. V., Glebova T. V.* Analysis and comparison of prospective traction motors // *Railway Transport of Ukraine.* – 2008. – № 2/1. – S. 26 – 31. 2. *Omelyanenko V. I., Lyubarskiy B. G., Ryabov E. S., Demidov A. V., Glebova T. V.* Motors for electric rolling perspective // *Locomotive INFORM.* – 2008. – № 1. – S. 16 – 19. 3. *Kolpachchyan G. I.* Actuators promising electric rolling / *Kolpachchyan G. I., Zakharov V.* / *Electric locomotive building : Sat Nauchn. transport of "All-Russia. n.-i. and design konstruktr. Inst electric locomotive ("JSC" VELNII ").* – V.45 – Novocherkassk, 2001. – P.62 – 67. 4. *Lyubarskiy B. G., Ryabov E. S., Demidov A. V.* Perspective based on the traction drive motors with transverse field // *Railway Transport of Ukraine.* – 2007. – № 2/1 – P.46 – 48. 5. *Terms of train traction calculations.* – M. : Transport. 1985. – 287. 6. *Fundamentals of locomotive traction. Textbook for technical railway transp. / S. I. Osipov, K. A. Mironov, V. I. Revich.* 3rd ed., Ext. and rev. – Moscow : Transport, 1979. – 440. 7. *Postol B. G.* Theoretical basis for the development of rational modes of driving trains and calculate the weight of the composition : Ouch. allowance. – Khabarovsk DVGUPS. 1998. 61c. 8. *Muginsheyn L. A., Ilyutovich A. U., Yabko I. A.* Optimal energy traffic control methods : Sat scientific. tr. "VNIIZhT." - M. : Intekst 2012. – 80c. 9. *Loginov E. J., Soldatenko D. A.* Using performance criteria when choosing a traction motor for electric transmission locomotive / *Transport : science, technology, management.* – 2009. – № 2. Pp. 22 – 27. 10. *Improving synchronous traction motor permanent magnet // Railways world.* – 2009. – № 7. – P.56 – 69. 11. *Kireev A. V.* Traction drive switched-inductor electric rolling // *Rail.* – 2008. – № 7. – S. 50 – 54. 12. *Ryabov E. S.* Inductor jet engine axial flux // *News Natsionalnogo tehničnogo universitetu "Harkivsky politehničny institut".* – 2010. – № 38. – S. 80 – 83. 13. *Disposal of OAO "Russian Railways" from 30.01.2009 N 181r On approval of the types and main characteristics of multiple units.*

Надійшла (received) 02.04.2014