

В.Н. Знаенко¹, А.О. Линьков¹

¹ Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОВЗОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В ТЯЖЕЛОВЕСНОМ ДВИЖЕНИИ

Аннотация. Сегодня тяжеловесное движение — это необходимый и действующий инструмент для увеличения пропускной способности и интенсификации перевозочного процесса. Для эффективного использования тяжеловесного движения необходимо решить ряд проблем, одна из которых заключается в снижении напряжения в контактной сети при пропуске тяжеловесных поездов. Так как при этом падает скорость движения поезда по перегону, ухудшаются условия охлаждения силового оборудования электровоза, увеличивается время хода поезда и т.д.

В результате анализа работы тиристорного выпрямительно-инверторного преобразователя выявлен ряд недостатков. Причина низкого коэффициента мощности электровоза заключена в использовании устаревшей элементной базы на основе тиристоров, их закрытие осуществляется только в следующем полупериоде напряжения, длительная коммутация и большой угол открытия тиристоров приводит к значительному реактивному току в контактной сети.

Проанализировав потери напряжения на токоприемнике, сделан вывод о необходимости уменьшения длительности процесса коммутации плеч ВИП, при котором происходит короткое замыкание вторичной обмотки тягового трансформатора. Предложен альтернативный вариант преобразователя на основе полностью управляемых полупроводниковых приборов IGBT-транзисторов. Возможность открытия и закрытия в любой момент времени таких элементов позволяет максимально уменьшить угол сдвига фаз и повысить коэффициент мощности. За счёт практически мгновенной коммутации транзисторов искажение в контактной сети минимизировано.

Ключевые слова: тяжеловесное движение; пропускная способность; выпрямительно-инверторный преобразователь; коэффициент мощности; электровоз переменного тока; контактная сеть.

IMPROVING THE ENERGY PERFORMANCE OF AC ELECTRIC LOCOMOTIVES IN HEAVY TRAFFIC

V. N. Znaenok¹, A. O. Linkov¹

¹ Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

Abstract. Today, heavy traffic is a necessary and effective tool for increasing throughput and intensifying the transportation process. For the effective use of heavy traffic, it is necessary to solve a number of problems, one of which is to reduce the voltage in the contact network when passing heavy trains. Since at the same time the speed of the train along the haul decreases, the conditions for cooling the power equipment of the electric locomotive worsen, the travel time of the train increases, etc.

As a result of the analysis of the operation of the thyristor rectifier-inverter converter, a number of disadvantages were revealed. The reason for the low power factor of the electric locomotive lies in the use of an outdated element base based on thyristors, their closure is carried out only in the next voltage half-cycle, long-term switching and a large opening angle of thyristors leads to a significant reactive current in the contact network.

After analyzing the voltage losses at the current collector, it was concluded that it is necessary to reduce the duration of the switching process of the arms of the VPS, in which there is a short circuit in the secondary winding of the traction transformer. An alternative version of the converter based on fully controlled semiconductor devices IGBT transistors is proposed. The ability to open and close at any time of such elements allows you to minimize the phase angle and increase the power factor. Due to the almost instantaneous switching of transistors, the distortion in the contact network is minimized.

Keywords: heavy traffic; bandwidth; rectifier-inverter converter; Power factor; alternating current electric locomotive; contact network.

Введение

В настоящее время, когда по основным направлениям железнодорожной сети значительно возросли объёмы перевозок массовых грузов, таких как руда, нефть, металл, уголь и др., существует необходимость повышения пропускной способности наиболее загруженных участков дорог. Для решения этой проблемы одним из приоритетных

направлений компании ОАО «РЖД» является расширение технологии пропуска тяжеловесных поездов.

Развитие тяжеловесного движения на железных дорогах – важнейший рычаг интенсификации перевозочных мощностей основных направлений сети, позволяющий повысить эффективность работы железнодорожного транспорта. Повышение среднего веса поезда позволяет снизить затраты в перевозочном процессе, увеличить производительность локомотива и локомотивных бригад, а также способствует наращиванию пропускной и провозной способности участков железных дорог.

Говоря о положительных сторонах упомянутого решения, необходимо учитывать, что пропуск тяжеловесных поездов значительно усложняет технологию работы всего железнодорожного комплекса [1]. Утяжеление поездов должно сопровождаться рядом мер, позволяющих максимально эффективно реализовать работу железнодорожного комплекса: это создание полигонов, позволяющих выделить участки обращения тяжеловесных поездов; внедрение современных средств автоматики и телемеханики, которые обеспечивают безопасность движения; удлинение приемоотправочных путей для возможности осуществления обгона пассажирскими поездами на отдельных пунктах; обеспечение дороги новым более мощным тяговым подвижным составом, а также модернизация существующего парка локомотивов; усиление системы тягового электроснабжения.

Кардинальное решение проблемы пропускной способности невозможно без усиления системы тягового электроснабжения и повышения качественной работы электроподвижного состава. При пропуске тяжеловесных и соединенных поездов можно наблюдать резкие просадки напряжения в контактной сети, что негативно сказывается на работе железнодорожного комплекса.

Со снижением напряжения в контактной сети уменьшается скорость движения и увеличивается перегонное время хода поездов, вследствие чего снижается пропускная способность участка. Ухудшаются условия охлаждения тяговых двигателей и всего силового электрооборудования за счет уменьшения частоты вращения вентиляторов.

Для поддержания скорости поезда при движении по перегону необходимо обеспечивать требуемое напряжение на тяговых двигателях, при низком напряжении в контактной сети необходимо увеличивать количество используемых обмоток тягового трансформатора, переходить на более высокие зоны регулирования. Всё это вызовет повышение потребления электрической энергии на тягу поездов за счёт увеличения тока в первичной обмотке тягового трансформатора и, соответственно, приведёт к значительной загрузке контактного провода активным и реактивным токами.

Соответственно опираясь на вышеперечисленные сведения можно сделать вывод, что снижение напряжения в контактной сети является значимым ограничением в наращивании весовых норм и тяжеловесного движения в целом.

Анализ причины снижения напряжения в контактной сети

Для решения проблемы тягового электроснабжения требуется усиление существующего питания, создание дополнительных генерирующих мощностей, новых линий электропередач, модернизации тяговых подстанций. Такое решение весьма затратно, требует больших капитальных вложений и является сложным и продолжительным проектом. Необходимо отметить, что эти мероприятия не приведут к значительным эффектам, так как основной причиной снижения напряжения в контактной сети является работа электровоза с низким коэффициентом мощности и длительными коммутационными переключениями плеч выпрямительно-инверторного преобразователя (ВИП), вызывающие дополнительно коммутационные и послекоммутационные колебания напряжения. Одним из основных путей решения данной проблемы является совершенствование тягового электроподвижного состава. Проблема низкого коэффициента мощности заключается в использовании устаревшей элементной базы ВИП на основе тиристоров и принятом алгоритме управления [2]. Схема ВИП на тиристорах и диаграммы работы представлены на рисунке 1.

Рассмотрим алгоритм работы тиристорного ВИП в положительном полупериоде питающего напряжения, рисунок 1 б. Допустим, в интервале времени $10-2\pi(0)-1$ ток протекал по плечам VS1 и VS8. В точке 1 подается сигнал управления α_0 на плечо VS7, оно открывается, образуя короткозамкнутый контур x1-VS7-VS1-a1. На участке 1-2 происходит коммутация, плечо VS1 закрывается. В точке 2 подается сигнал управления α_{03} на плечо VS4, оно открывается, и образует короткозамкнутый контур x1-VS8-VS4-1. На участке 2-3 протекает коммутация, плечо VS8 закрывается. На участке 3-4 ток протекает по плечам VS4 и VS7. В точке 4 на плечо VS2 подается импульс управления α_p , образуется короткозамкнутый контур 1-VS4-VS2-a1. На участке 4-5 протекает коммутация, в результате плечо VS4 закрывается. В следующем полупериоде работа ВИП аналогична.

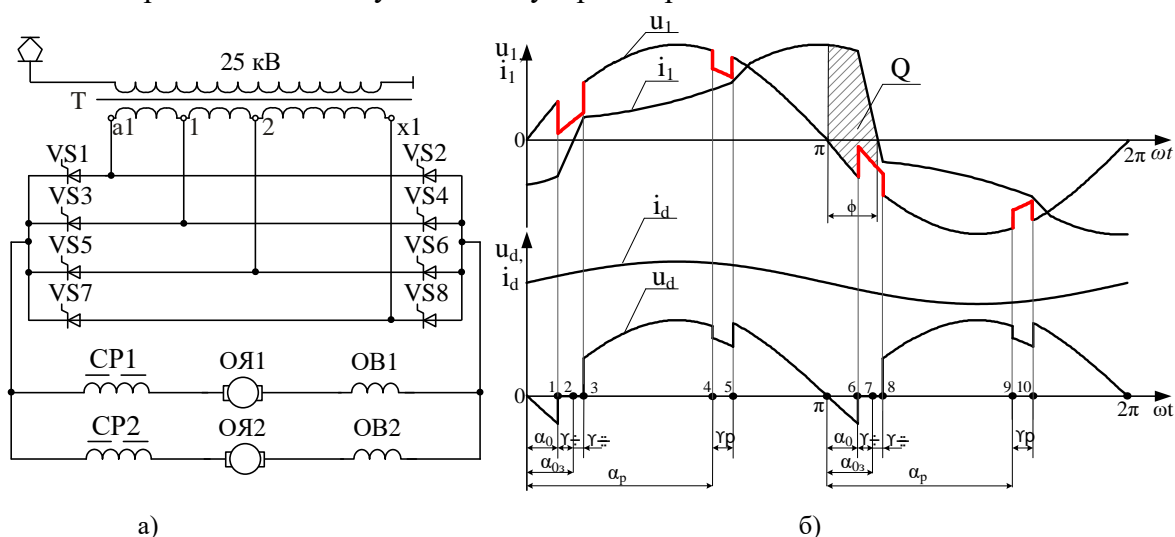


Рисунок 1 – Работа выпрямительно-инверторного преобразователя на тиристорах: а) – принципиальная электрическая схема тележки электровоза с тиристорным ВИП б) – диаграммы электромагнитных процессов электровоза при работе ВИП

Периоды коммутации в работе ВИП вызывают значительные искажения кривой напряжения контактной сети. Электровозы, работающие в режиме тяги, искажают в основном передний фронт в полупериоде напряжения, а в режиме рекуперативного торможения – задний фронт.

Искажение формы кривой напряжения в процессе коммутации преобразователей вызывает потерю среднеквадратичного значения напряжения. Глубокое искажение переднего фронта и большой угол коммутации γ относятся к особо неблагоприятным условиям питания электровозов. Наибольшее снижение напряжения в контактной сети будет проявляться в середине межподстанционной зоны, особенно при одностороннем питании в вынужденных режимах работы устройств электроснабжения [3].

Когда электровоз находится на межподстанционной зоне между тяговыми подстанциями то при работе ВИП в кривой принужденного напряжения на токоприемнике в моменты начала ΔU_H и конца ΔU_K коммутации преобразователя возникают разрывы (рисунок 2):

$$\Delta U_H = \frac{L_{\text{ЭКВ}}}{L_{\text{ЭКВ}} + L_3} \cdot \frac{(L_{\text{ЭКВ}} + L_3)U_d - L_d U_m \sin \alpha}{L_{\text{ЭКВ}} + L_3 + L_d}, \quad (1)$$

$$\Delta U_K = \frac{L_{\text{ЭКВ}}}{L_{\text{ЭКВ}} + L_3} \cdot \frac{(L_{\text{ЭКВ}} + L_3)U_d + L_d U_m \sin(\alpha + \gamma)}{L_{\text{ЭКВ}} + L_3 + L_d}, \quad (2)$$

где L_3 и L_d – индуктивность тягового трансформатора и цепи выпрямленного тока соответственно;

U_d и U_m – напряжение выпрямленное на тяговом двигателе электровоза и на зажимах тяговой подстанции соответственно;

$L_{\text{ЭКВ}}$ – эквивалентная индуктивность цепи между источником питания и токоприемником электровоза.

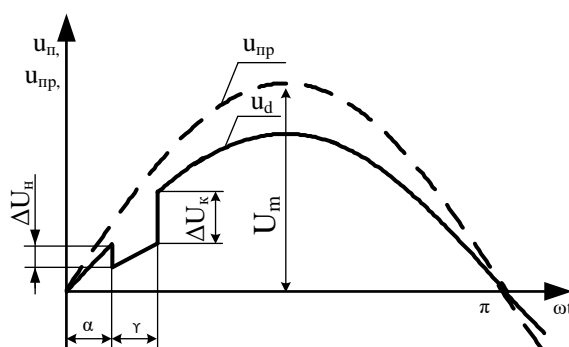


Рисунок 2 – Форма кривой напряжения на первичных шинах тяговой подстанции ($u_{\text{пр}}$) и на токоприемнике электровоза ($u_{\text{п}}$)

Анализируя указанные выше формулы, можно сделать вывод о том, что потеря напряжения тем больше, чем больше коммутация γ и чем ближе она к середине полупериода.

Увеличение выпрямленного напряжения ВИП на тиристорах осуществляется путем изменения фазы импульсов управления только с конца полупериода в сторону его начала. При регулировании выпрямленного напряжения затягивается процесс коммутации при смене обмоток трансформатора в полупериode напряжения, когда тиристор с меньшим потенциалом закрывается, а ток начинает протекать по тиристор с большим потенциалом.

Закрытие тиристоров плеч ВИП при смене полупериода сетевого напряжения осуществляется за счёт снижения тока через них ниже тока удержания путем открытия следующих плеч ВИП и приложения обратного напряжения. В результате возникает большой угол сдвига фаз ϕ между током i_l и напряжением u_l в первичной обмотке тягового трансформатора. Высокая величина минимального угла открытия тиристоров α_0 (9-20 эл. град) приводит к увеличению угла ϕ , как следствие, возрастает реактивная мощность Q , а коэффициент мощности снижается. Также на снижение коэффициента мощности влияет и длительный процесс поочерёдной коммутации тиристоров плеч ВИП.

Повышение коэффициента мощности электровоза и уменьшение снижения напряжения при работе электровоза

Таким образом, чтобы снизить влияние электровоза на качество напряжения в контактной сети и увеличить коэффициент мощности, необходимо уменьшить минимальный угол открытия α и длительность коммутации γ . Одним из способов решения поставленной задачи является замена устаревшей элементной базы ВИПа на современные силовые полупроводниковые приборы (СПП). Примером таких устройств являются биполярные транзисторы с изолированным затвором – IGBT-транзисторы. Данные устройства полностью управляемые, что позволяет открывать и закрывать полупроводники в любой момент времени, причем закрытие транзистора происходит мгновенно, а значит, длительность коммутации минимальна, и, как следствие, искажающее воздействие на контактную сеть будет снижено. На сегодняшний день существует ВИП для коллекторного тягового привода, выполненный на основе IGBT-транзисторов. Данный преобразователь разработан учеными Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС), его принципиальная электрическая схема и диаграммы работы представлены на рисунке 3 [4,5].

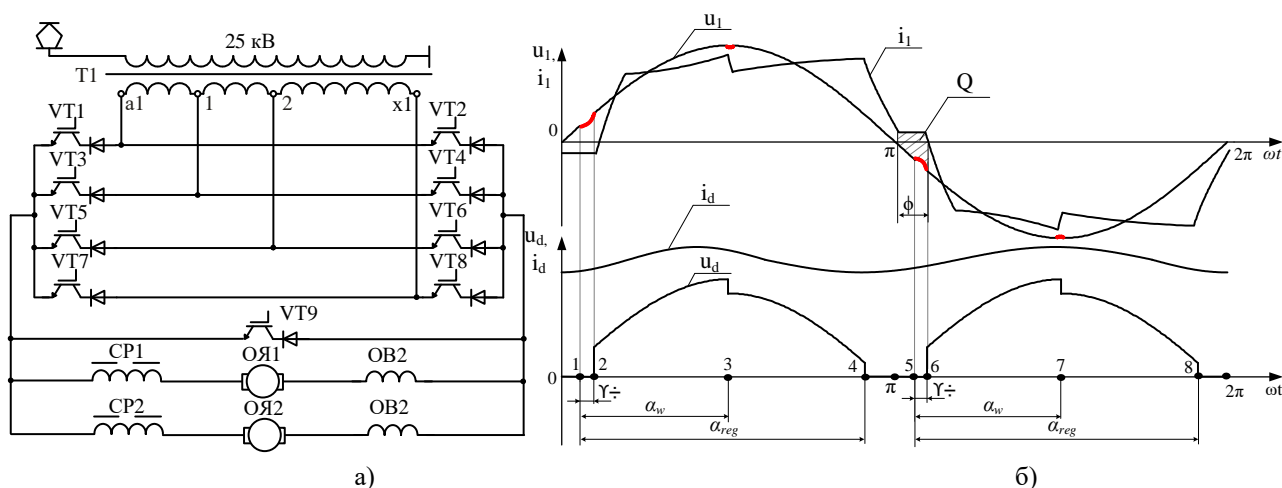


Рисунок 3 – Работа выпрямительно-инверторного преобразователя на IGBT-транзисторах: а) – принципиальная электрическая схема тележки электровоза с ВИП на IGBT-транзисторах б) – диаграммы электромагнитных процессов электровоза при работе ВИП

Рассмотрим работу ВИПа на IGBT-транзисторах, рисунок 3 б. В момент времени 1 подаются сигналы управления: α_{reg} на транзистор плеча VT2, α_w на VT7 и VT4. На интервале 1-2 происходит коммутация, передача нагрузки с разрядного плеча VT9 на плечи VT2, VT7. На интервале 2-3 ток протекает по транзисторам VT2 и VT7, обеспечивается напряжение 4-ой зоны регулирования. В момент времени 3 с транзистора VT2 снимается сигнал управления, в работе остаются транзисторы VT4 и VT7, обеспечивается напряжение 3-ей зоны регулирования. В точке 4 снимаются сигналы управления с транзисторов VT4 и VT7, происходит открытие разрядного плеча VT9. На интервале 4-5 ток протекает через тяговые двигатели, сглаживающий реактор и транзисторное плечо VT9. В момент времени 5 на транзистор VT1 подается сигнал управления α_{reg} , на транзисторы VT8 и VT3 подаются сигналы управления α_w . На участке 5-6 происходит коммутация, снимается нагрузка с плеча VT9 на плечи VT1 и VT8. На участке 6-7 ток протекает по плечам VT1 и VT8, обеспечивается напряжение 4-ой зоны регулирования. В точке 7 снимается управляющий сигнал с плеча VT1, в работу включается плечо VT3. На участке 3-8 ток протекает по плечам VT3 и VT8, обеспечивается напряжение 3-ей зоны регулирования.

Заключение

Описанный способ управления и наличие полностью управляемых СПП позволяет максимально уменьшить угол сдвига фаз ϕ , что даёт существенный прирост коэффициента мощности [6]. Благодаря снижению длительности основной коммутации и исключения короткого замыкания обмоток тягового трансформатора, минимизировано искажение кривой напряжения контактной сети.

Сегодня тяжеловесное движение - это эффективный способ повышения пропускной способности. Для организации такого направления ключевым звеном является мощный тяговый подвижной состав с высокими энергетическими показателями. Задача повышения коэффициента мощности электровозов остается актуальной до сих пор. В паре с рациональным использованием электрической энергии за счет внедрения современных силовых преобразователей на электровозе и новых технологических решений в области пропуска поездов существует возможность сокращения межпоездного интервала, что позволит увеличить пропускную способность как отдельного участка, так и дороги в целом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гильманов А. И. Увеличение массы поезда по сети железных дорог [Электронный ресурс] / А. И. Гильманов, О. И. Залогова // Молодая наука Сибири : электрон. научн. журн. – 2018 - № - Режим доступа: <http://mnv.irknps.ru/toma/11-2018> (дата обращения: 24.02.2021).

2. Электровоз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К) : Руководство по эксплуатации. Книга 5. Описание и работа. Электронное оборудование. Преобразователи. ИДМБ.661142.009.РЭ5. – Новочеркасск : ВЭЛНИИ, 2005. – 125 с. – Текст: непосредственный.

3. Тихменев, Б. Н. Электровозы переменного тока с тиристорными преобразователями [Текст] / Б. Н. Тихменев, В. А. Кучумов. – М.: Транспорт, 1988. – 312 с.

4. Пат. 2498490 Российская Федерация, МПК H02M, H02P, G05F, B60L. Многозонный выпрямительно-инверторный преобразователь и способ управления преобразователем [Текст] / Портной А.Ю., Мельниченко О.В., Шрамко С.Г., Полуянов А.Г.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Иркутский государственный университет путей сообщения». – № 2012114982/07; заявл. 16.04.2012 ; опубл. 10.11.2013, Бюл. № 31. – 7 с.

5. Яговкин Д.А. Разработка нового энергосберегающего алгоритма управления ВИП электровоза на IGBT модулях [Текст] /Д.А. Яговкин, О.В. Мельниченко, А.Ю. Портной / Вестник Института подвижного состава/ под ред. А.Е. Стецюка и Ю.А. Гамоли. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2013. – Вып. 5 – С.17-24.

6. Линьков А.О. Совершенствование выпрямительной установки возбуждения тяговых двигателей электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения [Текст]: Дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Линьков Алексей Олегович. – Омск, 2015. –177 с.

REFERENCES

1. Gilmanov A. I., Zalogova O. I. Increase of train weight on the railway network [*Uvelicheniye massy poyezda po seti zheleznikh dorog*]. Young science of Siberia: electron. scientific. journal. – 2018. - №. – Access mode: <http://mnv.irgups.ru/toma/11-2018>, free (accessed: 24 February 2021)

2. *Elektrovoz magistral'nyi 2ES5K (3ES5K): Rukovodstvo po ekspluatatsii. Kniga 5. Opisanie i rabota. Elektronnoe oborudovanie. Preobrazovateli* (Main electric locomotive 2ES5K (3ES5K). Manual. Book 5. Description and operation. Electronic equipment. Converters). Novocherkassk: VELNII Publ., 2005, 125 p.

3. Tikhmenev, B. N. *EHlektrovozy peremennogo toka s tiristornymi preobrazovatelyami* (AC electric locomotives with thyristor converters). Moscow: Transport, 1988, 312 p.

4. Portnoy A. Yu., Melnichenko O. V., Shramko S. G., Poluyanov A. G. Patent RU2498490. 10.11.2013

5. Yagovkin D.A., Melnichenko O. V., A. Yu. Portnoy Development of a new energy-saving algorithm for controlling a rectifier-inverter converter electric locomotive on IGBT modules [*Razrabotka novogo energosberegayushchego algoritma upravleniya VIP elektrovoza na IGBT modulyakh*]. Bulletin of the Institute of Rolling Stock / ed. A.E. Stetsyuk and Yu.A. Gamoli. - Khabarovsk: Publishing house of FVGUPS, 2013. - Issue. 5 - P.17-24.

6. Linkov A.O. *Sovershenstvovaniye vypryamitel'noy ustanovki vozbuzhdeniya tyagovykh dvigateley elektrovoza peremennogo toka v rezhime rekuperativnogo tormozheniya* (Improvement of the rectifier installation for excitation of traction motors of an AC electric locomotive in the regenerative braking mode). Doctor's thesis, Omsk, 2015, 177 p.

Информация об авторах

Знаенок Вячеслав Николаевич – студент группы ПСЖ. 3-16-1, факультета «Транспортные системы», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: znaenock@yandex.ru

Линьков Алексей Олегович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроподвижной состав», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: linkovalex@mail.ru

Authors

Vyacheslav Nikolaevich Znaenok - student of the PSG group. 3-16-1, Faculty of Transport Systems, Irkutsk State University of Railways, Irkutsk, e-mail: znaenock@yandex.ru

Aleksey Olegovich Linkov - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: linkovalex@mail.ru

Для цитирования

Знаенок В.Н. Повышение энергетических показателей электровозов переменного тока в тяжеловесном движении [Электронный ресурс] / В. Н. Знаенок, А. О. Линьков // Молодая наука Сибири: электрон. науч. журн. – 2021

For citation

Znaenok V.N., Linkov A.O. Povysheniye energeticheskikh pokazateley elektrovozov peremennogo toka v tyazhelovesnom dvizhenii [Increasing the energy performance of alternating current electric locomotives in heavy traffic] *Molodaya nauka Sibiri: ehlektronnyj nauchnyj zhurnal* [Young science of Siberia: electronic scientific journal], 2021