

Повышение энергоэффективности железнодорожного транспорта путем применения мобильных устройств поперечной емкостной компенсации

К.Д. Рубцов✉, Л.И. Жуйко

Красноярский институт железнодорожного транспорта, г. Красноярск, Российская Федерация

✉kirill.rubtsov.2001@mail.ru

Резюме

Авторы статьи предлагают использовать мобильные устройства поперечной емкостной компенсации реактивной мощности для повышения энергоэффективности железнодорожного транспорта. В работе рассмотрена возможность сокращения существующих межпоездных интервалов движения тяжеловесных поездов по участку железной дороги Ачинск-I – Черноярченская Ачинской дистанции электроснабжения при применении поперечной емкостной компенсации реактивной мощности на посту секционирования Тарутино для увеличения наличной пропускной способности рассматриваемого железнодорожного участка. Проверка расчетов выполнена в программном комплексе «КОРТЭС». Проведенный расчет показывает, что при использовании мобильных устройств поперечной емкостной компенсации реактивной мощности на Красноярской железной дороге возможно повысить энергоэффективность расчетного участка Ачинской дистанции электроснабжения Ачинск-I – Черноярченская и увеличить его пропускную способность. Применение указанных мобильных устройств позволяет поднять уровень напряжения на токоприемнике электроподвижного состава на 1,05–1,33 кВ и обеспечить движение грузовых поездов повышенной массы (до 7 100 т) в четном направлении при межпоездном интервале 14 мин. При включении второго силового трансформатора на тяговых подстанциях Ачинск-I и Черноярченская напряжение на токоприемнике электроподвижного состава увеличивается на 2,43–2,65 кВ, а межпоездной интервал уменьшается до 8–9 мин. Авторы считают, что результаты представленного расчета могут быть полезны для оптимизации работы железнодорожных систем и повышения их эффективности в целом.

Ключевые слова

поперечная емкостная компенсация, реактивная мощность, профиль пути, пропускная способность, компенсирующее устройство, энергоэффективность

Для цитирования

Рубцов К.Д. Повышение энергоэффективности железнодорожного транспорта путем применения мобильных устройств поперечной емкостной компенсации / К.Д. Рубцов, Л.И. Жуйко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 2 (82). С. 111–122. DOI 10.26731/1813-9108.2024.2(82).111-122.

Информация о статье

поступила в редакцию: 03.04.2024 г.; поступила после рецензирования: 11.04.2024 г.; принята к публикации: 15.04.2024 г.

Improving the energy efficiency of railway transport by using mobile devices of transverse capacitive compensation

K.D. Rubtsov✉, L.I. Zhuiko

Krasnoyarsk Railway Transport Institute, Krasnoyarsk, the Russian Federation

✉kirill.rubtsov.2001@mail.ru

Abstract

The authors of the article propose the use of mobile devices for transverse capacitive compensation of reactive power to improve the energy efficiency of railway transport. The possibility of reducing the existing inter-train intervals of heavy trains along the section of the Achinsk-I–Chernorechenskaya railway of the Achinsk power supply distance is considered when using transverse capacitive compensation of reactive power at the Tarutino sectioning station to increase the available capacity of the railway section under consideration. The calculations were verified in the KORTES software package. The calculation performed in the KORTES software package shows that when using mobile devices for transverse capacitive compensation of reactive power on the Krasnoyarsk Railway, it allows to increase energy efficiency and increase the throughput of the calculated section of the Achinsk power supply distance Achinsk-I–Chernorechenskaya. The use of mobile reactive power compensation devices makes it possible to increase the voltage level on the current collector of electric rolling stock by 1,05–1,33 kV and ensure the movement of freight trains of increased mass (up to 7,100 tons) in an even direction with an inter-train interval of 14 minutes. When the second power transformer is turned on at the Achinsk-I and Chernorechenskaya traction substations, the voltage on the electric rolling stock current collector increases by 2,43–2,65 kV, and the inter-train interval decreases to 8–9 minutes. The authors of the article believe that the results of the calculation can be useful for optimizing the operation of railway systems and increasing their efficiency in general.

Keywords

transverse capacitive compensation, reactive power, track profile, throughput, compensating device, energy efficiency

For citation

Rubtsov K.D. Povyshenie energoeffektivnosti zheleznodorozhnogo transporta putem primeneniya mobil'nykh ustroystv poperechnoi emkostnoi kompensatsii [Improving the energy efficiency of railway transport by using mobile devices of transverse capacitive compensation]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2024, no. 2(82), pp. 111–122. DOI: 10.26731/1813-9108.2024.2(82).111-122.

Article Info

Received: April 3, 2024; Revised: April 11, 2024; Accepted: April 15, 2024.

Введение

Одним из ключевых элементов железнодорожной системы является тяговое электроснабжение, которое во многом влияет на пропускную способность и надежность железнодорожного транспорта. Чтобы повысить эффективность работы и объемы перевозок, ОАО «РЖД» ставит перед собой стратегическую задачу увеличения массы и длины грузовых поездов. Однако это угрожает работе существующей системы тягового электроснабжения (СТЭ), которая была создана в 1950–1980 гг. для перевозок поездов весом до 4,5 тыс. т. Кроме того, существующая СТЭ Красноярской железной дороги работает в особом нагруженном режиме, что проявляется при увеличении грузопотока в Восточном направлении [1].

Для усиления системы тягового электроснабжения сравнительно малыми затратами используются установка поперечной емкостной компенсации реактивной мощности на постах секционирования (ПС) или на тяговых подстанциях (ТП). Они компенсируют реактивную мощность в тяговой сети (ТС) и повышают напряжение на токоприемнике электроподвижного состава (ЭПС), что повышает пропускную способность. На Красноярской железной дороге одним из наиболее сложных участков является перегон Ачинск-I – Чернореченская из-за его гористого профиля и затяжного подъема по второму пути.

Мобильные (передвижные) установки компенсации реактивной мощности являются альтернативой аналогичным стационарным установкам. Их использование имеет ряд преимуществ, потому что они могут применяться на всем участке железной дороги, что делает их более универсальными. Мобильные установки могут использоваться в качестве основных, где нет устройств компенсации, либо оказывать дополнительную компенсацию реактивной мощности во время путевых работ [2].

На расчетном железнодорожном участке Ачинской дистанции электроснабжения Ачинск-I – Чернореченская при существующем оборудовании тягового электроснабжения системы 25 кВ организовано движение 100 пар тяжеловесных поездов с наибольшей массой поезда в четном направлении – 7 100 т (с поездами в пакете 6 300 т), интервалом движения 15 мин. и в нечетном направлении – 4 000 т, с интервалом движения 12 мин.

Целью данной статьи является рассмотрение возможности применения мобильных (передвижных) устройств поперечной емкостной компенсации реактивной мощности в границах Ачинской дистанции электроснабжения.

В данной научной статье предлагается уменьшение межпоездных интервалов движения в четном направлении с 15 мин. до 8 за счет применения поперечной (параллельной) компенсации реактивной мощности (КУ) на ПС для поддержания минимально допустимого уровня напряжения в 21 кВ. Это позволит повысить провозную способность рассматриваемого участка железной дороги, что, в свою очередь, увеличит грузооборот. Также предлагается за счет установки поперечной компенсации реактивной мощности повысить энергоэффективность рассматриваемого участка Ачинской дистанции электроснабжения.

Расчет основных показателей в программном комплексе «КОРТЭС»

Расчеты были проведены в программном комплексе «КОРТЭС» при использовании пакетов для расчета различных режимов работы и определения наличной пропускной способности системы тягового электроснабжения переменного тока 25 кВ, который предназначен для решения различных расчетных задач, связанных с выбором параметров, определением характеристик режимов и нагрузочной способности СТЭ и их отдельных элементов [3].

На рис. 1 изображен профиль пути расчетного участка Ачинск-I – Чернореченская. Схема анализируемого участка представлена на рис. 2.

Расчетный участок имеет двухстороннюю параллельную схему питания контактной сети (КС) и включает в себя одну межподстанционную зону (МПЗ) между двумя ТП Ачинск-I и ТП Чернореченская, на которой установлен ПС Тарутино и пункт параллельного соединения (ППС) Салырка. Расчетные значения наименьшего напряжения при исходной схеме представлены в табл. 1. В ней обозначены наименьшие напряжения в данное время и через 3 мин.

Питание тяговой нагрузки осуществляется от двух трансформаторов типа ТДТНЖ-40000/100-У1 ($u_{кз} = 10,2\%$, $S_{ном.тр.} = 40$ МВА). Первый предусмотрен для работы на тяговую нагрузку, а второй – резервный – включается в особо тяжелых режимах работы. Районная нагрузка трансформаторов отсутствует. $S_{кз}$ Ачинск = 3 030 МВА, $S_{кз}$ Черн. = 1 497 МВА.

Входное индуктивное сопротивление системы внешнего электроснабжения (СВЭ), приведенное к сборным шинам распределительного устройства (РУ) напряжением 27,5 кВ относительно точки наименьшего напряжения $U_{мин}$, определяется в результате расчета тока короткого замыкания (КЗ) на шинах ПС по формуле (1), Ом [4]:

$$X'_{вх} = \frac{U_{xx}}{I_{кз мин}} \cdot \sin \varphi, \quad (1)$$

где U_{xx} – напряжение холостого хода на сборных шинах ТП – 27,5 кВ; $I_{кз мин}$ – ток КЗ в ординате с $U_{мин}$ на токоприемнике ЭПС – 5,2 кА; φ – угол между U_{xx} и $I_{кз мин}$. –75,3°.

Значение входного индуктивного сопротивления СВЭ и СТЭ относительно точки с $U_{мин}$ составило 5,1 Ом.

Необходимая мощность КУ определяется по формуле (2), МВАр [5]:

$$Q_{КУ} = \frac{U^2 \cdot (U_{мин. норм.} - U_{мин. факт.})}{U_{мин. норм.} \cdot X'_{вх}}, \quad (2)$$

где $U_{мин. норм.}$ – минимальное нормированное напряжение в КС, принимаемое 21 кВ.

По результатам вычислений расчетная мощность КУ составила 9,32 МВАр.

Проверка неперевышения напряжения в КС в период малого электропотребления производится при ограничении максимального напряжения в 29 кВ, принимаем минимально допустимое 21 кВ и номинальное напряжение на шинах ТП 27,5 кВ, а также фактическое напряжение 19,68 кВ [2]: $21 - 19,68 \leq 29 - 27,5$ или $1,32 < 1,5$ – условие выполняется.

Так как точка наименьшего напряжения отличается от точки ПС более чем на 2 км, то мощность КУ, полученную по формуле (2), требуется откорректировать [5] по формуле (3):

$$Q'_{КУ} = Q_{КУ} \left[1 + \frac{k_1 \cdot (L - L_k) \cdot X_{т.с.}}{k_1 \cdot L \cdot X_{т.с.} + 2 \cdot (k_1 + k_2) \cdot (X_c + X_{тр})} \right], \quad (3)$$

где L – расстояние от ПС до ТП, где находится точка $U_{мин}$ – 22 км; L_k – расстояние от точки $U_{мин}$ до ближайшей ТП – 19,6 км; X_c – входное индуктивное сопротивление (ИС) СВЭ – 0,55 Ом; $X_{тр}$ – ИС трансформаторов ТП, ближайших к точке $U_{мин}$, – 1,93 Ом; $X_{т.с.}$ – удельное ИС ТС одного пути участка с $U_{мин}$ – 0,222 Ом/км; k_1 – коэффициент токораспределения присоединения КС ПС, питающего путь с точкой $U_{мин}$ – 0,24; k_2 – коэффициент токораспределения остальных присоединений ПС, питающих участки, до ординаты ТП, ближайшей к точке $U_{мин}$ – 0,20. При этом:

$$X_c = \frac{U_{ном.}^2}{S_{кз}}; \quad X_{тр} = \frac{u_{кз} \cdot U_{ном.}}{S_{кз}}; \quad k_1 = \frac{I_{кз.с2}}{I_{кз.пс}};$$

$$k_2 = \frac{I_{кз.с5}}{I_{кз.пс}}.$$

Расчет коэффициентов распределения осуществляется на определении токов КЗ присо-

Таблица 1. Наименьшие напряжения без применения компенсирующих устройств реактивной мощности
Table 1. The lowest voltages without the use of reactive power compensating devices

Участок Section	Путь Track	Напряжение, кВ Voltage, kV	
		$U_{мин}$	$U_{t=3 мин}$
Ачинск-I – Чернореченская Achinsk-I-Chernorechenskaya	1-й	19,91	19,99
	2-й	19,68	19,75

единений ПС. $I_{кз\text{ п.с.}} = 5\,423\text{ А}$ – модуль тока КЗ ПС. $I_{кз\text{ С2}} = 1\,299\text{ А}$ – ток присоединения С2. $I_{кз\text{ С5}} = 1\,061\text{ А}$ – ток смежного присоединения С4.

В результате расчетов мощность КУ с учетом корректировки, связанной с отличием точки наименьшего напряжения от точки ПС, принимается равной 9,68 МВАр.

Мощность КУ округляем до стандартных значений мощности промышленных КУ. К установке принимаем КУ с номинальной суммарной мощностью 11,5 МВАр, состоящей из двух блоков по 6,9 МВАр и 4,6 МВАр [6].

Результаты расчета наименьшего напряжения на участке с установленной КУ представлены в табл. 2.

Из табл. 2 можно сделать вывод, что использование КУ на ПС повышает напряжение в КС на всем протяжении участка МПЗ. На ТП напряжение повышается на величину $\Delta U'$ в результате увеличения напряжения на шинах ТП, а на ПС на $\Delta U''$ в результате повышения на ИС ТС [7].

Таким образом, из мероприятий по усилению СТЭ на участке Ачинск-I – Чернореченская к реализации можно предложить три варианта:

- применение на ПС Тарутино мобильной (передвижной) нерегулируемой КУ (НКУ) с размещением на двух железнодорожных платформах/автомобильных прицепах;
- применение на ПС Тарутино мобильной

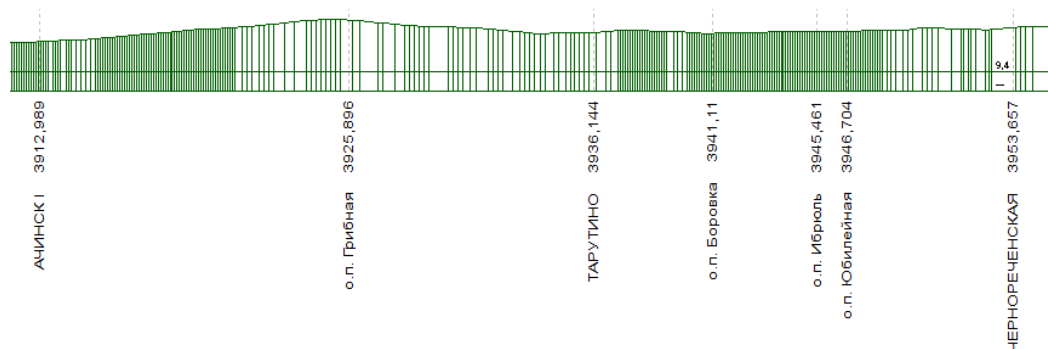


Рис. 1. Профиль пути Ачинск-I – Чернореченская
Fig. 1. Profile of the Achinsk-I – Chernorechenskaya route

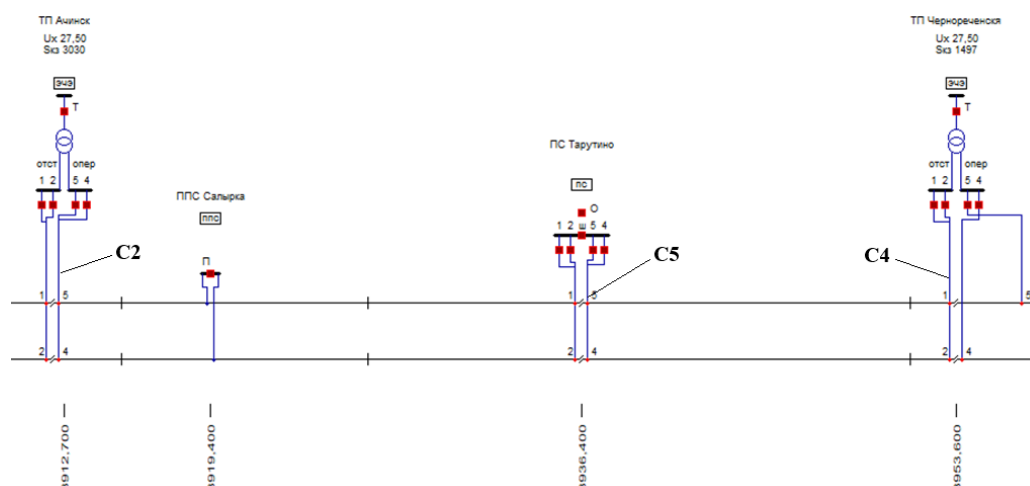


Рис. 2. Схема участка Ачинск-I – Чернореченская
Fig. 2. Diagram of the Achinsk-I – Chernorechenskaya section

Таблица 2. Наименьшие напряжения с применением компенсирующих устройств реактивной мощности
Table 2. The lowest voltages using reactive power compensating devices

Участок Section	Путь Track	Напряжение, кВ Voltage, kV	
		U_{\min}	$U_{t=3\text{ мин}}$
Ачинск-I – Чернореченская Achinsk-I – Chernorechenskaya route	1-й	21,43	21,54
	2-й	21,22	21,31

(передвижной) КУ с двухступенчатым регулированием (РКУ) с размещением на двух железнодорожных платформах/автомобильных прицепах;

– включение в параллельную работу на тяговую нагрузку второго трансформатора на ТП Ачинск-1 и ТП Чернореченская.

Одним из способов снижения потерь электрической энергии в ТС является снижение потребления реактивной мощности потребителями [8].

Реактивная мощность в установках переменного тока загружает обмотки машин, трансформаторов, провода линии. Кроме того, реактивный ток, протекая по элементам системы энергоснабжения, обладающей реактивным сопротивлением, вызывает дополнительную потерю напряжения на зажимах потребителя.

Наиболее распространенным способом уменьшения реактивной мощности служит ее компенсация, КУ способствуют улучшению показателей качества электроэнергии, улучшают режим напряжения в ТС, снижают несимметрию токов и напряжений [9–12].

Кроме того, КУ в СТЭ железных дорог решают многие задачи, среди которых:

– повышение пропускной способности железных дорог;

– снижение потерь электрической энергии;

– повышение эффективности работы электрического оборудования.

Для участка железной дороги Ачинск-1 – Чернореченская предлагается использование мобильной НКУ с номинальной установленной мощностью 12 МВАр и полезной мощностью равной 9077-9180-9287-9395 кВАр (в зависимости от частоты настройки реактора, который настроен на фильтрацию третьей гармоники). Данная установка отличается простотой схемы исполнения, низкими капитальными вложениями на разработку и внедрение, меньшими габаритами и массой (по сравнению с РКУ). Однако НКУ имеет существенный недостаток: невозможность регулирования мощности компенсации реактивной мощности в широких пределах, что особенно важно при постоянно изменяющейся тяговой нагрузке. Данный недостаток выражается в необходимости полного отключения установки во время отсутствия нагрузки в сети для предотвращения повышения напряжения сверхдопустимого значения, что, в свою очередь, значительно снижает срок эксплуатации коммутационного оборудования (а именно, вакуумных выключателей).

Для защиты установки от переходных процессов, при которых наблюдаются броски тока и напряжения, предлагается использование схемы с двухэтапным пуском (рис. 3).

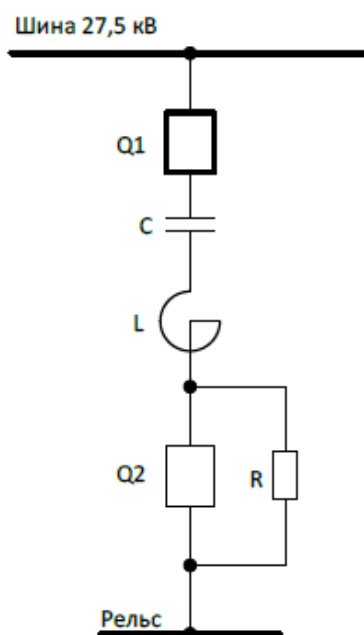


Рис. 3. Принципиальная схема нерегулируемой установки компенсации реактивной мощности
Fig. 3. Schematic diagram of an unregulated reactive power compensation unit

Использование вакуумных выключателей позволяет решить проблему перенапряжений при отключении КУ. Однако перенапряжения, которые возникают при включении КУ, способны значительным образом влиять на надежную работу установки. Предлагаемая схема двухэтапного запуска способна ограничить перенапряжения до допустимых значений, а именно до $1,2U_{ном}$ при использовании вакуумных выключателей и оптимальных значениях демпфирующего резистора.

Для снижения капитальных вложений, массы и габаритов установки предлагается в качестве второго выключателя использование выключателя на 10 кВ. Применение этого оборудования объясняется тем, что данный выключатель шунтирует демпфирующий резистор и не является основным. Такое оборудование соответствует всем требованиям, предъявляемым к проверке выключателей. Также данный выключатель будет дополнительно изолирован через опорные изоляторы, рассчитанные на напряжение 35 кВ, на которые будет устанавливаться ячейка 10 кВ, содержащая в себе выключатель и трансформатор тока. Так как все требования к выбору и проверке оборудования соблюдены, полагаем данный вариант приемлемым к исполнению.

Вторым вариантом, который может быть применен на участке Ачинск-1 – Чернореченская – это использование РКУ, который состоит

из отдельных параллельно включенных секций, включаемых в зависимости от нагрузки в сети (является наиболее эффективным, так как мощность таких КУ можно подбирать в зависимости от постоянно изменяющейся тяговой нагрузки).

Для рассматриваемого участка предлагается использование КУ с двухступенчатым регулированием. Первая секция КУ с полезной мощностью 8 МВАр настроена на частоту третьей гармоники, вторая секция с мощностью 3,6 МВАр – на частоту пятой гармоники. При включении двух ступеней можно добиться суммарной полезной мощности установки 11,6 МВАр при одновременной фильтрации КУ третьей и пятой гармоник. Возможно также отдельное использование секций, поэтому формируются следующие три ступени мощности: 3,6, 8 и 11,6 МВАр.

Для двухступенчатой КУ были использованы конденсаторы типа КЭП2 – 1,05 – 150 – 2У1, реакторы ФРОС – 27,5 – 42/52 и ФРОС – 27,5 – 29/33. Первая секция установки имеет установленную мощность 9 000 кВАр, полезную мощность в 7 790 – 7 867 – 7 945 – 8 051 кВАр в зависимости от частоты настройки реактора, который настроен на фильтрацию третьей гармоники. Вторая секция настроена на фильтрацию пятой гармоники и имеет установленную мощность 4 500 кВАр при значениях полезной мощности приблизительно 3 600 кВАр в зави-

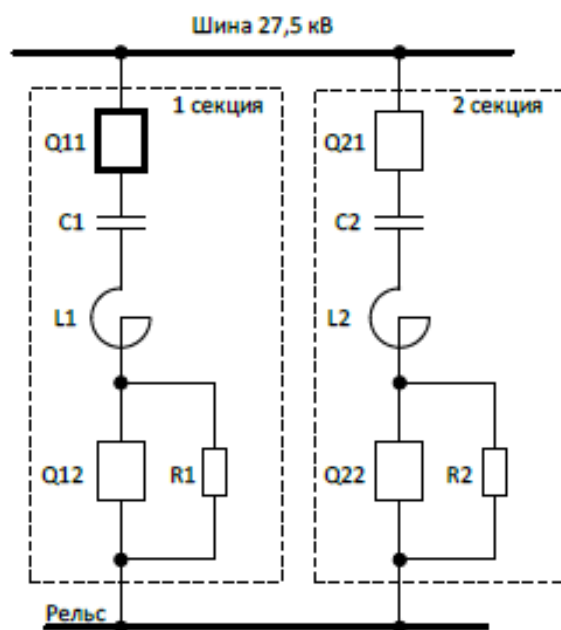


Рис. 4. Принципиальная схема регулируемой установки компенсации реактивной мощности
Fig. 4. Schematic diagram of an adjustable reactive power compensation unit

симости от частоты резонанса. Принципиальная схема РКУ изображена на рис. 4.

Главным достоинством РКУ является ее способность подстраиваться под изменяющуюся нагрузку и эффективно использовать мощность для компенсации реактивной энергии. Однако данные установки отличаются высокой стоимостью, массой и сложностью проектирования [13]. Также в таких установках важнейшей проблемой является вопрос перенапряжений при коммутациях, которые происходят значительно чаще, чем в НКУ [14].

Расчет нагрузок и пропускной способности участка Ачинск-I – Чернореченская

Для дальнейшего анализа проводится расчет нагрузок и пропускной способности участка Ачинск-I – Чернореченская. Расчет выполнен на основе моделируемого профиля пути расчетного участка, созданный по исходным данным участка (см. рис. 1). В результате тягового расчета были созданы типовые составы массами 4 000 и 7 100 т. Расчет был проведен для различных вариантов исходной схемы питания участка (см. рис. 2).

В настоящее время на расчетном участке применяются межпоездные интервалы равные 15 мин. для поездов массой 7 100 т в четном направлении и 12 мин. для поездов массой 4 000 т в нечетном направлении. Именно по этим данным строится график движения поездов в программном комплексе «КОРТЭС» (программный пакет «KGravDv») и проверяется пропускная способность, а также основные характеристики рабочего режима участка для по-

ездов различной массы, которые представлены в таблицах ниже.

Уровень напряжения на расчетном участке Ачинск-I – Чернореченская представлен в табл. 3.

Согласно приведенным данным (табл. 3) повышение уровня напряжения при использовании НКУ составляет примерно 1 кВ, при использовании РКУ – 1,24 кВ, для двух трансформаторов – 1,53 кВ, для двух трансформаторов с использованием НКУ и РКУ – 2,39 и 2,58 кВ соответственно.

По данным из табл. 4 можно сделать вывод об эффективности применения устройств поперечной компенсации реактивной мощности, так как доля суммарной скомпенсированной реактивной энергии для установки НКУ составляет 21 %, а для РКУ – 26 %, что в свою очередь благоприятно влияет на коэффициент мощности. Также при использовании КУ достигается более благоприятный режим работы трансформаторов за счет снижения коэффициента перегрузки, температуры обмоток трансформатора и трансформаторного масла, что увеличивает его срок эксплуатации.

В табл. 5 представлен расчет расхода электрической энергии ТП на выбранном участке Ачинск-I – Чернореченская исходной схемы, а также всех предложенных вариантов. По данной таблице можно определить, при какой схеме будет наименьший расход электрической энергии.

Таким образом, можно сделать вывод, что при применении РКУ 11,6 МВАр расход электрической энергии является самым

Таблица 3. Уровень напряжения на расчетном участке Ачинск-I – Чернореченская
Table 3. Voltage level in the Achinsk-I – Chernorechenskaya railway section

Способ усиления Boost method	Путь Track	Напряжение, кВ Voltage, kV	
		U_{\min}	$U_{t=3 \text{ мин}}$
Исходная схема Initial scheme	1-й	20,72	20,86
	2-й	20,45	20,55
НКУ 9,3 МВАр	1-й	21,61	21,76
	2-й	21,51	21,60
РКУ 11,6 МВАр	1-й	21,85	22,00
	2-й	21,79	21,88
Два трансформатора Two transformers	1-й	22,17	22,33
	2-й	22,02	22,13
НКУ 9,3 МВАр + Два трансформатора	1-й	23,05	23,20
	2-й	22,85	22,98
РКУ 11,6 МВАр + Два трансформатора	1-й	23,26	23,37
	2-й	23,08	23,20

наименьшим (по сравнению с другими возможными вариантами).

Оценка пропускной способности участка

В СТЭ определяющими факторами для оценки пропускной способности и планирования мероприятий по усилению существующих технических средств являются масса поезда, количество поездов, характер их прохождения,

а также межпоездной интервал [15–18]. СТЭ должна иметь соответствующую грузоподъемность на участках движения большегрузных поездов. При прохождении поездов с массой более 6 000 т токовая нагрузка в системе значительно возрастает и, как следствие, происходит более интенсивный нагрев оборудования, снижается уровень напряжения в КС и увеличиваются потери мощности [19, 20].

Таблица 4. Расход активной, реактивной мощности, коэффициент реактивной мощности на ТП Ачинск-I, ТП Чернореченская и на межподстанционной зоне

Table 4. Consumption of active, reactive power, reactive power coefficient at the Achinsk-I TP, Chernorechenskaya TP and at the inter-substation zone

Способ усиления Boost method	Тяговая подстанция Traction substation	Расход электроэнергии Power consumption			tgφ	cosφ	$k_{пер}$	Температура, °C Temperature, °C	
		Активной, кВт · ч Active, kVt-h	Реактивной, кВАр · ч Reactive kvar-h	обмоток of wind- ings				масла of oil	
Исходная схема Initial scheme	Ачинск-I	219 296	263 164	0,625	0,64	1,20	121	96	
	Чернореченская	275 603	366 141	0,871	0,6	1,62	137	106	
	Межподстанционная зона	494 899	800 593	1,62	0,53	–	–	–	
НКУ 9,3 МВАр	Ачинск-I	229 811	189 859	0,83	0,77	1,09	100	82	
	Чернореченская	281 364	260 725	0,93	0,73	1,50	114	91	
	Межподстанционная зона	511 175	681 414	1,33	0,60	–	–	–	
РКУ 11,6 МВАр	Ачинск-I	232 765	169 959	0,73	0,81	1,06	98	80	
	Чернореченская	283 085	232 321	0,82	0,77	1,46	110	87	
	Межподстанционная зона	515 850	654 164	1,27	0,62	–	–	–	
Два трансформатора Two transformers	Ачинск-I	225 419	270 013	1,20	0,64	0,59	71	65	
	Чернореченская	294 814	390 940	1,33	0,60	0,92	85	74	
	Межподстанционная зона	520 233	841 131	1,62	0,53	–	–	–	
НКУ 9,3 МВАр + два трансформатора	Ачинск-I	235 660	195 408	0,83	0,77	0,53	69	65	
	Чернореченская	293 527	270 704	0,92	0,74	0,83	77	69	
	Межподстанционная зона	529 187	705 194	1,33	0,60	–	–	–	
РКУ 11,6 МВАр + два трансформатора	Ачинск-I	238 618	175 685	0,74	0,81	0,52	69	65	
	Чернореченская	293 532	239 347	0,82	0,78	0,81	76	67	
	Межподстанционная зона	532 150	674 859	1,27	0,62	–	–	–	

Таблица 5. Расход электрической энергии ТП на расчетном участке Ачинск-I – Чернореченская

Table 5. The consumption of electrical energy of the TP in the settlement section Achinsk-I – Chernorechenskaya

Расход электроэнергии Power consumption	Исходная схема Initial scheme	НКУ 9,3 МВАр	РКУ 11,6 МВАр	Два трансформатора Two transformers	НКУ 9,3 МВАр + два трансформатора	РКУ 11,6 МВАр + два трансформатора
Активная, кВт · ч Active, kVt-h	9 157 000	940 884	948 497	1 025 111	1 045 751	1 051 782
Реактивная, кВАр · ч Reactive kvar-h	10 777 000	921 541	882 346	1 196 280	1 023 410	979 167

Производим расчет наличной пропускной способности грузовых поездов для расчетной схемы участка Ачинск-I – Чернореченская до усиления СТЭ и предлагаемыми вариантами усиления. Результаты расчетов сводим в табл. 6.

В табл. 7 в программном комплексе «КОРТЭС» рассчитаны минимальные допустимые интервалы при пропуске поездов повышенной массы на расчетном участке Ачинск-I –

Чернореченская. Можно увидеть, какой аспект влияет на большой интервал на расчетном участке дороги.

Согласно приведенным данным (см. табл. 7) расчетных межпоездных интервалов можно сделать вывод, что на рассматриваемом участке ограничивающим параметром пропускной способности перегона является мощность понижающего трансформатора, следовательно,

Таблица 6. Наличная суточная пропускная способность при пропуске поездов повышенной массы для нечетного и четного направлений расчетного участка Ачинск-I – Чернореченская

Table 6. Available daily capacity for passing high-mass trains for odd and even directions of the settlement section Achinsk-I – Chernorechenskaya

Межподстанционная зона Intersubstation zone	Наличная суточная пропускная способность, ограниченная Available daily capacity, limited			Итоговый Final
	Понижительный трансформатор Step-down transformer	Напряжение, кВ Voltage, kV	Нагрев проводов контактной сети Heating of of the contact network wires	
До усиления Previous to boost	60/56	74/69	159/150	60/56
НКУ 9,3 МВАр	68/64	87/82	159/150	68/64
РКУ 11,6 МВАр	70/66	87/82	159/150	70/66
Два трансформатора Two transformers	106/100	106/100	159/150	106/100
НКУ 9,3 МВАр + два трансформатора	120/112	106/100	159/150	106/100
РКУ 11,6 МВАр + два трансформатора	120/112	120/112	159/150	120/112

Таблица 7. Минимальные допустимые интервалы при пропуске поездов повышенной массы на расчетном участке Ачинск-I – Чернореченская

Table 7. Minimum allowable intervals for passing heavy trains on the calculated section Achinsk-I – Chernorechenskaya

Наименование межподстанционной зоны Name of substation zone	Значение интервала (мин), ограниченное Interval value (min), limited			Результирующее значение Resulting value
	Мощностью понижительного трансформатора By power of step-down transformer	Напряжением в контактной сети By voltage in contact network	Нагревом проводов контактной сети By heating of contact network wires	
До усиления Previous to boosting	16	13	6	16
НКУ 9,3 МВАр	14	11	6	14
РКУ 11,6 МВАр	14	11	6	14
Два трансформатора Two transformers	9	9	6	9
НКУ 9,3 МВАр + два трансформатора	8	9	6	9
РКУ 11,6 МВАр + два трансформатора	8	8	6	8

при включении второго силового трансформатора в параллельную нагрузку на каждой из ТП наблюдается рост пропускной способности, который значительно повлияет на экономический эффект от прироста грузооборота (будет рассчитан в дальнейшем).

Проанализировав таблицы, можно сделать вывод, что по результатам расчета наличная суточная пропускная способность грузовых поездов от усиления составила 60 пар поездов в сутки в нечетном направлении и 56 пар поездов в четном. Расчетный межпоездный интервал составляет 16 мин.

Также можно указать, что мероприятия по усилению СТЭ участка Ачинск-1 – Чернореченская обеспечили пропуск поездов с межпоездным интервалом 8 мин. В результате усиления и сокращения интервалов возросла наличная суточная пропускная способность грузовых поездов повышенной массы – 120 пар поездов в нечетном направлении и 112 пар в четном.

Заключение

Таким образом, в результате расчетов в программном комплексе «КОРТЭС» по поддержанию минимально допустимого уровня напряжения на токоприемниках ЭПС на участке Ачинск-1 – Чернореченская при проследовании тяжеловесных поездов с заданным графиком движения не ниже 21 кВ необходима установка КУ номинальной мощностью 11,5 МВАр на ПС Тарутино. Данное усиление устройств тягового электроснабжения позволит осуществить пропуск пакетов тяжеловесных поездов заданной массы с минимальным межпоездным интервалом для четного направления 12 мин., нечетного – 10 мин. Дальнейшее усиление расчетного участка возможно при помощи установки поперечной компенсации реактивной мощности с мощностью не менее 9,6 МВАр, установки КУ с мощностью не менее 4,6 МВАр на ТП Ачинск-1, а также за счет включения в параллельную работу второго трансформатора на ТП Ачинск-1 и ТП Чернореченская.

В научной статье была проанализирована возможность установки устройств поперечной компенсации реактивной мощности на основе железнодорожных платформ. Было предложено два варианта установки компенсации:

– нерегулируемая установка поперечной компенсации с номинальной установленной мощностью 12 МВАр, выполненная на базе двух железнодорожных платформ;

– установка поперечной компенсации с двухступенчатым регулированием и номинальной суммарной установленной мощностью двух секций 13,5 МВАр, также выполненная на базе двух железнодорожных платформ.

Для расчета пропускной способности для различных схем усиления расчетного участка с применением передвижных устройств компенсации использовался программный комплекс «КОРТЭС». Также был проведен расчет уровня напряжения, который обеспечивает применение различных методов усиления на расчетном участке Ачинск-1 – Чернореченская.

Применение передвижных устройств компенсации реактивной мощности позволяет повысить уровень напряжения на токоприемнике электроподвижного состава на 1,05–1,33 кВ и обеспечить движение грузовых поездов повышенной массы (до 7 100 т) в четном направлении при межпоездном интервале 14 мин. При включении второго силового трансформатора на тяговых подстанциях Ачинск-1 и Чернореченская напряжение на токоприемнике ЭПС повышается на 2,43–2,65 кВ, а межпоездный интервал уменьшается до 8–9 мин.

Мобильные устройства поперечной емкостной компенсации реактивной мощности являются альтернативой аналогичным стационарным установкам. Их применение имеет ряд преимуществ, так как они могут быть использованы на всем участке железной дороги, что делает их более универсальными. Передвижные установки могут задействоваться в качестве основных, где нет устройств компенсации, либо оказывать дополнительную компенсацию реактивной мощности во время путевых работ.

Список литературы

1. Герман Л.А., Серебряков А.С. Регулируемые установки емкостной компенсации в системах тягового электроснабжения железных дорог. М. : УМЦ ЖДТ, 2015. 316 с.
2. СТО РЖД 07.022.2–2015. Система тягового электроснабжения железной дороги переменного тока. Методика выбора мест размещения и мощности средств продольной и поперечной компенсации реактивной мощности. Введ. 2016–01–01. Доступ из справ.-прав. системы КонсультантПлюс в локал. сети.

3. Рубцов К.Д., Чинков П.О. Применение продольной и поперечной компенсации на станции Минино // Молодежная наука : тр. XXVI Всерос. студен. науч.-практ. конф. Красноярск, 2022. Т. 1. С. 138–141.
4. Общие методы выбора параметров и оценки эффективности применения устройств компенсации реактивной мощности в тяговой сети переменного тока : утв. совещанием Комиссии ОСЖД по инфраструктуре и подвижному составу 27–30 октября 2015. URL : <https://osjd.org/api/media/resources/9705> (Дата обращения 29.03.2024).
5. Безопасность жизнедеятельности в условиях производства. Расчеты / Т.А. Бойко, Е.Б. Воробьев, Ж.Б. Ворожбитова и др. Ростов-на-Дону : РГУПС, 2007. 127 с.
6. Герман Л.А., Серебряков А.С. Снижение потерь электроэнергии при помощи установок компенсации реактивной мощности на посту секционирования тяговой сети переменного тока // Вестник ВНИИЖТ. 2019. Т. 78. № 5. С. 297–302.
7. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии. Руководство для практических расчетов. М. : ЭНАС, 2009. 456 с.
8. Карта технологического процесса № 2/23. Устройство компенсации реактивной мощности УКРМ-27,5 кВ. Текущий ремонт : утв. расп. Трансэнерго – филиал ОАО «РЖД» №ТЭ-72/р от 10.04.2023 // Сборник карт технологических процессов на работы по содержанию тяговых подстанций, трансформаторных подстанций и линейных устройств системы тягового электроснабжения. Кн. I. М. : ОАО «РЖД», 2021. 622 с.
9. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М. : Альянс, 2019. 528 с.
10. Бурман А.П., Розанов Ю.К., Шакарян Ю.Г. Управление потоками электроэнергии и повышение эффективности электроэнергетических систем. М. : МЭИ, 2012. 335 с.
11. Инструкция по монтажу стационарных аккумуляторных батарей и конденсаторных установок : утв. тех. директором Концерна «Электромонтаж» от 29.05.1992. Введ. 1993–01–01. URL : <https://energoboard.ru/information/171/> (Дата обращения 28.03.2024).
12. Правила техники безопасности при электромонтажных и наладочных работах / Ю.А. Войлошников, Б.М. Дидух, А.С. Дружинин и др. М. : Энергоатомиздат, 1992. 192 с.
13. Саитбаталова Р.С., Ившин И.В. Некоторые вопросы компенсации реактивной мощности в системе электроснабжения промышленного предприятия // Изв. высш. учеб. заведений. Проблемы энергетики. 2012. № 1–2. С. 77–81.
14. Бородулин Б.М., Герман Л.А., Николаев Г.А. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог. М. : Транспорт, 1983. 183 с.
15. Луковенко А.С., Туйгунова А.Г. Методы повышения надежности и качества электроэнергии тяговых подстанций с применением компьютерных технологий. М. : Русайнс, 2018. 98 с.
16. Кабышев А.В. Компенсация реактивной мощности в электроустановках промышленных предприятий. Томск : ТПУ, 2012. 234 с.
17. Тер-Оганов Э.В., Пышкин А.А. Электроснабжение железных дорог. Екатеринбург : УрГУПС, 2014. 431 с.
18. Поперечно-емкостная компенсация // Studfiles : сайт. URL: <https://studfile.net/preview/7312126/page/6/> (Дата обращения 01.04.2024).
19. Продольная и поперечная компенсация реактивной мощности // Мегавар : сайт. URL : <https://megavarm.ru/articles/prodolnaya-i-poperechnaya-kompensatsiya-reaktivnoy-moshchnosti.html> (Дата обращения 01.04.2024).
20. Компенсация реактивной мощности // «Хомов электро» : сайт. URL: <https://khomovelectro.ru/articles/kompensatsiya-reaktivnoy-moshchnosti.html> (Дата обращения 01.04.2024).

References

1. German L.A., Serebryakov A.S. Reguliruemye ustanovki emkostnoi kompensatsii v sistemakh tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznykh dorog [Adjustable capacitive compensation installations in railway traction power supply systems]. Moscow: UMTS ZhDT Publ., 2015. 316 p.
2. STO RZhD 07.022.2–2015. Sistema tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznoi dorogi peremennogo toka. Metodika vybora mest razme-shcheniya i moshchnosti sredstv prodol'noi i poperechnoi kompensatsii reaktivnoi moshchnosti [Standard of JSC «Russian Railways» 07.022.2–2015. The traction power supply system of the AC railway. The method of selecting the locations and power of the means of longitudinal and transverse reactive power compensation].
3. Rubtsov K.D., Chinkov P.O. Primenenie prodol'noi i poperechnoi kompensatsii na stantsii Minino [Application of longitudinal and transverse compensation at the Minino station]. *Trudy XXVI Vserossiiskoi studencheskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Molodezhnaya nauka»* [Proceedings of the XXVI All-Russian Student Scientific and Practical Conference «Youth science»]. Krasnoyarsk, 2022, Vol. 1, pp. 138–141.
4. Obshchie metody vybora parametrov i otsenki effektivnosti primeneniya ustroystv kompensatsii reaktivnoi moshchnosti v tyagovoi seti peremennogo toka: utv. soveshchaniem Komissii OSZhD po infrastrukture i podvizhnomu sostavu 27–30 oktyabrya 2015 [General methods for selecting parameters and evaluating the effectiveness of reactive power compensation devices in an AC traction network: approved by the meeting of the organization of railway cooperation Commission on Infrastructure and Rolling Stock on October 27–30, 2015]. Available at: <https://osjd.org/api/media/resources/9705> (Accessed March 29, 2024).
5. Boiko T.A., Vorob'ev E.B., Vorozhbitova Zh.B., Kolomiitseva L.I., Kotlyarova E.A., Lobanova M.K., Pavlenko Yu.V., Pereverzev I.G., Finochenko T.A., Kharchenko N.N., Khvostikov A.G. Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti v usloviyakh proizvodstva. Raschety [Life safety in production conditions. Calculations]. Rostov-on-Don: RGUPS Publ., 2007. 127 p.
6. German L.A., Serebryakov A.S. Snizhenie poter' elektroenergii pri pomoshchi ustanovok kompensatsii reaktivnoi moshchnosti na postu seksionirovaniya tyagovoi seti peremennogo toka [Reduction of electricity losses using reactive power compensation units at the AC traction network partitioning station]. *Vestnik VNIIZhT* [Bulletin of the Scientific and Research

Institute of Railway Transport], 2019, Vol. 78, no 5, pp. 297–302.

7. Zhelezko Yu.S. Poteri elektroenergii. Reaktivnaya moshchnost'. Kachestvo elektroenergii. Rukovodstvo dlya prakticheskikh raschetov [Power losses. Reactive power. The quality of electricity. A guide for practical calculations]. Moscow: ENAS Publ., 2009. 456 p.

8. Karta tekhnologicheskogo protsessa № 2/23. Ustroystvo kompensatsii reaktivnoi moshchnosti UKRM-27,5 kV. Tekushchii remont: utv. rasp. Transenergo – filial OAO «RZhD» №TE-72/r ot 10.04.2023 [Process map No 2/23. The reactive power compensation device UKRM-27.5 kV. Current repairs: approved by order Transenergo – branch of JSC «Russian Railways» No TE-72/r dated April 10, 2023]. *Sbornik kart tekhnologicheskikh protsessov na raboty po sodержaniyu tyagovykh podstantsii, transformatornykh podstantsii i lineinykh ustroystv sistemy tyagovogo elektroabzheniya. Kniga 1* [Collection of process maps for work on the maintenance of traction substations, transformer substations and linear devices of the traction power supply system. Book I]. Moscow: OAO «RZhD» Publ., 2021. 622 p.

9. Markvardt K.G. Elektroabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog [Power supply of electrified railways]. Moscow: Al'yans Publ., 2019. 528 p.

10. Burman A.P., Rozanov Yu.K., Shakaryan Yu.G. Upravlenie potokami elektroenergii i povyshenie effektivnosti elektroenergeticheskikh sistem [Electric power flow management and efficiency improvement of electric power grid systems]. Moscow: MEI Publ., 2012. 335 p.

11. Instruktsiya po montazhu statsionarnykh akkumulyatornykh batarei i kondensatornykh ustanovok: utverzhdena tekhnicheskim direktorom Kontserna «Elektromontazh» ot 29.05.1992 [Installation instructions for stationary batteries and capacitor banks: approved by technical Director of the Concern «Elektromontazh» dated May 29, 1992]. Available at: <https://energoboard.ru/information/171/> (Accessed March 28, 2024).

12. Voiloshnikov Yu.A., Didukh B.M., Druzhinin A.S., Zarzhitskii N.I., Ivanov G.I., Kipnis B.M., Kovalev A.P., Landesman E.I., Martynenko V.I., Mostvilikher A.M., Tartakovskii Yu.S., Filatov A.A., Shneiderman N.I. [Safety rules for electrical installation and commissioning]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1992. 192 p.

13. Saitbatalova R.S., Ivshin I.V. Nekotorye voprosy kompensatsii reaktivnoi moshchnosti v sisteme elektroabzheniya promyshlennogo predpriyatiya [Some issues of reactive power compensation in the power supply system of an industrial enterprise]. *Izvestiya vysshykh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki* [News of higher educational organizations. Energy problems], 2012, no 1-2, pp. 77–81.

14. Borodulin B.M., German L.A., Nikolaev G.A. Kondensatornye ustanovki elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog [Condenser installations of electrified railways]. Moscow: Transport, 1983. 183 p.

15. Lukovenko A.S., Tuigunova A.G. Metody povysheniya nadezhnosti i kachestva elektroenergii tyagovykh podstantsii s primeneniem komp'yuternykh tekhnologii [Methods for improving the reliability and quality of electric power of traction substations using computer technologies]. Moscow: Rusains Publ., 2018. 98 p.

16. Kabyshev A.V. Kompensatsiya reaktivnoi moshchnosti v elektroustanovkakh promyshlennykh predpriyatii [Reactive power compensation in electrical installations of industrial enterprises]. Tomsk: TPU Publ., 2012. 234 p.

17. Ter-Oganov E.V., Pyshkin A.A. Elektroabzhenie zheleznykh dorog [Power supply of railways]. Ekaterinburg: UR-GUPS Publ., 2014. 431 p.

18. Poperechno-emkostnaya kompensatsiya (Elektronnyi resurs) [Transverse-capacitive compensation (Electronic Resource)]. Available at: <https://studfile.net/preview/7312126/page:6/> (Accessed April 1, 2024).

19. Prodol'naya i poperechnaya kompensatsiya reaktivnoi moshchnosti (Elektronnyi resurs) [Longitudinal and transverse reactive power compensation (Electronic resource)]. Available at: <https://megavarm.ru/articles/prodolnaya-i-poperechnaya-kompensatsiya-reaktivnoy-moshchnosti.html> (Accessed April 1, 2024).

20. Kompensatsiya reaktivnoi moshchnosti (Elektronnyi resurs) [Reactive power compensation (Electronic Resource)]. Available at: <https://khomovelectro.ru/articles/kompensatsiya-reaktivnoy-moshchnosti.html> (Accessed April 1, 2024).

Информация об авторах

Рубцов Кирилл Дмитриевич, кафедра систем обеспечения движения поездов, Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Красноярск; e-mail: kirill.rubtsov.2001@mail.ru.

Жуйко Леонид Иванович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры систем обеспечения движения поездов, Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Красноярск; e-mail: zhujko49@mail.ru.

Information about the authors

Kirill D. Rubtsov, Department of Train Traffic Support Systems, Krasnoyarsk Institute of Railway Transport – Branch of Irkutsk State Transport University, Krasnoyarsk; e-mail: kirill.rubtsov.2001@mail.ru.

Leonid I. Zhujko, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Train Traffic Support Systems, Krasnoyarsk Institute of Railway Transport – Branch of Irkutsk State Transport University, Krasnoyarsk; e-mail: zhujko49@mail.ru.