



## НЕОБХОДИМОСТЬ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОТРЕБНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОЩНОСТЕЙ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ БАЙКАЛО-АМУРСКОЙ И ТРАНССИБИРСКОЙ МАГИСТРАЛЕЙ

Шушпанов<sup>1</sup> И.Н., Пермякова<sup>2</sup> Д.Н., Конюхов<sup>1</sup> В.Ю., Опарина<sup>1</sup> Т.А.

<sup>1</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия

*PermyakovaD@student.bmstu.ru*

**Резюме:** *ЦЕЛЬ.* Изучить необходимость обеспечения потребных электрических мощностей объектов транспортной инфраструктуры Байкало-Амурской и Транссибирской магистралей сегодня в рамках увеличения перевозочных мощностей железнодорожной транспортной системы в Восточном направлении. В представленной научной работе авторами произведён анализ актуальной проблемы, технических отказов оборудования тяговых подстанций железнодорожной линии. Анализ позволил выявить, что основной причиной отказов оборудования системы тягового электроснабжения является износ оборудования на долю которого приходится около 45%. *МЕТОДЫ.* С целью выявления технически слабых зон на установленном участке железнодорожной линии с учетом пропуска поездов повышенной массы для перспективного развития Байкало-Амурской и Транссибирской магистралей, в рамках прироста грузопотока в восточном направлении при помощи программного комплекса Кортэс выполнены тяговые расчеты. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Полученные расчетные значения при существующих размерах организации движения поездов позволили сделать вывод, что система тягового электроснабжения рассматриваемого участка не позволяет обеспечить необходимый уровень параметров тяговой сети и пропустить плановый поездопоток. Наибольшее количество отказов приходится на оборудование тяговой подстанции №4, что вызывает необходимость замены или модернизации данного оборудования. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* По результатам проведенной работ была определена целесообразность реконструкции тяговых подстанций с учетом перспективного состояния функционирования участка.

**Ключевые слова:** *системы тягового электроснабжения; отказы оборудования; тяговая подстанция; график исполненного движения; параметры нормального режима работы участка.*

**Для цитирования:** Шушпанов И.Н., Пермякова Д.Н., Конюхов В.Ю., Опарина Т.А.. Необходимость обеспечения потребных электрических мощностей объектов транспортной инфраструктуры байкало-амурской и транссибирской магистралей // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 5. С. 59 – 73. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-5-59 – 73.

## THE NEED TO PROVIDE THE REQUIRED ELECTRICAL CAPACITIES OF THE TRANSPORT INFRASTRUCTURE FACILITIES OF THE BAIKAL-AMUR AND TRANS-SIBERIAN HIGHWAYS

Shushpanov<sup>1</sup> I.N., Permyakova<sup>2</sup> D.N., Konyukhov<sup>1</sup> V.Yu., Oparina<sup>1</sup> T.A.

<sup>1</sup> Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

<sup>2</sup> Bauman Moscow State Technical University (National Research University),  
Moscow, Russia

*PermyakovaD@student.bmstu.ru*

**Abstract: THE PURPOSE.** To study the need to provide the required electrical capacities of the transport infrastructure facilities of the Baikal-Amur and Trans-Siberian highways. Today, increasing the transportation capacity of the railway transport system in the Eastern direction is an important transport task. The solution of problems related to the creation of transport infrastructure is inextricably linked with the creation of sources of electric power in the presented scientific work, the authors analyzed the technical failures of the equipment of traction substations of the railway line. This analysis revealed that the main cause of equipment failures of the traction power supply system is equipment wear. It accounts for about 45% of failures, which is certainly a lot. **METHODS.** In order to identify technically weak zones on the established section of the railway line, taking into account the passage of heavy trains for the prospective development of the Baikal-Amur and Trans-Siberian highways, traction calculations were performed using the Kortex software package as part of the increase in freight traffic in the eastern direction. **RESULTS.** The calculated values obtained with the existing dimensions of the organization of train traffic allowed us to conclude that the traction power supply system of the section in question does not allow to provide the necessary level of traction network parameters and skip the planned train flow. The largest number of failures falls on the equipment of traction substation No. 4, which necessitates the replacement or modernization of this equipment. **CONCLUSION.** The expediency of reconstruction of traction substations is determined, taking into account the prospective state of operation of the site.

**Keywords:** traction power supply systems; equipment failures, traction substation; schedule of executed movement; parameters of the normal operation of the site.

**For citation:** Shushpanov I.N., Permyakova D.N., Konyukhov V.Yu., Oparina T.A. The need to provide the required electrical capacities of the transport infrastructure facilities of the Baikal-Amur and Trans-Siberian highways. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25 (5): 59 – 73. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-5-59-73.

### **Введение (Introduction)**

Целью данной работы является разработка оптимальных условий тягового электроснабжения железного транспорта. Данный вопрос очень актуален, особенно с практической точки зрения. Именно эффективное и своевременное решение задачи обеспечения электрических мощностей будет способствовать ускорению научно-технического прогресса всего народного хозяйства, что безусловно даст возможности к развитию наукоемких производств. Поэтому с научной точки зрения вопрос также весьма актуален. Существующие тяговые объекты железнодорожных линий, в качестве которых чаще всего выступают тяговые подстанции согласно установленной технологии работы обеспечивают электроэнергией одновременно и транспортных и нетранспортных потребителей, географически расположенных в зоне прилегающей к электрифицируемому участку. С этой целью на тяговых подстанциях устанавливают трехобмоточные понижающие трансформаторы, сооружают распределительные устройства на 10 и 35 кВ на опорах контактной сети постоянного тока подвешивают линии продольного электроснабжения 10 кВ, а на участках переменного тока – 27,5 кВ [1-3]. Следует отметить, что устройства электроснабжения и электроподвижной состав способны работать в суровых климатических и географических условиях: при температуре от +45 до –50оС, в зонах вечной мерзлоты, при гололеде с толщиной корки до 35 мм и скорости ветра до 40 м/с [3-4].

### **Литературный обзор (Literature Review)**

Проблемой обеспечения необходимых условий для бесперебойной работы транспортной инфраструктуры в восточных и северных регионах нашей страны занимались многие ученые. Почти все из них пришли к выводу, что подходить к проблеме оснащения инфраструктурных объектов в условиях агрессивного климата нужно комплексно и с особым вниманием. Высокие температуры и суровый, непостоянный климат оказывает негативное воздействие на работу оборудования и объектов в том числе и транспортной инфраструктуры. Часто это воздействие плохо прогнозируемо. В данный

условиях риск аварий и перебоев энергоснабжения многократно возрастает. При этом перебой, возникшие в таком случае, устранить гораздо сложнее. Связано это прежде всего с тем, что логистическая доступность байкало-амурской и транссибирской магистралей не позволяет оперативно доставить комплектующие. Кроме того, то оборудование, которое эффективно работает в умеренном климате, может оказаться совершенно непригодным для работы в северных широтах. Зачастую, понять, как будет функционировать тот или иной агрегат можно уже непосредственно на месте. Вот только часть проблем, возникающих при проектировании и эксплуатации сооружений, служащих для обеспечения потребных электрических мощностей.

Как показывают практические эксперименты большая часть данных проблем может быть решена при помощи грамотного структурирования данных. В свою очередь этого можно добиться, используя математическое или компьютерное моделирование.

Так в работах [5] автор исследует особенности эксплуатации и технического обслуживания железнодорожного полотна в северных широтах. Отдельное внимание в работе уделено визуализации температурных изменений. Для этого автор применяет программу MATLAB. В качестве исходных данных для моделирования были использованы климатические факторы, а также характеристики грунта и особенности рельефа га исследуемом участке. Отдельно учитывались такие параметры как атмосферное давление и высота насыпи. В результате автор доказал, что при строительстве железнодорожного полотна целесообразнее использовать защитный слой из гравия или каменистого грунта. Данные материалы способствуют поддержанию мерзлого состояния земли, а также обеспечивают стабильные физические свойства, что немаловажно в переменном климате.

Также моделирование используют и в работах на стыке энергетики и других наук. Например, в статье [6] показано использование аналитического подхода для выявления взаимосвязи экономики и энергетики, а также взаимосвязи компонентов системы с окружающей средой. Для анализа использовались технологии больших данных. В связи с этим было необходимо достаточно точно подходить к сбору и представлению статистических данных, а также по возможности упрощать их представление. Для этого авторы использовали наглядную визуализацию данных в виде столбчатых диаграмм. Аналогичные подходы использованы также в работах [7-11].

Вместе с тем, даже в такую стандартную операцию как сбор и визуализация данных для моделирования приходят технологии, способные упростить процесс исследования. Основная их цель выполнять автоматическую работу вместо исследователя, давая тем самым ученому время и ресурсы для непосредственно анализа полученных результатов [8].

В статье [9] для сбора данных и последующего моделирования системы используют машинное обучение. Результаты визуализируются при помощи графиков. Результаты процесса обучения также представлены в удобной графической форме. Данное решение не только более понятно визуально, но и необходимо для оптимизации последующих экспериментов и удобно при поиске ошибок.

Литературный обзор и подготовка рукописи публикации были выполнены Д.Н. Пермяковой. В данной статье представлены результаты моделирования, выполненного И.Н. Шушпановым. Разработкой методики занимался В.Ю. Конюхов. Проанализировала результаты Т.А. Опарина.

#### ***Материалы и методы (Materials and methods)***

Тяговой расчет железнодорожной линии проводился в программном комплексе Кортэс.

Прямая зависимость интенсивности движения и потребления энергии из тяговой сети определяет минимальный интервал между поездами. Использование математической среды «Кортэс» и внесение данных существующего графика движения поездов позволило оценить работу используемых устройств системы тягового энергоснабжения. Исходными данными для выполнения расчетов явились установленные для рассматриваемого участка весовые нормы, используемые серии локомотивов, график движения поездов. Вариация межпоездного интервала позволила обосновать комплекс мер, направленных на усиление конкретного участка.

В таблице 1 приведена статистика отказов оборудования тягового электроснабжения железнодорожной линии *NI* за период 2016-2020 годы.

Таблица 1

Table 1

Статистика по отказам оборудования тяговых подстанций установленной железнодорожной линии  
*Statistics on equipment failures of traction substations of an installed railway line*

Наименование тяговой подстанции железнодорожной линии <i>NI</i>	Место повреждения	Вид повреждения	Причина повреждения	Классификация повреждений
1	2	3	4	5
Повреждения за 2016 год				
Тяговая подстанция №1	Ввод ВМ-10 Т-1 фазы «А»	Повреждение ТН-35 (ЗНОМ-35)	Междуфазное к.з. из-за повреждение ТН-35 на ТП-МВД	Износ оборудования
Тяговая подстанция №2	Отключение выключателя 11 Ф-10 кВ.	Перекрытие проходного изолятора ИП-10 ввода ВМ-10 Т-1 фазы «А»	Увлажнение изоляции	Износ оборудования
Тяговая подстанция №3	РЛНД-27,5	Повреждение и разграбление 2 ДТ в линии отсоса тяговой подстанции	Посторонние лица	Прочие причины
Тяговая подстанция №4	Отключение 6ФКС.(ВВК27,5 и ОР)	Самопроизвольное отключение разъединителя	КЗ в цепях привода. (Нарушение изоляции корпуса тумблера ТВ1-2 в приводе разъединителя)	Износ оборудования
Тяговая подстанция №5	Отключение фидеров КС 1-5	Повреждение катушки включения КСВ	Разрушение рамки толкателя подвижных контактов	Износ оборудования
Тяговая подстанция №6	Отсос	Повреждение ТН220кВ на РП	Коммутационные перенапряжения	Прочие причины
Тяговая подстанция №7	ВМТ-220	Разграбление ДТ в линии отсоса тяговой подстанции	Посторонние лица	Прочие причины
Тяговая подстанция №8	Отключение В55 Т-1	Излом опорного изолятора ШР 1с.ш. ф.С	Заводской брак	Заводской брак
Тяговая подстанция №9	Отключение Т4	Повреждение ввода 110кВ выключателя В-110 Т-4	Увлажнение. Разгерметизация ввода	Износ оборудования
Повреждения за 2017 год				
Тяговая подстанция №4	Отключение В27-2Т, ФКС 1,2	Неисправность механизма свободного расцепления ВДПР-Вост. Типа ВМКЭ-35	Разрушение шайбы	Износ оборудования
Тяговая подстанция №11	Отказ включения ВБН-27,5 (ФКС-1)	Повреждение катушки включения привода ПЭ-200	Пробой изоляции вывода на корпус привода	Износ оборудования
Повреждения за 2018 год				
Тяговая подстанция № 12	Отсутствие напряжения в контактной сети	Отключение ФКС №6. Отказ при включении	Неисправность привода выключателя типа ВБЭТ-27,5 – заедание штока электромагнита отключения. Отсутствие смазки.	Ошибка персонала

Продолжение таблицы 1

Continuation of table 1

Повреждения за 2019 год				
Тяговая подстанция № 1	Повреждение кабеля	Высыхание изоляции	Старение	Износ оборудования
Тяговая подстанция №4	Пробой изолятора 2ТСН-10	Близкое КЗ	Перекрытие вводов 10 2ТСН	Прочие причины
Тяговая подстанция №13	Не отключился привод	Проскальзывание барабана привода	Из-за износа шестеренок	
Тяговая подстанция №15	ОД-110 не отключился	При колебаниях температур окружающей среды, соскользнула защелка КЗ-110, ОД-110 не отключен	Затвердевание смазки в механизме привода	Ошибка персонала
Повреждения за 2020 год				
Тяговая подстанция №4	Отключение В220кВ	Произошло аварийное отключение в системе внешнего электроснабжения	Внешнее воздействие	Прочие причины
Тяговая подстанция №5	Падение напряжения в контактной сети ниже нормы или отсутствие	Отключение по вводам В переменного тока 27 кВ	Перегоревший ТЭН подогрева привода В-5ФКС	Износ оборудования
Тяговая подстанция №9	Отсутствие напряжения в контактной сети	Отключение по вводам выключателя переменного тока 110 кВ	Из-за разрушения ввода МВ110кВ"М" ПС 110кВ Лесозавод принадлежащий ИЭСК	Износ оборудования
Тяговая подстанция №17	Падение напряжения в контактной сети ниже нормы или отсутствие	Поверхностное повреждение ОПН27 2 ТН фазы А,В, отгорание шин фазы А,В в месте крепления к ОПН27 2 ТН	Эксплуатационная	Ошибка персонала
Тяговая подстанция №18	Разрушение трансформатора тока	Пробой, перекрытие трансформатора тока тяговой подстанции	Эксплуатационная	Износ оборудования
Тяговая подстанция №19	Отсутствие напряжения в контактной сети	Отключение по вводам выключателя переменного тока 27 кВ	Эксплуатационная	Ошибка персонала
Тяговая подстанция №20	Недовключение масляного выключателя переменного тока 27 кВ	Раз регулировка выключателя переменного тока 27 кВ	Эксплуатационная	Прочие причины
Тяговая подстанция №21	Отсутствие напряжения в контактной сети	Отключение (понижение) напряжения на силовом трансформаторе тяговой подстанции (110 кВ) без повреждения	Аварийное отключение ВЛ110кВ	Ошибка персонала

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Согласно статистическим данным по отказам оборудования [12] построена диаграмма Парето, представленная на рисунке 1, проведен ее анализ.

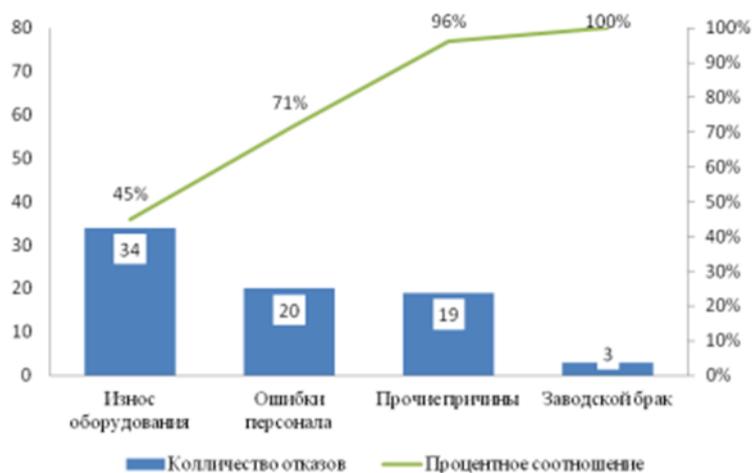


Рис.1. Статистика отказов оборудования электроснабжения железнодорожной линии N1 Fig.1. Statistics of failures of power supply equipment of railway line N1

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Из диаграммы Парето видно, что основная причина отказов оборудования системы тягового электроснабжения анализируемой железнодорожной линии является износ оборудования, на долю которого приходится около 45% от всего количества технических отказов.

Наибольшее количество отказов приходится на оборудование тяговой подстанции №4 (ТП), что вызывает необходимость замены или модернизации данного оборудования.

#### **Расчет параметров нормального режима работы системы тягового электроснабжения**

Используя программный комплекс Кортэс выполнен тяговый расчет с целью выявления слабых зон на установленном участке железнодорожной линии с учетом пропуска поездов повышенной массы для перспективного развития Байкало-Амурской и Транссибирской магистралей, в рамках прироста грузопотока в восточном направлении. В качестве исходных данных для расчета применены реальные профиль участка, существующие параметры системы его электроснабжения, размеры движения, типы и весовые нормы пропускаемых грузовых и пассажирских поездов, предусмотренные утвержденным графиком движения [13- 16].

Исходными данными для выполнения расчета также являются: тип железнодорожного пути – звеньевой, тип состава – грузовой, в составе грузового поезда – 100 % вагонов имеют роликовые подшипники, установленный участок железнодорожного пути примем как горно-перевальный с целью рассмотреть максимально сложные условия работы объектов железнодорожного транспорта. Произведён развернутый тяговый расчёт с учетом перспективного развития движения на горно-перевальном участке до 2025 года в чётном и нечётном направлениях, для поездов установленной весовой нормы 7100 тонн в нечетных направлениях, при использовании в качестве тягового подвижного состава электровоз серии Ермак [17-20].

#### **Результаты (Results)**

Для расчета параметров системы тягового электроснабжения рассматриваемого участка железнодорожной линии (далее – СТЭ) производим построение в программе K GrafDv случайного графика движения поездов, с учетом перспективных размеров движения на указанном участке, основные параметры определения структурирования данных по графику исполненного движения представлены в таблице 2.

При расчете в программном комплексе учитывалось реальное состояние системы тягового электроснабжения на участке с заданными параметрами, т.е. были учтены компенсирующие устройства. Посты секционирования и пункты параллельного соединения на данном направлении отсутствуют. По тяговым подстанциям отсутствуют компенсирующие устройства (КУ и УПК), при этом с целью опытной проверки существующих размеров движения учитывалась работа тяговых трансформаторов, установленных на подстанциях.

Таблица 2

Table 2

Результаты структурирования данных по суточному графику исполненного движения  
*The results of structuring the data according to the daily schedule of the executed movement*

Наименование участка	Весовые нормы грузовых поездов, тонн	Размеры движения грузовых поездов, поездов/сутки			
		2020 год		2025 год	
		четное	нечетное	четное	нечетное
N1	7100	22	-	13	-
	6000-6300	19	1	19	-
	4000-4200	20	8	2	9
	3000 сборный	2	2	2	2
	3000 контейнерный	12	12	14	14
	1500-1700 порожний	-	50	-	41
	итого	75	73	69	66

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Все технические решения для усиления тяговой сети на участке способствуют увеличению напряжения в контактной сети до значения выше минимально допустимого (21 кВ), что позволяет увеличить пропуск поездов на участке с учетом перспективного плана движения до 2025 года [11-13, 15]. В таблице 3 приведены результаты расчета параметров режима работы СТЭ участка N1 при фактических условиях работы.

Таблица 3

Table 3

Результаты расчета параметров режима работы СТЭ с учетом реального состояния функционирования

*The results of calculating the parameters of the operation mode of the STE, taking into account the real state of operation*

Тяговая подстанция	к пер. тр	W полн., кВ·А·ч	W акт., кВт·ч	U <sub>min</sub> , кВ	I <sub>фид.мах</sub> , А	Нагрев проводов контактной подвески, °С		W а., кВт·ч		W р., кВАр·ч		Потери в трансформаторах	
						1/2 путь	отс.	левое	правое	левое	правое	нагревание	холостой ход
ТП-3	2,71	209600	176705	18,59	1185	40/47	51	0	106056	0	53839	527	1008
ТП-4	1,59	177002	148230	21,20	608	41/46	45	70649	74229	58888	34615	543	1008
ТП-4					608	41/45	45						
ТП-5	1,44				534	41/46	44	74001	0	62119	0	294	1008

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На основании полученных расчетных параметров при существующих режимах движения поездов можно сделать вывод, что система тягового электроснабжения рассматриваемого участка не позволяет обеспечить необходимый уровень параметров тяговой сети, а именно: минимальное напряжение 18,59 кВ, коэффициент перегрузки 2,71 по ТП-3. Прочие параметры тяговой сети температура контактной сети и отсасывающей линии, допустимые токи в питающих проводах в пределах нормы и не выходят за установленные ограничивающие параметры [21-24].

При этом расход электроэнергии составил:

- активной 324935 кВт·час;
- реактивной 209461 кВАр·час;
- потери в тяговой сети 1,8 %;
- максимальная температура трансформатора составила 68 0С на ТП-3.

**Расчет параметров нормального режима работы участка при организации заданного движения при замене тяговых трансформаторов с 25000 кВа на 40000 кВа**

В таблице 4 приведены результаты расчета параметров режима работы СТЭ рассматриваемого участка при трансформаторах увеличенной мощности [25-27].

Таблица 4  
Table 4

Результаты расчета параметров режима работы СТЭ с учетом перспективного состояния функционирования

The results of calculating the parameters of the operation mode of the STE, taking into account the prospective state of operation

Тяговая подстанция	k пер. тр	W полн., кВт·ч	W акт., кВт·ч	U <sub>min</sub> , кВ	I <sub>фид.мак.</sub> , А	Нагрев проводов контактной подвески, °С		W а., кВт·ч		W р., кВАр·ч		Потери в трансформаторах	
						1/2 путь	отс.	левое	правое	левое	правое	нагревание	холостой ход
ТП-3	0,9	213611	180299	20,96	1219	40/47	52	0	109341	0	57893	174	1728
ТП-4	0,47				621	40/46	45	70958	74970	56658	37734	166	1728
ТП-4		180590	151420	22,39	621	41/45	45						
ТП-5	0,47	180590	151420	22,39	542	41/46	44	76450	0	60677	0	91	1728

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На основании полученных расчётных значений представленных в таблице 4 при существующих режимах движения поездов можно сделать вывод, что система тягового электроснабжения данного участка позволяет обеспечить необходимый уровень параметров тяговой сети, а именно: минимальное напряжение 20,96 кВ на участке, коэффициент перегрузки 0,90 ТП-3 [28-30, 16].

Прочие параметры тяговой сети температура контактной сети и отсасывающей линии, допустимые токи в питающих проводах в пределах нормы и не выходят за установленные ограничивающие параметры.

При этом расход электроэнергии составил:

- активной 331718 кВт\*час;
- реактивной 212962 кВАр\*час;
- потери в тяговой сети 1,7 %;
- максимальная температура трансформатора составила 65 0С, на ТП-3.

**Целесообразность реконструкции ТП-4 с учетом перспективного состояния функционирования**

По типу подключения к внешнему электроснабжению ТП-4 является транзитной, относится к первой группе, питающее напряжение 110 кВ, имеет четыре распределительных устройства ОРУ-110, ОРУ-27,5 кВ, ОРУ-35 кВ и КРУН-6 кВ.

В распределительном устройстве ТП-4 – 110 кВ предлагается замена многообъемных масляных выключателей МКП-110/1000 ШПЭ 3 (установленных в рабочей переемычке), в распределительном устройстве -27,5 кВ и 35 кВ – замена выключателей ВМК-35/1000 и ВВУ-27,5, в распределительном устройстве – 6 кВ – замена выключателей ВМПЭ-10 в связи с большим эксплуатационным сроком. Также, предлагается замена разъединителей РНДЗ – 110/630, РНДЗ-35/1000 [18,21]. Предлагаемое для реконструкции оборудование сгруппируем по классу напряжения и поместим в таблицу 5. Определим максимальные рабочие токи, таблица 6.

Таблица 5  
Table 5

Предлагаемое к замене оборудование для ТП-4  
Proposed replacement equipment for TP-4

U <sub>уст.</sub> , кВ	Наименование аппарата	Место установки	Тип оборудования		Количество, шт.
			заменяемого	замещающего	
110	Выключатель	Ввода ТП и рабочая переемычка	МКП-110/1000 ШПЭ – 33	ВЭБ-110-40/2500	3
	Разъединитель	Ввод ТП 1, 2. Ввод СТ1, СТ2, переемычки	РНДЗ-110/630	РГП-110-1000	8
35	Выключатель	Ввод 1, 2, СВ-35	ВМК-35Э-1000	ВБЭТ-35/1250	3

Продолжение таблицы 5  
Continuation of table 5

	Выключатель	ФРП-35, Ввод 1,2 РПТ	ВМК-35Э-1000	ВБЭТ-35/630	4
	Трансформатор тока	Ввод 1, 2, СВ-35, ФРП-35, 1,2 РПТ	ТФН-35М	ТВ-35	7
	Разъединитель	Ввод 1, 2, СВ-35, ФРП-35	РНДЗ-35/1000	РГП-35-1000	16
27,5	Выключатель	ТСН, ДПР, СЦБ	ВМК-35Э-1000	ВБЭТ-35-630	5
	Выключатель	Ввод 1, 2	ВМК-35Э-1000	ВБЭТ-35-1600	2
	Выключатель	ФКС 1,2,3, ОВ, СЦБ	ВВУ-27,5/630	ВБЭТ-27,5-1600	5
	Трансформатор тока	Ввод 1, 2, ДПР, СЦБ, ТСН, ОВ, ФКС Т	ТФН-35, ТВ-35 ВВУ-27,5	ТВ-35 ВБЭТ-35 (27,5)	12
	Разъединитель	Ввод 1, 2, ДПР, СЦБ, ТСН, ОВ, ФКС, ТН	РНДЗ-35/1000	РГП-35-1000	37

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таблица 6  
Table 6

Расчетные значения максимальных рабочих токов  
Calculated values of maximum operating currents

Наименование присоединений и сборных шин	Значение $I_{\text{раб max}}$ , А
Вводы транзитной тяговой подстанции	818,8
Ввод высокого напряжения тягового трансформатора	293,8
Ввод среднего напряжения тягового трансформатора	923,8
Ввод низкого напряжения тягового трансформатора	1175,7
Сборные шины 27,5 кВ	839,8
Сборные шины 35 кВ	659,8
ФРП 35 кВ	11,4
ФКС	621,0
Ввод высокого напряжения районного трансформатора	145,5
Ввод низкого напряжения районного трансформатора	808,3
Сборные шины 6 кВ	577,4
ФРП 6 кВ	73,9

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

### Обсуждение (Discussions)

На основании проведенных расчетов в программном комплексе КОРТЭС можно сделать вывод, что увеличение мощности на тяговых трансформаторах позволит уменьшить перегрузку тяговых трансформаторов на 33%, увеличить напряжения в контактной сети до 21 кВ, уменьшить потери в тяговой сети на 0,1 %, понизить максимальную температуру на 30С, остальные параметры функционирования не изменяться, что доказывает, что для модернизации имеющегося оборудования ТП-4 рассматриваемого участка целесообразно использовать тяговые трансформаторы мощностью 40 МВА [21-25].

Капитальные затраты на замену оборудования составят 35,753 млн.руб. Замена оборудования необходима, так как предлагаемое к замене оборудование подстанции морально устарело и работает недостаточно надежно и эффективно, а также требует значительных эксплуатационных расходов, которые составляют 14,07 млн.руб. Срок окупаемости предлагаемого для реконструкции оборудования составляет 3,9 года [29-30].

### Заключение и выводы (Conclusions)

Согласно политики ОАО «РЖД» уровень пропускной способности железных дорог Восточного полигона к 2025 году должен увеличиться в полтора раза, т.е. до 180 млн тонн грузов в год, что потребует проведения дополнительных мероприятий по модернизации электроснабжения указанных магистралей. Так как основные задачи возложены на электрическую тягу способную обеспечить заданный объем перевозимых грузов, с этой

целью необходима масштабная реконструкция существующей системы тягового электроснабжения. Произведённый авторами с использованием методов математического моделирования анализ повреждаемости оборудования тяговых подстанций рассматриваемого железнодорожного участка Восточного полигона, позволил выявить наиболее значимые причины отказов оборудования системы тягового электроснабжения, выявить зоны рисков с учетом перспективного пропуска поездов повышенной массы для Байкало-Амурской и Транссибирской магистралей, в рамках прироста грузопотока. Полученные расчетные значения при существующих размерах организации движения поездов позволили сделать вывод, что система тягового электроснабжения рассматриваемого участка не позволяет обеспечить необходимый уровень параметров тяговой сети и пропустить плановый поездопоток. Представлено технико-экономическое обоснование целесообразности реконструкции тяговых подстанций с учетом перспективного состояния функционирования участка.

#### Литература

1. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года. URL: <http://www.zakonprostr.ru/content/base/part/581185> (дата обращения: 03.10.2022). – Текст: электронный.
2. Анализ фактических электрических нагрузок многоквартирных жилых домов Московской области / Ю.И. Солюянов, А.И. Федотов, А.Р. Ахметшин, В.И. Солюянов, А.Н. Горлов // Промышленная энергетика. – 2022. – № 4. – С. 20-28.
3. Application of intelligent electricity metering systems for timely adjustment of standard values for electrical loads calculation / Y. I. Soluyanov, A. I. Fedotov, A. R. Akhmetshin, V. I. Soluyanov // Proceedings of the 3rd 2021 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, REEPE 2021 : 3, Moscow, 11–13 марта 2021 года. – Moscow, 2021. – P. 9388018.
4. Evaluation of the compatibility of the power traction supply system with a use of a "virtual coupling" technology / V. A. Olentsevich, N. P. Astashkov, A. R. Akhmetshin, K. V. Suslov, M. G. Shtayger, A. I. Karlina // Journal of Physics: Conference Series, Novorossiysk, Virtual, 15–16 июня 2021 года. – Novorossiysk, Virtual, 2021. – P. 012112.
5. Issues of railway operation and maintenance in the land areas of the Russian Arctic zone / R. Lagerev, S. Lagerev // Transportation Research Procedia, St. Petersburg, 02–04 июня 2021 года. – St. Petersburg, 2021. – P. 332-340.
6. Dynamic analysis of the coupling relationship between regional energy economy and environment based on big data / Chengqi Xu, Juanjuan Zhang // Energy Reports. – 2022. – P. 13293-13301.
7. Systematization of Underground Ice / V. I. Solomatin, N. G. Belova // Ninth International Conference on Permafrost, Fairbanks, 29 июня – 03 июля 2008 года / University of Alaska Fairbanks. Vol. 2. – Fairbanks: Institute of Northern Engineering, 2008. – P. 1671-1674.
8. Assessment of Potential Forest Biomass Resource on the Basis of Data of Air Laser Scanning / M. V. Kuzyakina, D. A. Gura, A. N. Sekisov, N. V. Granik // International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2018 : Серия: Advances in Intelligent Systems and Computing Volume 983, Voronezh and Samara, Russia, 10–13 декабря 2018 года. Vol. 2. – Cham: Springer, 2019. – P. 403-416.
9. Прогноз выработки электроэнергии фотоэлектрическими электростанциями (на сутки вперед) с использованием машинного обучения / Д. В. Воротынец, М. Г. Тягунов // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. – 2018. – № 4. – С. 53-57.
10. Технологии цифровых двойников в энергетике / С. А. Ерошенко, А. И. Хальясмаа // Электроэнергетика глазами молодежи-2019 : материалы юбилейной X Международной научно-технической конференции, Иркутск, 16–20 сентября 2019 года. Том 1. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2019. – С. 55-58.
11. Использование машинного обучения в ситуационном управлении применительно к задачам электроэнергетики / Л. В. Массель, О. М. Гергет, А. Г. Массель, Т. Г. Мамедов // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2019. – № 3(15). – С. 5-17.
12. A review of modelling and optimisation methods applied to railways energy consumption / P. Martínez Fernández, I. Villalba Sanchís, R. Insa Franco, V. Yepes // Journal of Cleaner Production. – 2019. – Vol. 222. – P. 153-162.
13. Set of organizational, technical and reconstructive measures aimed at improvement of section performance indicators based on the study of systemic relations and regularities of functioning of railway transport system / V. A. Olentsevich, Y. I. Belogolov, G. N. Kramynina // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : 2019 International Conference on Digital Solutions for Automotive Industry, Roadway Maintenance and Traffic Control, DS ART 2019, Cholpon-Ata, 01 ноября 2019 года.

– BRISTOL: Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 012038.

14. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года. Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 14 декабря 2016 г. – № 2537р. – 76 с.

15. Analysis of reliability and sustainability of organizational and technical systems of railway transportation process / V. A. Olentsevich, Yu. I. Belogolov, N. N. Grigoryeva // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 2019 International Conference on Digital Solutions for Automotive Industry, Roadway Maintenance and Traffic Control, DS ART 2019, Cholpon-Ata, 01 ноября 2019 года. – BRISTOL: Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 012061.

16. Development of the performance control algorithm of the blower motors of electric locomotives for various operating modes / A. R. Akhmetshin, K. V. Suslov, N. P. Astashkov, V. A. Olentsevich, M. G. Shtayger and A. I. Karlina IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Conference: Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2020), Saint-Petersburg, Russia, 27–29 октября 2020 года. – Saint-Petersburg, Russia: IOP Publishing, 2021. – P. 012001.

17. Increase of the throughput and processing capacity of the railway line mountain pass section by strengthening the devices of the system of traction power supply / N. P. Astashkov, V. A. Olentsevich, A. R. Akhmetshin, K. V. Suslov, M. G. Shtayger and A. I. Karlina // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Conference: Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2020), Saint-Petersburg, Russia, 27–29 октября 2020 года. – Saint-Petersburg, Russia: IOP Publishing, 2021.

18. Methods for improving the quality of electrical energy in distribution networks / A. Akhmetshin, S. Gaponenko, G. Marin // Proceedings - 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2021, Sochi, 17–21 мая 2021 года. – Sochi, 2021. – P. 241-245.

19. Муравейко, Л. А. Способ on-line визуализации и хранения информации о токах, протекающих в контактной сети с привязкой к графику движения поездов на примере релейной защиты ЦЗА-27,5-ФТС / Л. А. Муравейко, М. В. Востриков, В. А. Тихомиров // Молодая наука Сибири. – 2021. – № 1(11). – С. 244-249.

20. Гибридная система интервального регулирования движения поездов для Московского центрального кольца / Е. Е. Шухина, В. И. Астрахан, И. А. Панферов, Г. К. Кисельгоф // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование (ИСУЖТ-2018) : Труды седьмой научно-технической конференции, Москва, 14 ноября 2018 года. – Москва: Акционерное общество "Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте", 2018. – С. 31-35.

21. Анализ эффективности организации движения поездов в режиме интервального регулирования на участке Петровский Завод - Хилок в сложноструктурированной транспортной системе / С. С. Громышова, А. В. Маштакова, А. П. Хоменко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – № 3(67). – С. 159-166.

22. Salkuti, S. R. Optimal Operation of Electrified Railways with Renewable Sources and Storage / S. R. Salkuti // Journal of Electrical Engineering and Technology. – 2021. – Vol. 16. – No 1. – P. 239-248.

23. Повышение достоверности диагностирования состояния несущего троса контактной сети / В. П. Ступицкий, И. А. Худогонов, В. А. Тихомиров, О. В. Лобанов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – № 1(65). – С. 136-143.

24. Parallel operation of an inverter with an electrical AC network / T. L. Alekseeva, N. L. Ryabchyonok, L. A. Astrakhantsev, V. A. Tikhomirov, N. P. Astashkov, A. L. Martisov, M. E. Alekseev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region, SibTrans 2019, Moscow, 21–24 мая 2019 года. – Moscow: Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 012003.

25. [25] Энерго-ресурсосберегающий эффект в системах электроснабжения жилых комплексов от актуализации нормативов электрических нагрузок / Ю. И. Солюянов, А. Р. Ахметшин, В. И. Солюянов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23. – № 1. – С. 156-166.

26. Направления и перспективы российско-китайского сотрудничества в вопросах развития приграничных регионов / В. Сяоцзюй, С. В. Рязанцев // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2018. – Т. 24. – № 10. – С. 59-64.

27. Research of the modern absorbing apparatus power characteristics influence on the freight train inter-car forces / A. O. Shimanovsky, P. A. Sakharau, M. G. Kuzniatsova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : 15. Dnipro, May 27–29, 2020. – Dnipro, 2020. – P. 012027.

28. Перспективы применения технологий Smartgrid на железнодорожном транспорте / Д. Н. Пермякова, А. М. Гладких, Е. С. Берус // Молодежная наука : Труды XXV Международной

студенческой научно-практической конференции, Красноярск, 22–24 апреля 2021 года. – Красноярск: красноярский институт железнодорожного транспорта - филиал ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», 2021. – С. 98-102.

29. Ахметшина, Г. Р. Анализ особенностей технологически изолированных энергорайонов, учитываемых при разработке программ оптимизации локальной энергетики / Г. Р. Ахметшина, М. Р. Кусимов, К. К. Ильковский // Микроэкономика. – 2019. – № 5. – С. 64-68.

30. Риск-ориентированный подход к энергетическому производству / Д. А. Лысенко, А. М. Гладких, Д. Н. Пермякова // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Иркутск, 20–24 апреля 2021 года. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2021. – С. 239-243.

31. Numerical simulation of the size, quantity and shape of non-metallic inclusions in rails / V. Y. Konyukhov, T. A. Oparina, D. N. Permyakova // Journal of Physics: Conference Series, Novosibirsk, 12–14 мая 2021 года. – Novosibirsk, 2021. – P. 012071.

32. Проблемы реализации инфраструктурных проектов Транссибирской и Байкало-Амурской магистральных / Т. С. Зайцева, П. А. Коваленко, М. С. Семенова // Политранспортные системы : Материалы X Международной научно-технической конференции, Новосибирск, 15–16 ноября 2018 года. – Новосибирск: Сибирский государственный университет путей сообщения, 2019. – С. 35-39.

33. On the issue of accelerating the development of the northern territories in Russia / V. Shulga, P. Petrov, A. Kudrov, V. Verchuk // Transportation Research Procedia, St. Petersburg, 02–04 июня 2021 года. – St. Petersburg, 2021. – P. 634-638.

34. Russian Arctic offshore petroleum governance: The effects of western sanctions and outlook for northern development / D. Shapovalova, E. Galimullin, E. Grushevenko // Energy Policy. – 2020. – Vol. 146. – P. 111753.

35. Подход к моделированию функционирования взаимосвязанных систем энергетики в условиях возмущений и его программная поддержка / А. В. Еделев, Н. М. Береснева // Программные продукты и системы. – 2021. – № 3. – С. 409-419.

36. Перспективы развития мировой энергетики в период до 2040 г. и их влияние на российский топливно-энергетический комплекс / А. А. Галкина, Д. А. Грушевенко, Е. В. Грушевенко, В. А. Кулагин, И. Ю. Миронова // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. – 2015. – № 1(211). – С. 59-70.

#### **Авторы публикации**

**Шушпанов Илья Николаевич** – канд. тех. наук, доцент ИрННТУ, заместитель руководителя Национального исследовательского комитета С1 «Планирование развития энергосистем и экономика» Российского национального комитета CIGRE.

**Пермякова Дарья Николаевна** – магистрант МГТУ им. Н.Э. Баумана.

**Кониюхов Владимир Юрьевич** – канд. тех. наук, профессор ИрННТУ, доцент ВАК, почётный работник сферы образования Российской Федерации.

**Опарина Татьяна Александровна** – программист 1 категории ИрННТУ.

#### **References**

1. Transport strategy of the Russian Federation for the period up to 2030. URL: <http://www.zakonprost.ru/content/base/part/581185> (accessed: 03.10.2022). – Text: electronic.

2. Analysis of the actual electrical loads of apartment buildings in the Moscow region / Yu.I. Soluyanov, A.I. Fedotov, A.R. Akhmetshin, V.I. Soluyanov, A.N. Gorlov // Industrial power Engineering. – 2022. – No. 4. – P. 20-28.

3. Application of intelligent electricity metering systems for timely adjustment of standard values for electrical loads calculation / Y. I. Soluyanov, A. I. Fedotov, A. R. Akhmetshin, V. I. Soluyanov // Proceedings of the 3rd 2021 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, REEPE 2021 : 3, Moscow, March 11–13, 2021. – Moscow, 2021. – P. 9388018.

4. Evaluation of the compatibility of the power traction supply system with a use of a "virtual coupling" technology / V. A. Olentsevich, N. P. Astashkov, A. R. Akhmetshin, K. V. Suslov, M. G.

Shtayger, A. I. Karlina // *Journal of Physics: Conference Series*, Novorossiysk, Virtual, June 15–16, 2021. – Novorossiysk, Virtual, 2021. – P. 012112.

5. Issues of railway operation and maintenance in the land areas of the Russian Arctic zone / R. Lagerev, S. Lagerev // *Transportation Research Procedia*, St. Petersburg, June 02–04, 2021. – St. Petersburg, 2021. – P. 332-340.

6. Dynamic analysis of the coupling relationship between regional energy economy and environment based on big data / Chengqi Xu, Juanjuan Zhang // *Energy Reports*. – 2022. – P. 13293-13301.

7. Systematization of Underground Ice / V. I. Solomatin, N. G. Belova // *Ninth International Conference on Permafrost*, Fairbanks, June 29 – 03, 2008 / University of Alaska Fairbanks. Vol. 2. – Fairbanks: Institute of Northern Engineering, 2008. – P. 1671-1674.

8. Assessment of Potential Forest Biomass Resource on the Basis of Data of Air Laser Scanning / M. V. Kuzyakina, D. A. Gura, A. N. Sekisov, N. V. Granik // *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2018 : Серия: Advances in Intelligent Systems and Computing Volume 983*, Voronezh and Samara, Russia, December 10–13, 2018. Vol. 2. – Cham: Springer, 2019. – P. 403-416.

9. Forecast of electricity generation by photovoltaic power plants (for the day ahead) using machine learning / D. V. Vorotyntsev, M. G. Tyagunov // *Bulletin of the Moscow Power Engineering Institute. Bulletin of the MEI*. – 2018. – No. 4. – P. 53-57.

10. Technologies of digital twins in power engineering / S. A. Eroshenko, A. I. Khalyasmaa // *Electric power industry through the eyes of youth-2019 : materials of the jubilee X International Scientific and Technical Conference*, Irkutsk, September 16-20, 2019. Volume 1. – Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University, 2019. – P. 55-58.

11. The use of machine learning in situational management in relation to the tasks of the electric power industry / L. V. Massel, O. M. Gerget, A. G. Massel, T. G. Mammadov // *Information and mathematical technologies in science and management*. – 2019. – No. 3(15). – P. 5-17.

12. A review of modelling and optimisation methods applied to railways energy consumption / P. Martínez Fernández, I. Villalba Sanchís, R. Insa Franco, V. Yepes // *Journal of Cleaner Production*. – 2019. – Vol. 222. – P. 153-162.

13. Set of organizational, technical and reconstructive measures aimed at improvement of section performance indicators based on the study of systemic relations and regularities of functioning of railway transport system / V. A. Olentsevich, Y. I. Belogolov, G. N. Kramynina // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : 2019 International Conference on Digital Solutions for Automotive Industry, Roadway Maintenance and Traffic Control, DS ART 2019, Cholpon-Ata, November 01, 2019*. – BRISTOL: Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 012038.

14. Energy strategy of the Russian Railways Holding for the period up to 2020 and for the future up to 2030. Approved by the Order of JSC "Russian Railways" dated December 14, 2016 – No. 2537r. – 76 p.

15. Analysis of reliability and sustainability of organizational and technical systems of railway transportation process / V. A. Olentsevich, Yu. I. Belogolov, N. N. Grigoryeva // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 2019 International Conference on Digital Solutions for Automotive Industry, Roadway Maintenance and Traffic Control, DS ART 2019, Cholpon-Ata, 01 ноября 2019 года*. – BRISTOL: Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 012061.

16. Development of the performance control algorithm of the blower motors of electric locomotives for various operating modes / A. R. Akhmetshin, K. V. Suslov, N. P. Astashkov, V. A. Olentsevich, M. G. Shtayger and A. I. Karlina // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Conference: Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2020)*, Saint-Petersburg, Russia, October 27–29, 2020. – Saint-Petersburg, Russia: IOP Publishing, 2021. – P. 012001.

17. Increase of the throughput and processing capacity of the railway line mountain pass section by strengthening the devices of the system of traction power supply / N. P. Astashkov, V. A. Olentsevich, A. R. Akhmetshin, K. V. Suslov, M. G. Shtayger and A. I. Karlina // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Conference: Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2020)*, Saint-Petersburg, Russia, October 27–29, 2020. – Saint-Petersburg, Russia: IOP Publishing, 2021.

18. Methods for improving the quality of electrical energy in distribution networks / A. Akhmetshin, S. Gaponenko, G. Marin // *Proceedings - 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2021, Sochi, May 17–21, 2021*. – Sochi, 2021. – P. 241-245.

19. A method of on-line visualization and storage of information about currents flowing in the contact network with reference to the train schedule on the example of relay protection TSA-27,5-FTS / L. A. Muraveyko, M. V. Vostrikov, V. A. Tikhomirov // *Molodaya nauka Sibiri*. – 2021. – № 1(11). – P. 244-249.

20. Hybrid system of interval regulation of train traffic for the Moscow Central Ring / E. E. Shukhina, V. I. Astrakhan, I. A. Panferov, G. K. Kiselgof // Intelligent control systems for railway transport. Computer and Mathematical Modeling (ISUZHT-2018) : Proceedings of the Seventh Scientific and Technical Conference, Moscow, November 14, 2018. – Moscow: Joint-Stock Company "Research and Design Institute of Informatization, Automation and Communication in Railway Transport", 2018. – P. 31-35.
21. Analysis of the effectiveness of the organization of train traffic in the interval regulation mode on the Petrovsky Plant - Khilok section in a complex structured transport system / S. S. Gromyshova, A.V. Mashtakova, A. P. Khomenko // Modern technologies. System analysis. Modeling. – 2020. – № 3(67). – P. 159-166.
22. Salkuti, S. R. Optimal operation of electrified railways using renewable sources and storage facilities / S. R. Salkuti // Journal of Electrical Engineering and Technology. – 2021. – Vol. 16. – No. 1. – P. 239-248.
23. Increasing the reliability of diagnosing the condition of the carrier cable of the contact network / V. P. Stupitsky, I. A. Khudonogov, V. A. Tikhomirov, O. V. Lobanov // Modern technologies. System analysis. Modeling. – 2020. – № 1(65). – P. 136-143.
24. Parallel operation of an inverter with an electrical AC network / T. L. Alekseeva, N. L. Ryabchyonok, L. A. Astrakhantsev, V. A. Tikhomirov, N. P. Astashkov, A. L. Martisov, M. E. Alekseev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region, SibTrans 2019, Moscow, May 21–24, 2019. – Moscow: Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 012003.
25. Energy-resource-saving effect in power supply systems of residential complexes from the actualization of standards of electrical loads / Yu. I. Soluyanov, A. R. Akhmetshin, V. I. Soluyanov // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Energy problems. - 2021. – Vol. 23. – No. 1. – P. 156-166.
26. Directions and prospects of Russian-Chinese cooperation in the development of border regions / V. Xiaoju, S. V. Ryazantsev // Bulletin of the Trans-Baikal State University. - 2018. – Vol. 24. – No. 10. – P. 59-64.
27. Research of the modern absorbing apparatus power characteristics influence on the freight train inter-car forces / A. O. Shimanovsky, P. A. Sakharau, M. G. Kuzniatsova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : 15, Dnipro, May 27–29, 2020. – Dnipro, 2020. – P. 012027.
28. Prospects for the use of Smartgrid technologies in railway transport / D. N. Permyakova, A.M. Gladkikh, E. S. Berus // Youth Science : Proceedings of the XXV International Student Scientific and Practical Conference, Krasnoyarsk, April 22-24, 2021. – Krasnoyarsk: Krasnoyarsk Institute of Railway Transport - branch of the Irkutsk State University of Railway Transport, 2021. – P. 98-102.
29. Analysis of the features of technologically isolated energy districts taken into account in the development of local energy optimization programs / G. R. Akhmetshina, M. R. Kusimov, K. K. Ilkovsky // Microeconomics. – 2019. – No. 5. – P. 64-68.
30. Risk-oriented approach to energy production / D. A. Lysenko, A.M. Gladkikh, D. N. Permyakova // Improving the efficiency of energy production and use in Siberia : Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation, Irkutsk, April 20-24, 2021. – Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University, 2021. – P. 239-243.
31. Numerical simulation of the size, quantity and shape of non-metallic inclusions in rails / V. Y. Konyukhov, T. A. Oparina, D. N. Permyakova // Journal of Physics: Conference Series, Novosibirsk, 12–14 мая 2021 года. – Novosibirsk, 2021. – P. 012071.
32. Problems of implementation of infrastructure projects of the Trans-Siberian and Baikal-Amur highways / T. S. Zaitseva, P. A. Kovalenko, M. S. Semenova // Polytransport systems : Materials of the X International Scientific and Technical Conference, Novosibirsk, November 15-16, 2018. – Novosibirsk: Siberian State University of Railway Transport, 2019. – P. 35-39.
33. On the issue of accelerating the development of the northern territories in Russia / V. Shulga, P. Petrov, A. Kudrov, V. Verchuk // Transportation Research Procedia, St. Petersburg, June 02–04, 2021. – St. Petersburg, 2021. – P. 634-638.
34. Russian Arctic offshore petroleum governance: The effects of western sanctions and outlook for northern development / D. Shapovalova, E. Galimullin, E. Grushevenko // Energy Policy. – 2020. – Vol. 146. – P. 111753.
35. An approach to modeling the functioning of interconnected energy systems in conditions of disturbances and its software support / A.V. Edelev, N. M. Beresneva // Software products and systems. – 2021. – No. 3. – P. 409-419.
36. Prospects for the development of world energy in the period up to 2040 and their impact on the Russian fuel and energy complex / A. A. Galkina, D. A. Grushevenko, E. V. Grushevenko, V. A. Kulagin, I. Y. Mironova // Scientific and Technical Bulletin of St. Petersburg State Polytechnic University. Economic sciences. – 2015. – № 1(211). – P. 59-70.

© Шушпанов И.Н., Пермякова Д.Н., Конюхов В.Ю., Опарина Т.А.

**Authors of the publication**

*Ilya N. Shushpanov* – Irkutsk National Research Technical University.

*Darya N. Permyakova* – Bauman Moscow State Technical University (National Research University).

*Vladimir Y. Konyukhov* – Irkutsk National Research Technical University.

*Tatiana A. Oparina* – Irkutsk National Research Technical University.

*Шифр научной специальности: 2.4.3. «Электроэнергетика»*

***Получено***

***28.11.2022 г.***

***Отредактировано***

***21.09.2023 г.***

***Принято***

***27.10.2023 г.***