

**Бардушко А.Ю., Куцкий А.П.**

*Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Российская Федерация*

## **ПОВЫШЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННОГО УЧАСТКА ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ ЯКУРИМ – КИРЕНГА НА ПЕРСПЕКТИВУ**

***Аннотация.** В соответствии с распоряжением Правительства Российской Федерации №1100-р от 28 апреля 2021 года об утверждении паспорта инвестиционного проекта «Модернизация железнодорожной инфраструктуры Байкало-Амурской и Транссибирской железнодорожных магистралей с развитием пропускных и провозных способностей (второй этап)» возникает необходимость проведения модернизации системы электроснабжения железных дорог на участке Лена Восточная-Таксимо (в рамках второго этапа инвестиционного проекта).*

*В данной работе ставится задача повышения пропускной способности железнодорожной магистрали Лена Восточная-Киренга до перспективных значений на 2025 год за счет усиления системы тяги 2x25 кВ. и увеличения количества железнодорожных путей до 2-х. В ходе проведения работы был проведен анализ возможных технических мероприятий по модернизации системы тягового электроснабжения.*

***Ключевые слова:** система тягового электроснабжения, пропускная способность, тяговый подвижной состав, качество электрической энергии, напряжение, реактивная мощность, Байкало-Амурская магистраль*

**Bardushko A.Yu., Kutsyi A.P.**

*Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation*

## **INCREASING THE CAPACITY OF THE ELECTRIFIED SECTION OF THE YAKURIM – KIRENGA RAILWAY IN THE FUTURE**

***Annotation.** In accordance with the order of the Government of the Russian Federation No. 1100-r dated April 28, 2021 on the approval of the passport of the investment project "Modernization of the railway infrastructure of the Baikal-Amur and Trans-Siberian railways with the development of carrying and carrying capacity (second stage)" roads on the Lena Vostochnaya-Taksimo section (within the framework of the second stage of the investment project).*

*This paper sets the task of increasing the throughput of the Lena Vostochnaya-Kirenga railway to the promising values for 2025 by strengthening the 2x25 kV traction system. and increasing the number of railway tracks up to 2. In the course of the work, an analysis was made of possible technical measures to modernize the traction power supply system.*

***Keywords:** traction power supply system, throughput, traction rolling stock, quality of electrical energy, voltage, reactive power, Baikal-Amur Mainline*

### **Введение**

Сейчас Байкало-Амурская магистраль — вторая, после Транссибирской магистрали, сквозная железная дорога к Тихому океану. Причин для строительства было несколько. Во-первых, уже существующий Транссиб был сильно загружен. Во-вторых, в зоне будущей магистрали обнаружили большие запасы полезных ископаемых, которые трудно было «извлечь» без развитой транспортной системы. В-третьих, новая магистраль должна обеспечить надёжное сообщения с дальневосточными регионами страны в условиях возможного захвата восточного участка Транссиба.

В настоящее время Правительство Российской Федерации, совместно с руководством ООО «РЖД» видят в стратегическом положении БАМа, его огромный технико-экономический потенциал, который будет востребован в обозримом будущем [1]. Необходимо отметить, что увеличение инфраструктурных объектов и объема перевозок положительно скажется на развитии Сибири, Дальнего Востока и территорий крайнего севера.

Приведенные факторы обосновывают необходимость проведения разностороннего анализа существующей инфраструктуры и возможных вариантов ее модернизации, в том числе системы тягового электроснабжения [2,3].

**Описание участка Лена Восточная-Киренга**

Участок железнодорожной дороги Лена Восточная-Киренга является однопутным электрифицированным участком с системой тяги 2х25 кВ. Профиль пути данного участка приведен на рисунке 1. На участке расположено 3 межподстанционные зоны Якурим (734,6 км.) – Таюра (785,6 км.) – Ния (821,5км.) – Киренга (890,6км.) (рис. 2). Параметры тяговых подстанций представлены в таблице 1.

Перспективным графиком движения поездов принимается график состоящий из поездов повышенной массы 7100 т. в количестве 36 пар поездов в четном и нечетном направлениях. В качестве тягового электровозы выбран 2ЭС5К «Ермак».

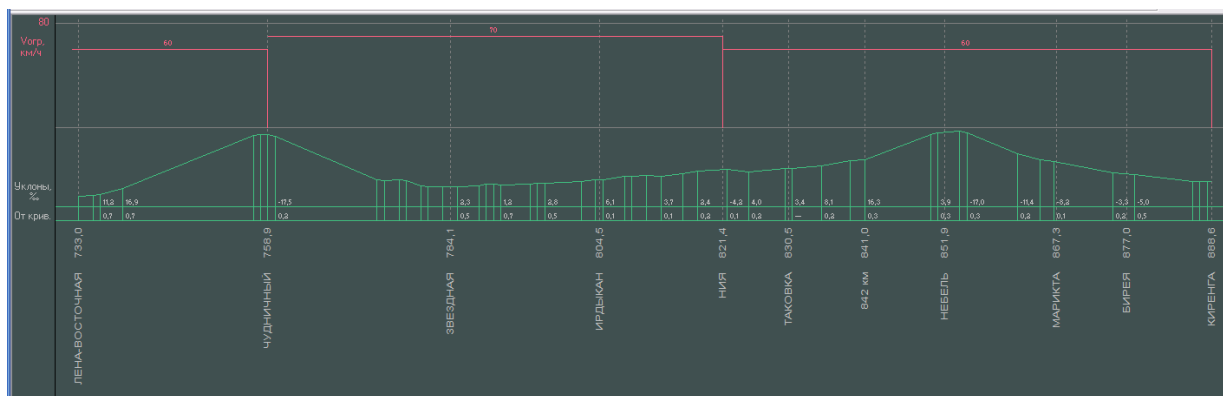


Рис. 1 – Профиль пути участка Якурим – Киренга

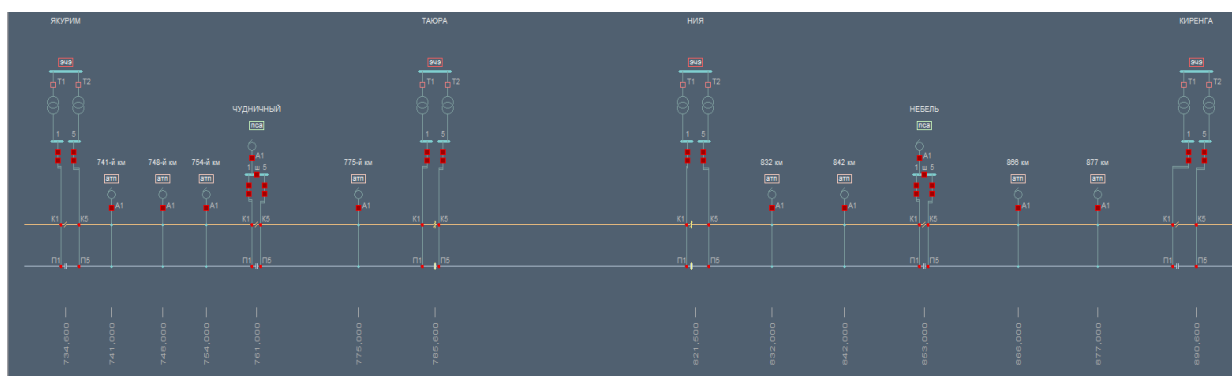


Рис. 2 – Схема участка Якурим – Киренга

Наименование подстанции	Плечо	Скз, МВ·А	Тип трансформатора	Кол-во вкл.	Ухх, В	Смещ. фазы, °	КУ на шинах КС Qполезн	УПК в КС Qном Iном	УПК в ПП Qном Iном
ЯКУРИМ	левое	1362	ОРДТНЖ-25000/220-79У1	1	27500	0.0	-	-	-
	правое								
ТАЮРА	левое	856	ОРДТНЖ-25000/220-79У1	2	27500	0.0	-	-	-
	правое								
НИЯ	левое	976	ОРДТНЖ-25000/220-79У1	1	27500	0.0	-	-	-
	правое								
КИРЕНГА	левое	502	ОРДТНЖ-25000/110-81У1	2	27500	0.0	-	-	-
	правое								

Рис. 3 - Параметры тяговых подстанций

Модернизация участка затрагивает расширение существующего пути до двухпутного.

Минимальный межпоездной интервал принимается 8 минут. В каждом направлении суточное количество поездов равно сорока. Остановки будут только в конечных пунктах участков. Так как подавляющее влияние на качество электрической энергии оказывает движение грузовых поездов, пассажирскими пренебрегаем.

**Тяговый расчет поездов массы 7100 в четном и нечетном направлениях**

Тяговый расчет для перспективной массы поезда 7100 т. проводится на основании параметров локомотива 2ЭС5К «Ермак» и профиля пути рассматриваемого участка в четном и нечетном направлениях [4-8]. Результаты представлены в таблицах 1-4.

Таблица 1

Параметры прохождения поезда 7100 т в нечетном направлении

Перегон	Длина, км	Время хода, мин.	Время под током, мин.	Расход энергии	
				кВт·ч	кВ·А·ч
Киренга - Небель	36.8	31.4	28.5	6622.4	7498.6
Небель - Ния	30.3	24.2	19.7	702.9	3478.6
Ния - Звездная	38.0	32.3	3.4	864.4	1243.1
Звездная - Чудничный	24.7	20.3	17.4	5571.8	6257.3
Чудничный - Лена-Восточная	24.0	18.7	16.5	208.2	4926.6
Общее	153.8	127.0	85.4	13969.4	23404.2

Таблица 2

Параметры прохождения поезда 7100 т в четном направлении

Перегон	Длина, км	Время хода, мин.	Время под током, мин.	Расход энергии	
				кВт·ч	кВ·А·ч
Лена-Восточная - Чудничный	24.0	22.4	22.4	7957.2	8929.3
Чудничный - Звездная	24.7	19.3	14.9	76.9	3678.2
Звездная - Ния	38.0	30.1	17.7	3561.7	4074.6
Ния - Небель	30.3	24.2	17.3	4489.8	5076.4
Небель - Киренга	36.8	28.7	26.6	714.6	5719.0
Общее	153.8	124.8	98.9	16800.3	27477.4

Результат проведения тяговых расчетов показал, что в четном и нечетном направлениях движения поезда массой 7100 т. необходимо увеличить количество работающих секций локомотива минимум до 6. Это связано с сверхпредельной температурой нагрева электродвигателей на участках Лена Восточная – Звездная и Таковка – Марикта в связи с прохождением поездов на резких, горно-перевальных участках.

### Моделирование движения поездов на участке без усиления

В рамках данной работы использовались методы имитационного моделирования с использованием ПК КОРТЭС.

Первичной задачей по реализации необходимой пропускной способности ставится анализ параметров качества электрической энергии и надежности системы электроснабжения без усиления существующей тяговой сети. Минимальные напряжения на токоприемнике локомотивов приведены в таблице 3. Расход и потери электроэнергии приведены в таблице 9.

Таблица 3

Минимальные напряжения на токоприёмниках локомотивов

Межподстанционная зона	Путь	Uэ, кВ	
		минимальное значение	через 3 минуты
Якурим - Таюра	1-й	18,61	19,14
	2-й	18,38	19,02

Таюра - Ния	1-й	22,67	22,81
	2-й	22,25	22,44
Ния - Киренга	1-й	18,91	20,16
	2-й	19,7	20,25

Как видно из таблицы 3, на межподстанционных зонах Якурим – Таюра и Ния – Киренга наблюдается значительное отклонение напряжения от минимального значения. Стоит отметить, что на рассматриваемых участках температура нагрева проводов контактной сети и значения коэффициентов нагрузки на автотрансформаторах и тяговых трансформаторах оставались в допустимых пределах [9,10].

#### **Моделирование движения поездов на участке с усилениями**

На участке Якурим – Киренга используется система тяги 2x25 кВ и для повышения пропускной способности этого участка рассмотрим следующие усиления: увеличение количества тяговых трансформаторов, установка автотрансформаторных пунктов, секционирование контактной сети, установка компенсирующего устройства (КУ) и устройства продольной компенсации (УПК).

#### **Увеличение количества тяговых трансформаторов**

Установим в параллельную работу два тяговых трансформатора на левое плечо подстанции Якурим и на правое плечо подстанции Киренга [10]. Результаты моделирования при увеличении тяговых трансформаторов представлены в таблице 4. Расход и потери электроэнергии приведены в таблице 9.

Таблица 4

**Минимальные напряжения на токоприёмниках локомотивов**

Межподстанционная зона	Путь	Uэ, кВ	
		минимальное значение	через 3 минуты
Якурим - Таюра	1-й	18,61	19,14
	2-й	18,38	19,02
Таюра - Ния	1-й	22,67	22,81
	2-й	22,25	22,44
Ния - Киренга	1-й	18,91	20,16
	2-й	19,7	20,25

По таблице 4 видно, что с добавлением тягового трансформатора минимальные напряжения на токоприёмниках локомотивов не изменились. Следовательно, устанавливать дополнительный тяговый трансформатор не целесообразно, так как данный способ является затратным в связи с высокой ценой на силовые трансформаторы. При этом расход и потери электроэнергии не изменились. Температура нагрева проводов контактной сети и значения коэффициентов нагрузки на автотрансформаторах и тяговых трансформаторах оставались в допустимых пределах.

### Установка автотрансформаторных пунктов

Важнейшими элементами системы электроснабжения 2х25 кВ являются автотрансформаторные пункты (АТП). Поэтому, в качестве следующего усиления рассмотрим установку АТП. Располагают АТП на расстоянии 7 – 25 км друг от друга на станциях в непосредственной близости от боковых, подъездных и других путей [3].

Установим автотрансформаторные пункты в местах, где напряжение не достигает нормативного значения. Результаты моделирования при установке автотрансформаторных пунктов представлены в таблице 5. Расход и потери электроэнергии приведены в таблице 9.

Таблица 5

Минимальные напряжения на токоприёмниках локомотивов

Межподстанционная зона	Путь	Uэ, кВ	
		минимальное значение	через 3 минуты
Якурим - Таюра	1-й	18,78	19,31
	2-й	18,44	19,08
Таюра - Ния	1-й	22,67	22,81
	2-й	22,25	22,44
Ния - Киренга	1-й	18,92	20,56
	2-й	19,81	20,69

По таблице 5 видно, что с добавлением автотрансформаторных пунктов в местах провала напряжения минимальное напряжение на токоприёмниках локомотивов изменилось на 0,06 кВ. При этом расход и потери электроэнергии уменьшились по сравнению с предыдущим вариантом усилением. Температура нагрева проводов контактной сети и значения коэффициентов нагрузки на автотрансформаторах и тяговых трансформаторах оставались в допустимых пределах.

### Секционирование контактной сети

Следующим вариантом усиления участка рассмотрим секционирование контактной сети. Секционирование повышает надежность работы контактной сети, делает удобным ее обслуживание при эксплуатации. Одно из достоинств секционирования является возможность отключения секции контактной сети при производстве ремонтных работ без прекращения движения поездов на остальных секциях. Результаты моделирования при секционировании контактной сети представлены в таблице 6. Расход и потери электроэнергии приведены в таблице 9.

Таблица 6

Минимальные напряжения на токоприёмниках локомотивов

Межподстанционная зона	Путь	Uэ, кВ	
		минимальное значение	через 3 минуты
Якурим - Таюра	1-й	18,72	19,26
	2-й	18,4	19,03
Таюра - Ния	1-й	22,67	22,81
	2-й	22,25	22,44

Ния - Киренга	1-й	19,21	20,24
	2-й	19,66	20,33

По таблице 6 видно, что с добавлением пунктов параллельного секционирования (ППС) между ЭЧЭ и ПСА минимальное напряжение на токоприемниках локомотивов уменьшилось на 0,04 В, при этом на первом пути МПЗ Ния – Киренга минимальное напряжение превысило 19 В. При этом расход и потери электроэнергии уменьшились по сравнению с предыдущим вариантом усилением.

### **Установка компенсирующего устройства (КУ) и устройства продольной компенсации (УПК)**

Еще одним способом усиления участка является установка КУ и УПК на шинах контактной сети. Данный способ помогает повысить уровень напряжения и эффективность работы электрооборудования, снизить потери электроэнергии, что позволит повысить пропускную способность участка [11,12,13]. Результаты моделирования при установке КУ и УПК представлены в таблице 7. Расход и потери электроэнергии приведены в таблице 9.

Таблица 7

**Минимальные напряжения на токоприёмниках локомотивов**

Межподстанционная зона	Путь	Uэ, кВ	
		минимальное значение	через 3 минуты
Якурим - Таюра	1-й	21,04	21,38
	2-й	20,82	21,22
Таюра - Ния	1-й	22,74	22,85
	2-й	22,30	22,49
Ния - Киренга	1-й	20,51	21,18
	2-й	21,13	21,31

По таблице 7 видно, что с добавлением КУ и УПК на шинах контактной сети минимальное напряжение на токоприемниках локомотивов увеличилось на 2,13 кВ, при этом на всем участке минимальное напряжение превысило 19 кВ, а в некоторых местах и минимально допустимое значение напряжения 21 кВ. Следовательно, одним из основных вариантов усиления участка стоит рассматривать установку компенсирующего устройства и устройства продольной компенсации. При этом потери в тяговой сети увеличились, а потери в трансформаторах уменьшились по сравнению с предыдущим вариантом усиления. Температура нагрева проводов контактной сети и значения коэффициентов нагрузки на автотрансформаторах и тяговых трансформаторах оставались в допустимых пределах.

### **Комплекс усиления**

Для того, чтобы добиться на всем участке минимально допустимое напряжение 21 кВ, необходимо применить комплекс усиления. Анализируя вышеприведенные варианты усиления, выберем такой комплекс усиления, который будет удовлетворять по техническим и экономическим показателям. Результаты моделирования при установке комплекса усиления представлены в таблице 8. Расход и потери электроэнергии приведены в таблице 9.

В качестве комплекса усиления были применены следующие варианты [14]: секционирование контактной сети на межподстанционной зоне Ния – Киренга; установка КУ на шинах контактной сети на правых плечах подстанций Якурим и Ния, на левых плечах

подстанций Таюра и Киренга, также КУ было установлено на все ПСА; установка УПК в контактной сети на тех же подстанциях и плечах, что и КУ; установка УПК на питающем проводе на правых плечах подстанций Якурим и Ния.

Таблица 8

**Минимальные напряжения на токоприёмниках локомотивов**

Межподстанционная зона	Путь	Uэ, кВ	
		минимальное значение	через 3 минуты
Якурим - Таюра	1-й	21,58	21,9
	2-й	21,38	21,78
Таюра - Ния	1-й	22,73	22,84
	2-й	22,29	22,48
Ния - Киренга	1-й	21,31	21,82
	2-й	21,6	21,97

По таблице 8 можно сделать следующий вывод: при помощи комплекса усиления удалось добиться на всем участке Якурим – Киренга минимально допустимого напряжения, при этом удалось снизить потери и расход электроэнергии. Температура нагрева проводов контактной сети и значения коэффициентов нагрузки на автотрансформаторах и тяговых трансформаторах оставались в допустимых пределах [15].

Таблица 9

**Расход и потери электроэнергии**

Способ усиления	Потери в тяговой сети	Полный кВ·А·ч	Активный, кВ·ч	Потери в трансформаторах	
				нагр.	х.х.
Без усиления	39620	1339340	803002	3856,7	7008,0
Увеличение количества тяговых трансформаторов,	39620	1339340	803002	3856,7	7008,0
Установка автотрансформаторных пунктов	37864	1337069	803120	3843,3	7008,0
Секционирование контактной сети	36878	1334779	802583	3836,8	7008,0
Установка КУ и УПК	40515	1141884	823756	3566,6	7008,0
Комплекс усиления	36012	1057213	829595	3255,6	7008,0

**Заключение**

В заключении следует отметить, что для повышения пропускной способности участка Якурим-Киренга необходимо рассматривать комплекс технических мероприятий по усилению системы электроснабжения. При дальнейшем учащении графика движения поездов и увеличении их масс возможности технического усиления системы будут исчерпаны [16]. Для дальнейшего увеличения пропускной способности необходимо рассмотреть возможность строительства новой тяговой подстанции на месте ПСА Небель.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Банщикова А.А. Прогнозирование объема пропуска перевозимых на нетяговом подвижном составе крупнотоннажных контейнеров в экспортно-импортном сообщении в направлении РФ-КНР / А.А. Банщикова, М.П. Базилевский, В.А. Тихомиров // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2017. – Т. 54, № 2. – С. 90–94.
2. Пузина Е.Ю. Оценка потенциала повышения энергоэффективности системы тягового электроснабжения Абаканской дистанции электроснабжения. Транспорт: наука, образование, производство: сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. -Ростов-на-Дону: Изд-во РГУПС, 2017. - С. 154-157.
3. Пузина Е.Ю., Перельгин В.М. Усиление системы тягового электроснабжения участка Якурим-Звездная ВСЖД. Транспорт-2013: труды международной научно-практической конференции.-Ростов-на-Дону: Изд-во РГУПС, 2013.-С. 176-178.
4. Ryabchenok N., Alekseeva T., Astrakhantsev L., Astashkov N., Tikhomirov V. Energy-saving driving of heavy trains. Advances in Intelligent Systems and Computing, 2020. Vol. 982. Pp. 491-508.
5. Рябченко Н.Л. Энергетическая эффективность тягового привода магистральных электровозов / Н.Л. Рябченко, Т.Л. Алексеева и др. // Изв. Транссиба. 2020. № 1 (41). С. 29–41.
6. Энергетическая эффективность в электрических цепях с полупроводниковыми приборами / Т.Л. Алексеева, Н.Л. Рябченко, Л.А. Астраханцев и др. // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. 2020. Т. 20, № 2. С. 89–98. DOI: 10.14529/power200208.
7. Alekseeva T.L., Ryabchyonok N.L., Astrakhantsev L.A., Tikhomirov V.A., Astashkov N.P., Martusov A.L., Alekseev M.E. Parallel operation of an inverter with an electrical ac network IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference.
8. Алексеева Т. Л. Повышение эффективности рекуперации электрической энергии в электрические сети переменного тока / Т. Л. Алексеева, Н. Л. Рябченко, Л. А. Астраханцев, В. А. Тихомиров, М. Е. Алексеев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – Т. 62, № 2. – С. 86–97. — DOI: 10.26731/1813- 9108.2019.2(62). 86–97.
9. Пузина Е.Ю. Оценка остаточного ресурса тяговых трансформаторов Северного хода ВСЖД. Транспорт-2013: труды международной научно-практической конференции.- Ростов-на-Дону: Изд-во РГУПС, 2013.-С. 173-175.
10. Пузина Е.Ю., Туйгунова А.Г., Худоногов И.А. Системы мониторинга силовых трансформаторов тяговых подстанций. Иркутск, 2020. – 184 с.
11. Закарюкин В. П. Моделирование несинусоидальных режимов систем тягового электроснабжения, оснащенных установками компенсации реактивной мощности / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков, А. П. Куцкий // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. - 2018. - № 1 (57). - С. 72-79.
12. Воронина Е.В., Куцкий А.П. Повышение качества электрической энергии в системах электроснабжения железных дорог // Молодая наука Сибири. 2021. № 2 (12). С. 118-125.
13. Черепанов А.В., Куцкий А.П. Использование управляемых источников реактивной мощности в системах тягового электроснабжения. Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. Т. 20. № 9(116). С. 103-110.
14. Арсентьев Г.О., Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Куцкий А.П., Нгуен В.Х., Черепанов А.В., Чан З.Х., 2019. Управление режимами систем электроснабжения железных дорог на основе технологий интеллектуальных сетей (SMART GRID). Иркутск: ИрГУПС, pp: 412.
15. Grigoriev N.P., Klykov M.S., Trofimovich P.N., Tikhomirov V.A. Reduction of electrical energy losses of power transformers of 25 kv traction substations // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region, SibTrans 2019. 2020. С. 012060.
16. Черепанов А.В., Куцкий А.П., Хисамов А.Р. Влияние режимов систем внешнего электроснабжения на пропускную способность системы тягового электроснабжения // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2019. Т. 2. С. 8-14.



## REFERENCES

1. Banshchikova A.A., Bazilevsky M.P., Tikhomirov V.A. THE Forecasting of pass volume of large containers carried on nontractive rolling stock in the export-import communication in towards from Russian Federation to China [Increase of efficiency of electric energy recovery into AC electrical networks]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2017. Vol. 54, No. 2. Pp. 90–94.
2. Puzina E.Yu. Assessment of the potential for increasing the energy efficiency of the traction power supply system of the Abakan power supply distance. *Transport: science, education, production: collection of scientific papers of the International Scientific and Practical Conference.* - Rostov-on-Don: Publishing house RGUPS, 2017. -- S. 154-157.
3. Puzina E.Yu., Perelygin V.M. Strengthening the traction power supply system of the Yakurim-Zvezdnaya section of the ESRD. *Transport-2013: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference.*-Rostov-on-Don: Publishing house of RGUPS, 2013.- S. 176-178.
4. Ryabchenok N., Alekseeva T., Astrakhantsev L., Astashkov N., Tikhomirov V. Energy-saving driving of heavy trains. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020. Vol. 982. Pp. 491-508.
5. Ryabchenok N.L., Alekseeva T.L., Astrakhantsev L.A., Tikhomirov V.A. Energeticheskaya effektivnost' tyagovogo privoda magistral'nykh elektrovozov [Energy efficiency of the traction drive of mainline electric locomotives]. *Izvestiya Transsiba* [Journal of Transsib Railway Studies]. Omsk State Transport University Publ. Omsk, 2020. No. 1(41). Pp. 29–41.
6. Alexeyeva T.L., Ryabchenok N.L., Astrakhantsev L.A., Tikhomirov V.A. Energeticheskaya effektivnost' v elektricheskikh tsepyakh s poluprovodnikovymi priborami [Energy efficiency in electrical circuits with semiconductor devices]. *Vestnik YurGU. Seriya «Energetika».* [Bulletin of the South Ural State University. Series: “Power engineering”], 2020. Vol. 20. No. 2. Pp. 89–99.
7. Alekseeva T.L., Ryabchyonok N.L., Astrakhantsev L.A., Tikhomirov V.A., Astashkov N.P., Martusov A.L., Alekseev M.E. Parallel operation of an inverter with an electrical ac network IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. *International Conference.*
8. Alekseeva T.L., Ryabchenok N.L., Astrakhantsev L.A., Tikhomirov V.A., Alekseev M.E. Povyshenie effektivnosti rekuperatsii elektricheskoi energii v elektricheskii seti peremennogo toka [Increase of efficiency of electric energy recovery into AC electrical networks]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2019. Vol. 62, No. 2. Pp. 86–97, DOI: 10.26731/1813- 9108.2019.2(62). 86–97
9. Puzina E.Yu. Estimation of the residual life of traction transformers of the Northern Route of the ESRD. *Transport-2013: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference.* - Rostov-on-Don: Publishing house RGUPS, 2013. 173-175.
10. Puzina E.Yu., Tuigunova A.G., Khudonogov I.A. Monitoring systems for power transformers of traction substations. *Irkutsk*, 2020. -- 184 p.
11. Zakaryukin VP Modeling of non-sinusoidal modes of traction power supply systems equipped with reactive power compensation installations / VP Zakaryukin, AV Kryukov, AP Kutsy // *Modern technologies. System analysis. Modeling.* - 2018. - No. 1 (57). - S. 72-79.
12. Voronina E.V., Kutsy A.P. Improving the quality of electrical energy in power supply systems of railways // *Young Science of Siberia.* 2021. No. 2 (12). S. 118-125.
13. Cherepanov A.V., Kutsy A.P. The use of controlled sources of reactive power in traction power supply systems. *Bulletin of the Irkutsk State Technical University.* 2016.Vol. 20.No. 9 (116). S. 103-110.
14. Arsentyev G.O., Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Kutsy A.P., Nguyen V.Kh., Cherepanov A.V., Chan Z.Kh., 2019. Management of modes of power supply systems railways based on smart grid technologies (SMART GRID). *Irkutsk: IrGUPS*, pp: 412.

15. Grigoriev N.P., Klykov M.S., Trofimovich P.N., Tikhomirov V.A. Reduction of electrical energy losses of power transformers of 25 kv traction substations // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region, SibTrans 2019. 2020. С. 012060.

16. Cherepanov A.V., Kutsy A.P., Khisamov A.R. Influence of the modes of external power supply systems on the throughput of the traction power supply system // Transport infrastructure of the Siberian region. 2019. Vol. 2. P. 8-14.

#### **Информация об авторах**

*Бардушко Александр Юрьевич* – студентка группы СОД 1-21-1, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: kutsyi\_ap@irgups.ru

*Куцкий Антон Павлович* – инженер УНИР, ст. преподаватель кафедры «Электроэнергетики транспорта», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: kutsyi\_ap@irgups.ru

#### **Authors**

*Bardushko Alexander Yuryevich* – student of the TSS 1-21-1 group, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: kutsyi\_ap@irgups.ru

*Kutsyi Anton Pavlovich* – engineer UNIR, senior lecturer of the Department of Electric Power of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: kutsyi\_ap@irgups.ru