

## Моделирование ремонтных режимов работы системы электроснабжения участка Юрты – Нижнеудинск при реализации систем интервального регулирования

Е.Ю. Пузина<sup>1,2</sup>✉

<sup>1</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

<sup>2</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

✉lena-rus05@mail.ru

### Резюме

В настоящее время в ОАО «РЖД» актуальной задачей, направленной на повышение пропускной способности существующих электрифицированных направлений железных дорог, является внедрение современных систем интервального регулирования, способствующих существенному снижению межпоездных интервалов. К таким системам относят микропроцессорную систему с тональными рельсовыми цепями с центральным размещением аппаратуры в шкафом варианте и виртуальную сцепку. Реализация названных систем несомненно вызовет значительный рост нагрузок в системах тягового и внешнего электроснабжения. Данный факт, в свою очередь, приведет к увеличению падения напряжения в контактной сети, возможно, сопровождающемуся снижением уровня напряжения на токоприемниках локомотивов до недопустимого значения. Обострение подобной ситуации проявится в ремонтных режимах системы внешнего электроснабжения особенно ярко, поскольку отключение ее звеньев приводит к еще большему росту нагрузок в остающихся в работе линиях электропередачи и силовых трансформаторах районных подстанций. Развитие этой ситуации будет способствовать также существенному снижению уровня напряжения в контактной сети. Эти факты необходимо учитывать и в связи с тем, что большая часть линий электропередачи и оборудования подстанций к настоящему времени имеет значительный износ. В рамках представленной работы выполнена оценка влияния ремонтных режимов системы внешнего электроснабжения на условия работы системы тягового электроснабжения на одном из сложных по профилю участков Восточно-Сибирской железной дороги при реализации указанных систем интервального регулирования. Разработаны предложения по техническому перевооружению системы электроснабжения исследуемого участка.

### Ключевые слова

системы интервального регулирования, силовые трансформаторы, ремонтные режимы, линии электропередачи, участок Юрты – Нижнеудинск

### Для цитирования

Пузина Е.Ю. Моделирование ремонтных режимов работы системы электроснабжения участка Юрты-Нижнеудинск при реализации систем интервального регулирования / Е.Ю. Пузина // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 3 (75). – С. 181–194. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.3(75).181-194.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 5.09.2022 г.; поступила после рецензирования: 15.09.2022 г.; принята к публикации: 16.09.2022 г.

## Modeling of repair operation modes of the power supply system of the Yurts – Nizhneudinsk section during the implementation of interval control systems

Е.Yu. Puzina<sup>1,2</sup>✉

<sup>1</sup>Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

<sup>2</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation

### Abstract

At present in JSC «Russian Railways», an urgent task aimed at increasing the capacity of existing electrified railway lines is the introduction of modern interval control systems that contribute to a significant reduction in inter-train intervals. Such systems include a microprocessor system with tonal rail circuits with central equipment placement of a cabinet version and a virtual coupling. The implementation of such systems will undoubtedly cause a significant loads increase both in the traction and the external power supply system. This fact, in turn, result in an increase in the voltage drop in the contact network, possibly accompanied by a decrease in the voltage level on the current collectors of locomotives to an unacceptable value. The aggravation of such a situation will manifest itself in the repair modes of the external power supply system especially vividly, since the disconnection of its links leads to an even greater increase in loads in the remaining power transmission lines and power transformers of district substations. The development of this situation will contribute to an even more significant reduction in the voltage level in the

contact network. These facts must also be taken into account due to the fact that most of the power transmission lines and substation equipment currently have significant wear. Within this work, an assessment of the impact of repair modes of the external power supply system on the operating conditions of the traction power supply system at one of the difficult sections of the East Siberian Railway under the implementation of these interval control systems was carried out. Proposals have been developed for the technical re-equipment of the power supply system of the studied area.

### Keywords

Interval control systems, power transformers, repair modes, power transmission lines, region Yurty – Nizhneudinsk

### For citation

Puzina E.Yu. Modelirovanie remontnykh rezhimov raboty sistemy elektrosnabzheniya uchastka Yurty-Nizhneudinsk pri realizatsii sistem interval'nogo regulirovaniya [Modeling of repair operation modes of the power supply system of the Yurts-Nizhneudinsk section during the implementation of interval control systems]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 3 (75), pp. 181–194. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.3(75).181-194.

### Article Info

Received: September 5, 2022; revised: September 15, 2022; accepted: September 16, 2022.

### Введение

Моделирование систем электроснабжения с помощью программно-вычислительных комплексов позволяет оценить параметры нормальных и ремонтных режимов при существующих нагрузках и спрогнозировать необходимость их усиления при увеличении нагрузок [1, 2].

Выполнение данных задач особенно актуально применительно к системам электроснабжения железных дорог, поскольку в настоящее время осуществляется организация движения не только тяжеловесных поездов массой 7 100 т, но и на отдельных участках российских железных дорог сдвоенных поездов общей массой 14 200 т. Столь значительные массы грузовых поездов приводят к возникновению повышенных нагрузок на все элементы как системы тягового электроснабжения (СТЭ) (ТП – тяговые подстанции, КС – контактная сеть), так и на линии электропередачи (ЛЭП) и силовое оборудование подстанций системы внешнего электроснабжения (СВЭ) [3–7].

При наличии существенного многолетнего износа силового оборудования и ЛЭП на отдельных участках систем электроснабжения указанная ситуация особенно ярко может проявиться в их ремонтных режимах работы, когда элементы систем электроснабжения, остающиеся в работе, испытывают перегрузки. Во избежание развития аварий в подобных ситуациях и для обеспечения безопасности перевозочного процесса необходим предварительный анализ параметров ремонтных режимов при возрастающих нагрузках и при необходимости принятие решений о техническом перевооружении систем электроснабжения [8–11].

### Описание проблемной ситуации и постановка задачи

Выполнено моделирование систем внешнего и тягового электроснабжения участка Юрты – Нижнеудинск в программно-вычислительном комплексе (ПВК) Fazopord с целью оценки влияния ремонтных режимов в СВЭ на пропускную способность СТЭ при реализации двух современных систем интервального регулирования: автоматической локомотивной сигнализации основной (АЛСО), построенной на базе аппаратуры микропроцессорной системы с тональными рельсовыми цепями с центральным размещением аппаратуры в шкафом варианте (АБТЦ-МШ) и виртуальной сцепки (ВСЦ) [12–18].

Использование системы АЛСО на базе аппаратуры АБТЦ-МШ позволяет сократить межпоездной интервал за счет применения сигнализации без светофоров с подвижными блоками участками.

Технология виртуальной сцепки позволяет организовать движение пакета поездов (сдвоенной пары) на минимально безопасном расстоянии с отслеживанием информации между ними по цифровому радиоканалу.

Обе технологии интервального регулирования за счет значительного сокращения межпоездного интервала при перемещении тяжеловесных поездов существенно увеличивают загрузку на системы электроснабжения, особенно в ремонтных режимах работы, а также на звенья СВЭ, что может привести к невозможности осуществления перевозочного процесса. Вероятность таких ситуаций высока на участках, характеризующихся сложным профилем пути.

Исследуемый участок Юрты – Нижнеудинск характеризуется горным профилем с

затяжными подъемами в трех зонах. В зоне Тайшет – Восток – Облепиха два подъема: с максимальной высотой уклона 7,2 и 7,1 ‰, протяженностью 6 и 7 км соответственно. В зоне Замзор – Ук максимальная высота уклона составляет 8,2 ‰, протяженность 17 км. В зоне Ук – Нижнеудинск максимальная высота уклона составляет 8,4 ‰, протяженность 13 км.

В связи с имеющейся характеристикой профиля исследуемого участка и планируемым внедрением в его рамках систем АБТЦ-МШ и ВСЦ задача анализа ремонтных режимов работы СВЭ представляется актуальной.

### Оценка влияния ремонтных режимов работы системы внешнего электроснабжения на пропускную способность системы тягового электроснабжения участка Юрты – Нижнеудинск

Электроснабжение ТП участка Юрты – Нижнеудинск производится от сети 110 кВ, которая, в свою очередь, получает питание от подстанций энергосистемы Тайшет 500/110 кВ и Тулун 220/110 кВ. Схема электроснабжения по сети 110 кВ содержит тяговые подстанции Тайшет, Облепиха, Замзор, Ук, Нижнеудинск. Линии участка Юрты – Нижнеудинск одноцепные.

Для выполнения задачи моделирования исследуемого участка разработана его расчетная схема с целью применения в ПВК Fazonord, и сформированы два «пакета» движения тяжеловесных поездов:

1. Для исследования технологии АБТЦ-МШ (в четном направлении – восемь поездов массой 7 100 т, движущихся с интервалом 6 мин.; в нечетном направлении – тридцать поездов массой 3 100 т, движущихся с интервалом 12 мин.).

2. Для исследования технологии ВСЦ (в четном направлении – три поезда массой 6 100 т, движущихся с интервалом 8 мин., далее два поезда массой 7 100 т, движущихся по ВСЦ с интервалом 6 мин. и следом три поезда массой 6 100 т, движущихся с интервалом 8 мин.; в нечетном направлении – тридцать поездов массой 3 100 т, движущихся с интервалом 12 мин.).

В расчетах рассмотрены три наиболее тяжелых для исследуемого участка ремонтных режима:

- разрыв транзита 110 кВ Тайшет – Тулун на ТП Нижнеудинск;
- отключение воздушной линии (ВЛ) Тайшет – Силикатная;
- отключение ВЛ Замзор – Топорок.

Модель реализации первого ремонтного режи-

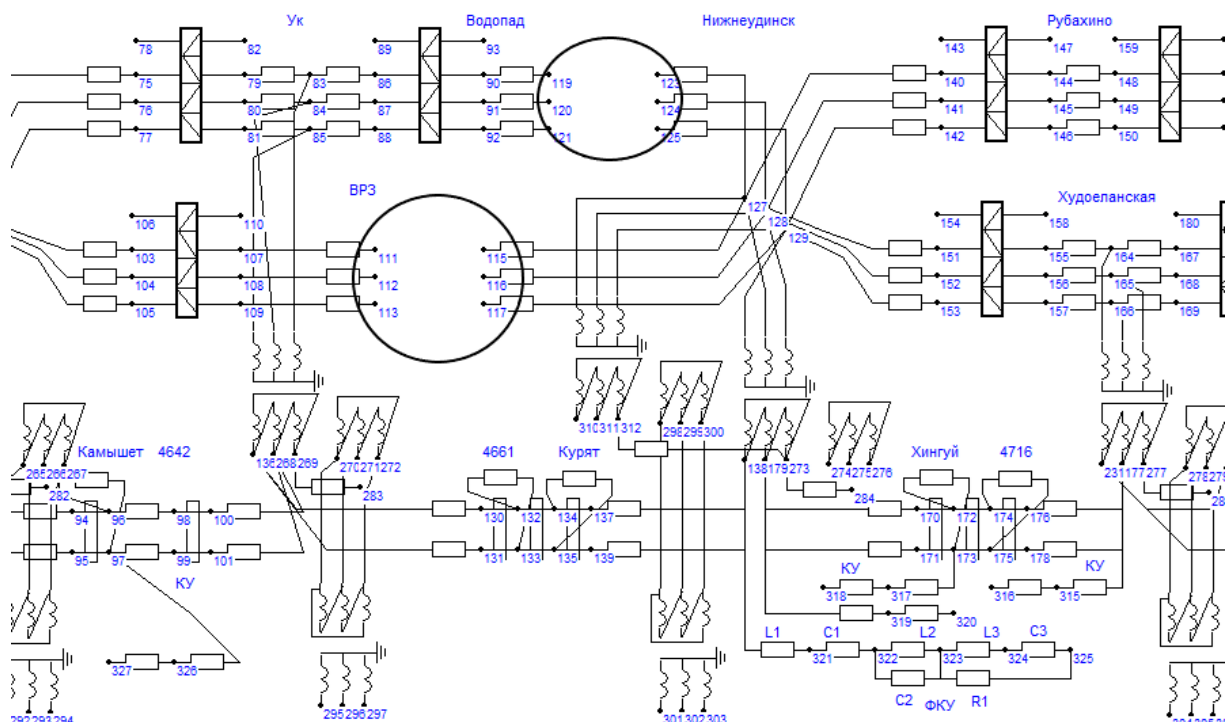
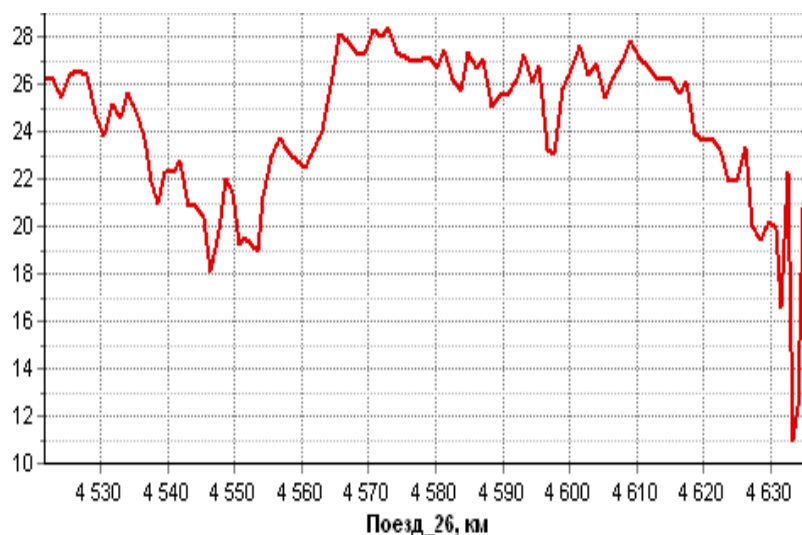


Рис. 1. Модель реализации первого ремонтного режима  
Fig. 1. Implementation model of the first repair mode

ма работы представлена на рис. 1. По результатам расчета получили при использовании системы АБТЦ-МШ график уровня напряжения в КС для тяжеловесного поезда четного направления движения, который представлен на рис. 2. Данные по нескольким поездам для систем АБТЦ-МШ и ВСЦ представлены в табл. 1.

Данные о загрузке силовых трансформаторов представлены в табл. 2.

Модель реализации второго ремонтного режима представлена на рис. 3. Полученный при этом график уровня напряжения в КС для тяжеловесного поезда четного направления при использовании АБТЦ-МШ представлен на



**Рис. 2.** График изменения напряжения четного поезда в первом ремонтном режиме  
**Fig. 2.** Graph of the voltage change of the even train in the first repair mode

**Таблица 1.** Параметры режима работы контактной сети в четном и нечетном направлениях (первый ремонтный режим)

**Table 1.** Parameters of the contact network operation mode in even and odd directions (first repair mode)

Тип поезда Train type	Минимальное напряжение в контактной сети, кВ Minimum voltage in the contact network, kV		Максимальный ток проводов контактной сети, А Maximum wire current contact network, A	
	АБТЦ-МШ	ВСЦ	АБТЦ-МШ	ВСЦ
Четный even	11	12,0	934,3	875,3
Четный even	12,2	17,3	929,2	883,4
Нечетный odd	15,1	19,1	411,4	411,8
Нечетный odd	17,3	15,4	405,3	425,3

**Таблица 2.** Коэффициенты загрузки трансформаторов в первом ремонтном режиме  
**Table 2.** Load factors of transformers in the first repair mode

Наименование тяговой подстанции Name of the traction substation	Коэффициент загрузки трансформаторов Transformer load factor	
	АБТЦ-МШ	ВСЦ
Тайшет	1,21	1,19
Облепиха	1,14	1,12
Замзор	2,05	2,01
Ук	2,16	2,07
Нижнеудинск	2,01	1,99

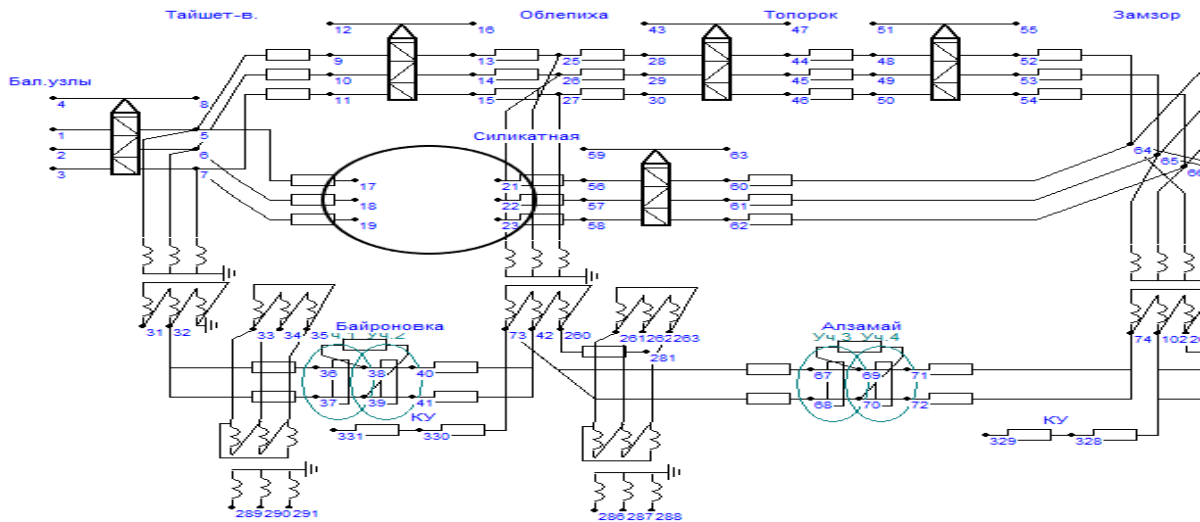
рис. 4. Данные о нескольких поездах в случае реализации обеих систем интервального регулирования представлены в табл. 3.

Данные о загрузке силовых трансформаторов во втором ремонтном режиме представлены в табл. 4. Модель третьего ремонтного

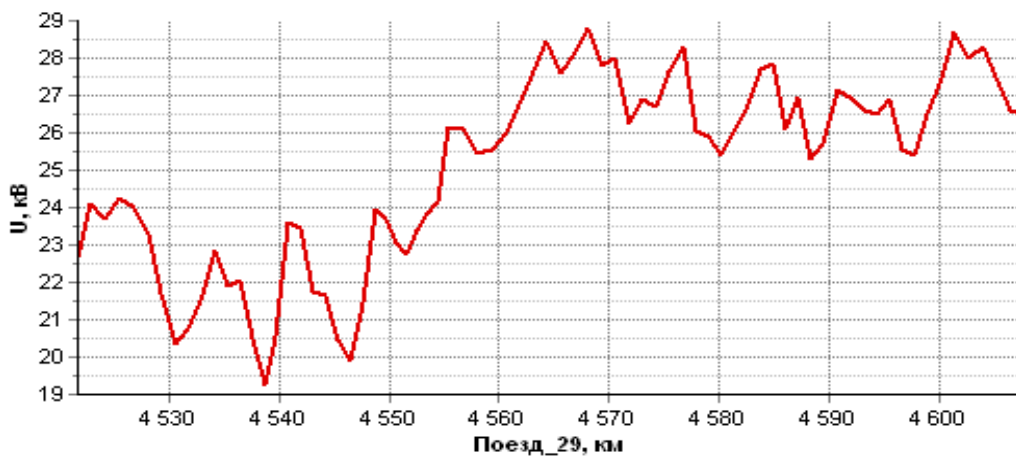
**Таблица 3.** Параметры режима работы контактной сети в четном и нечетном направлениях (второй ремонтный режим)

**Table 3.** Parameters of the contact network operation mode in even and odd directions (second repair mode)

Тип поезда Train type	Минимальное напряжение в контактной сети, кВ Minimum voltage in the contact network, kV		Максимальный ток проводов контактной сети, А The maximum current of the wires of the contact network, A	
	АБТЦ-МШ	ВСЦ	АБТЦ-МШ	ВСЦ
Четный even	19,2	19,0	913,3	869,3
Четный even	17,95	17,9	915,2	881,4
Нечетный odd	19,5	20,1	395,7	405,8
Нечетный odd	18,7	19,7	401,5	437,5



**Рис. 3.** Модель реализации второго ремонтного режима  
**Fig. 3.** Implementation model of the second repair mode



**Рис. 4.** График изменения напряжения четного поезда при втором ремонтном режиме  
**Fig. 4.** Graph of the voltage change of an even train in the second repair mode

режима представлена на рис. 5.

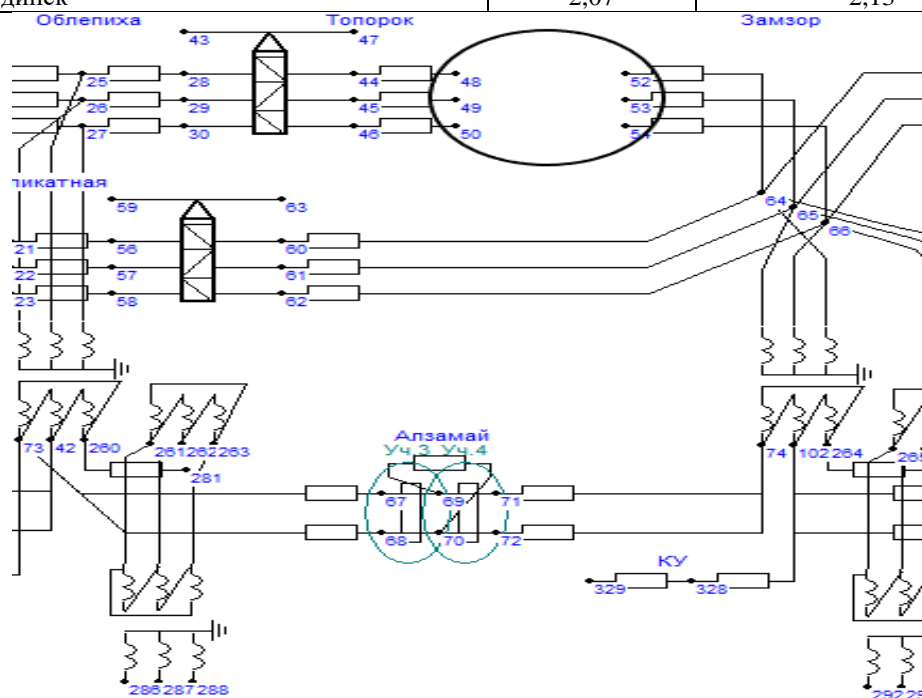
При третьем ремонтном режиме получен график уровня напряжения в КС для тяжеловесного поезда четного направления при использо-

вании АБТЦ-МШ (рис. 6). Данные о нескольких поездах представлены в табл. 5, а о загрузке силовых трансформаторов в третьем ремонтном режиме – в табл. 6.

**Таблица 4.** Коэффициенты загрузки трансформаторов в ремонтном режиме 2

**Table 4.** Load factors of transformers in repair mode 2

Наименование тяговой подстанции Name of traction substation	Коэффициент загрузки трансформаторов Load factor transformers	
	АБТЦ-МШ	ВСЦ
Тайшет	1,17	1,18
Облепиха	1,15	1,19
Замзор	1,99	1,97
Ук	2,01	2,10
Нижеудинск	2,07	2,13



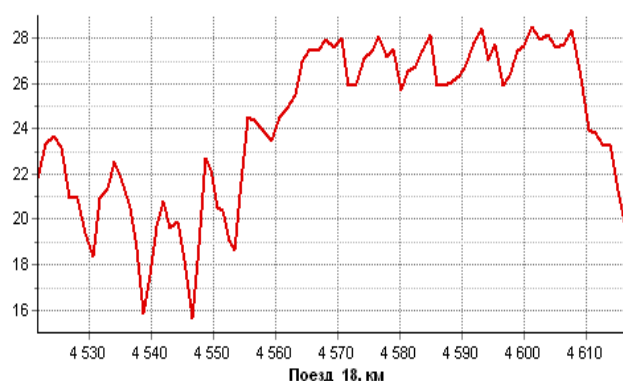
**Рис. 5.** Модель реализации третьего ремонтного режима

**Fig. 5.** Implementation model of the third repair mode

**Таблица 5.** Минимальное напряжение в контактной сети в четном и нечетном направлениях (ремонтный режим 3)

**Table 5.** Minimum voltage in the contact network in even and odd directions (repair mode 3)

Тип поезда Train type	Минимальное напряжение в контактной сети, кВ Minimum voltage in the contact network, kV		Максимальный ток проводов контактной сети, А The maximum current in the wires of the contact network, A	
	АБТЦ-МШ	ВСЦ	АБТЦ-МШ	ВСЦ
	Четный even	15,8	16,5	905,3
Четный even	16,2	14,2	909,4	864,5
Нечетный odd	17,9	18,1	389,8	427,8
Нечетный odd	19,1	17,9	393,5	482,5



**Рис. 6.** График изменения напряжения четного поезда при третьем ремонтном режиме  
**Fig. 6.** Graph of the change in the voltage of an even train in the third repair mode

**Таблица 6.** Коэффициенты загрузки трансформаторов в третьем ремонтном режиме  
**Table 6.** Load factors of transformers in the third repair mode

Наименование тяговой подстанции Name of the traction substation	Коэффициент загрузки трансформаторов Load factors of transformers in the third repair mode	
	АБТЦ-МШ	ВСЦ
Тайшет	1,23	1,21
Облепиха	1,17	1,19
Замзор	1,99	2,01
Ук	1,95	2,05
Нижеудинск	1,79	1,75

По результатам расчета параметров трех различных ремонтных режимов видно, что напряжение в КС не соответствует минимально допустимому значению 21 кВ.

Так, по системе АБТЦ-МШ при первом ремонтном режиме в четном направлении оно составило 11,0 кВ, в нечетном – 15,1 кВ; при втором ремонтном режиме в четном – 19,2 кВ, в нечетном – 18,7 кВ; при третьем ремонтном режиме в четном – 15,8 кВ, в нечетном – 17,9 кВ. При использовании системы ВСЦ при первом ремонтном режиме в четном направлении – 12,0 кВ, в нечетном – 15,4 кВ; при втором ремонтном режиме в четном – 17,9 кВ, в нечетном – 19,7 кВ; при третьем ремонтном режиме в четном – 14,2 кВ, в нечетном – 17,9 кВ.

Из результатов расчета видим, что ток контактной сети хотя и не превышает предельно допустимых значений, однако близится к ним. Аналогичная ситуация с током ВЛ в СВЭ.

Следовательно, можно сделать вывод, что необходимо провести усиление системы электроснабжения исследуемого участка.

### **Предложения по техническому перевооружению систем электроснабжения**

Для исследуемого в работе участка выполнено моделирование в ПВК Fazonord по от-

дельности таких способов усиления СВЭ и СТЭ, как:

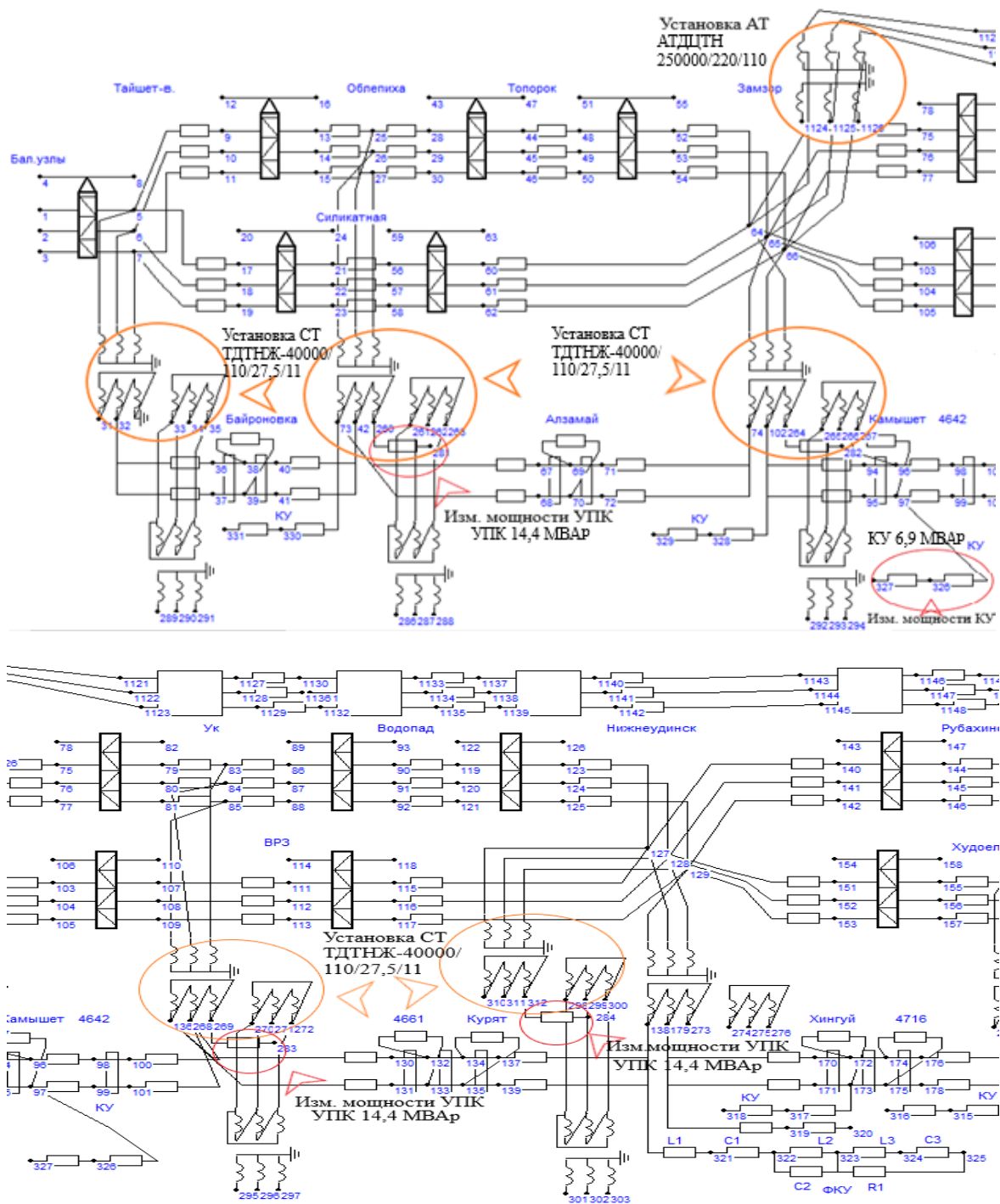
- установка автотрансформатора мощностью 250 МВА на ТП Замзор для связи с ЛЭП 220 кВ;
- установка батареи статических конденсаторов мощностью 25 МВАр на ТП Нижеудинск;
- установка дополнительного силового трансформатора (СТ) на ряде перегруженных ТП;
- монтаж усиливающего и экранирующего проводов в КС на лимитирующих участках;
- изменение мощности имеющихся устройств продольной компенсации (УПК);
- изменение мощности имеющихся устройств параллельной компенсации (КУ) [19–22].

Результаты моделирования показали, что ни один из рассмотренных способов усиления в отдельности не приводит нормируемые параметры СВЭ и СТЭ к допустимым значениям в ремонтных режимах. В дальнейшем выполнено исследование множества комбинированных вариантов усиления. Полученные при этом результаты позволили выявить оптимальный комбинированный вариант усиления СВЭ и СТЭ:

- установка АТ 220/110 кВ мощностью 250 МВА на ТП Замзор;

– монтаж дополнительного СТ на всех ТП участка;  
 – изменение мощности КУ на ПС Камышет с 5,8 до 6,9 МВАр;  
 – изменение мощности УПК на ТП Облепиха, Ук, Нижнеудинск до 14,4 МВАр.

Разработанная модель исследуемого участка с учетом предложенных средств усиления представлена на рис. 7. Результаты моделирования приведены в табл. 7–9. Полученные при использовании разных систем интервального регулирования результаты представлены на рис. 8–10.



**Рис. 7.** Модель исследуемого участка с учетом предложенных средств усиления  
**Fig. 7.** Model of the studied area, taking into account the proposed amplification means



**Таблица 7.** Сравнение напряжения и тока контактной сети при ремонтных режимах работы для систем АБТЦ-МШ и ВСЦ  
**Table 7.** Comparison of voltage and current of the contact network during repair modes of operation for systems ABTTS-MSH and VSTS

Ремонтный режим Repair mode	Тип поезда Train type	Минимальное напряжение в контактной сети, кВ Minimum voltage in the contact network, kV		Максимальный ток проводов контактной сети, А Maximum wire current in contact network	
		АБТЦ-МШ	ВСЦ	АБТЦ-МШ	ВСЦ
Первый, 1st	Четный even	21,3	21,4	791,4	761,3
	Нечетный odd	21,4	21,8	395,1	352,7
Второй, 2nd	Четный even	21,5	22,0	753,2	732,8
	Нечетный odd	21,5	22,4	357,6	321,7
Третий, 3d	Четный even	21,8	21,9	687,5	631,2
	Нечетный odd	22,1	22,3	312,7	305,9

**Таблица 8.** Сравнение тока воздушной линии при различных ремонтных режимах работы для системы АБТЦ-МШ и ВСЦ

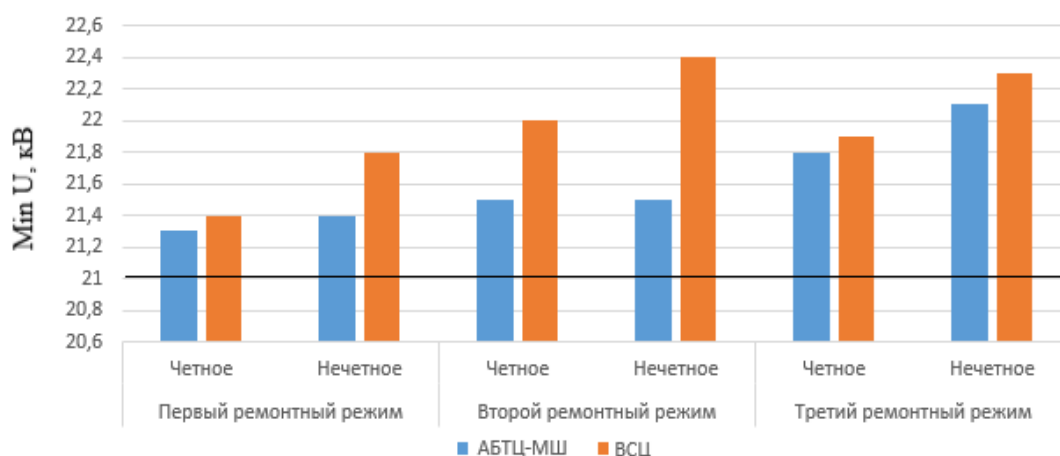
**Table 8.** Comparison of overhead line current at various repair operating modes for the system ABTTS-MSH and VSTS

Ремонтный режим Repair mode	Участок с максимальным током на воздушной линии Section with maximum overhead line current	Максимальный ток воздушной линии, А Maximum current in overhead line, A	
		АБТЦ-МШ	ВСЦ
Первый, 1st	Замзор – ВРЗ	481,8	475,4
Второй, 2nd	Тайшет – Облепиha	450,3	431,8
Третий, 3d	Ук – Водопад	434,1	412,8

**Таблица 9.** Коэффициенты загрузки трансформаторов при различных ремонтных режимах работы для системы АБТЦ-МШ и ВСЦ

**Table 9.** Transformer load factors for various repair modes of operation for the system ABTTS-MSH and VSTS

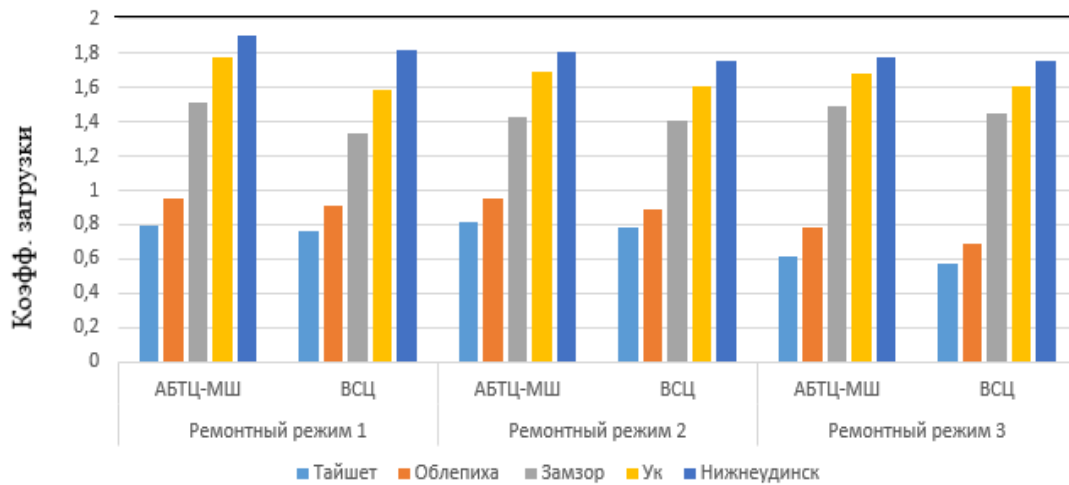
Тяговая подстанция Traction substation	Коэффициент загрузки силового трансформатора Power transformer load factor					
	Первый режим работы first operation mode		Второй режим работы second operation mode		Третий режим работы third operation mode	
	АБТЦ-МШ	ВСЦ	АБТЦ-МШ	ВСЦ	АБТЦ-МШ	ВСЦ
Тайшет	0,79	0,76	0,82	0,78	0,61	0,57
Облепиha	0,95	0,91	0,95	0,89	0,78	0,69
Замзор	1,51	1,33	1,43	1,41	1,49	1,45
Ук	1,78	1,59	1,69	1,61	1,68	1,61
Нижнеудинск	1,90	1,82	1,81	1,75	1,78	1,75



**Рис. 8.** Гистограмма напряжения в контактной сети при комбинированном способе усиления по системам АБТЦ-МШ и ВСЦ

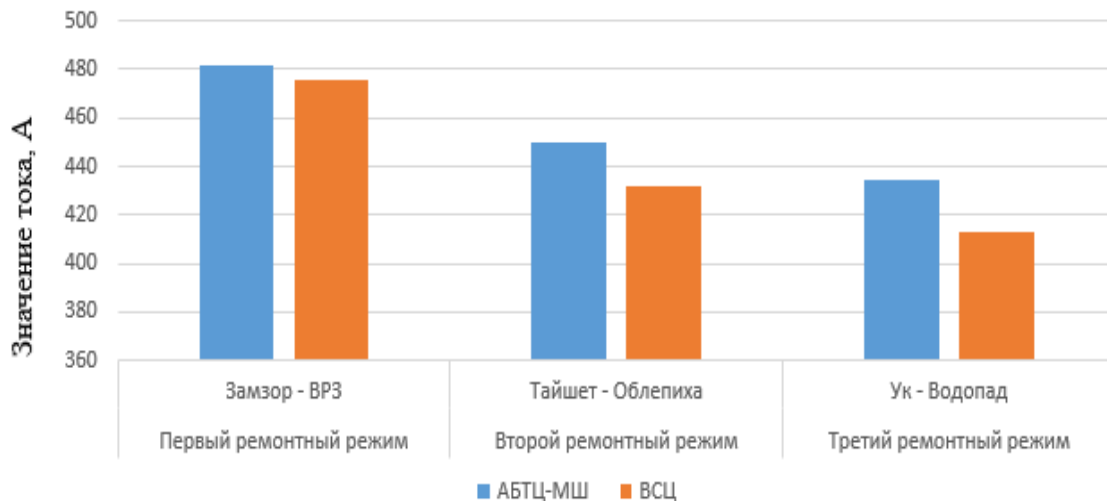
**Fig. 8.** Voltage histogram in the contact network with combined

method of amplification by systems ABTTS-MSH and VSTS



**Рис. 9.** Гистограмма изменения коэффициента загрузки силового трансформатора при комбинированном способе усиления по системам АБТЦ-МШ и ВСЦ

**Fig. 9.** Histogram of power transformer load factor change with the combined method of amplification by systems ABTTS-MSH and VSTS



**Рис. 10.** Гистограмма изменения тока воздушной линии при комбинированном способе усиления по системам АБТЦ-МШ и ВСЦ

**Fig. 10.** Histogram of overhead line current change with combined method of amplification by systems ABTTS-MSH and VSTS

В случае применения предложенного варианта усиления повышается напряжение в КС, тем самым увеличивается пропускная способность участка Юрты – Нижнеудинск. Напряжение на токоприемнике электровоза не менее 21 кВ и ток не более 880 А. Коэффициент загрузки трансформаторов не превышает значение, равное 2, во всех режимах. Ток ВЛ в СВЭ не превышает допустимого значения для ВЛ 110 кВ марки АС-185-510 А, для ВЛ 110 кВ марки АС-300-710 А.

Проведена сравнительная оценка пропускной способности поездов, движение которых организовано по системам АБТЦ-МШ и ВСЦ. По результатам расчета видно, что напряжение на токоприемнике по системе ВСЦ выше на 2,26 %, ток в КС ниже на 2,18 %, ток ВЛ ниже на 1,79 %, коэффициенты загрузки силового трансформатора на ТП ниже на 1,5–2 %. Для обеспечения требуемой пропускной способности устройств тягового электроснабжения

наиболее благоприятным является движение поездов, сформированное по системе ВСЦ.

Полученные результаты исследования ремонтных режимов подтвердили высокую эффективность использования разработанных предложений по техническому перевооружению системы электроснабжения участка Юрты – Нижнеудинск, поскольку ни один из контролируемых параметров режимов работы не выходит за пределы нормируемых значений.

### Заключение

В ходе проведенного исследования выявлено, что ремонтные режимы СВЭ на участке Юрты – Нижнеудинск оказывают значительное негативное влияние на пропускную способность СТЭ, поскольку уровень напряжения в КС на отдельных лимитирующих участках опускается до 11 кВ в наиболее тяжелом из ремонтных режимов, не позволяя осуществлять движение поездов. В связи с этим разработаны предложения по усилению СВЭ и СТЭ исследуемого участка. Анализ результатов моделирования различных комбинаций средств усиления позволил выявить оптимальный вариант

одновременного технического перевооружения СВЭ и СТЭ: установка АТ 220/110 кВ мощностью 250 МВА на ТП Замзор; монтаж дополнительного СТ на всех ТП участка; изменение мощности КУ на ПС Камышет с 5,8 до 6,9 МВАр; изменение мощности УПК на ТП Облепиха, Ук, Нижнеудинск до 14,4 МВАр.

Сравнение результатов применения двух систем интервального регулирования позволило сделать вывод о возможности реализации обеих систем на исследуемом участке, однако лучшие показатели для СТЭ обеспечивает использование ВСЦ.

Таким образом, благодаря внедрению предложенных средств усиления при росте объема грузоперевозок к 2030 г. на исследуемом участке будет обеспечена необходимая пропускная способность с учетом внедрения современных систем интервального регулирования, способствуя снижению потерь электроэнергии в системе электроснабжения, росту энергоэффективности работы железнодорожного транспорта [23–26] и развитию экономики страны в целом.

### Список литературы

1. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Степанов А.Д. Экспериментальная проверка математических моделей электрических систем, построенных на основе фазных координат // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2004. № 4(20). С. 152–157.
2. Potapov V.V., Suslov K.V., Kostina K.V. Theoretical Bases of Electrical Engineering. Irkutsk : Irkutsk National Research Technical University, 2020. 158 p.
3. Cherepanov A., Kutsyi A. Modeling of tractive power supply systems for heavy-tonnage trains operation // International Russian Automation Conference, RusAutoCon2018. С.8501734.
4. Швердин И.Н., Шаманов В.И., Трофимов Ю.А. Влияние тяжеловесных поездов на рельсовые цепи и АЛС // Автоматика, связь, информатика. 2004. № 8. С. 24.
5. Алексеев В.А., Пузина Е.Ю. Анализ повреждений измерительных трансформаторов на тяговых подстанциях ВСЖД // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2009. Т. 2. С. 4–9.
6. К повышению надежности устройств контактной сети / А.С. Есауленко, В.П. Ступицкий, В.А. Тихомиров и др. // Молодая наука Сибири. 2021. № 2 (12). С. 200–205.
7. Влияние тяжеловесных поездов на рельсовые цепи и АЛСН / И.Н. Швердин, В.И. Шаманов, Ю.А. Трофимов и др. // Автоматика, связь, информатика. 2006. № 10. С. 16–19.
8. Reliability Analysis of Power Equipment of Traction Rolling Stock Within the Eastern Region / A.M. Khudonogov, I.A. Khudonogov, E.Y. Dulskiy et al // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region. 2020. Vol. 760. С. 012018. DOI: 10.1088/1757-899X/760/1/012018.
9. Reduction of electrical energy losses of power transformer of 25 kV traction substations / N.P. Grigoriev, M.S. Klykov, V.A. Tikhomirov et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 760. С. 012060. DOI 10.1088/1757-899X/760/1/012060.
10. Partial Discharges Pattern Recognition of Transformer Defect Model by LBP & HOG Features / K. Firuzi, M. Vakilian, B. Toan Phung // Power Delivery IEEE Transactions on. 2019. Vol. 34. № 2. P. 542-550. DOI:10.1109/TPWRD.2018.2872820.
11. Обеспечение безопасности сложных технических систем (технологические подходы) / С.В. Елисейев, В.Е. Гозбенко, Н.М. Быкова и др. // Деп. в ВИНТИ РАН 17.04.2008, № 328-B2008.
12. Черепанов А.В., Куцый А.П., Есауленко А.С. Применение технологии виртуальной сцепки для поездов повышенной массы // Молодая наука Сибири. 2020. № 2 (8). С. 191–199.
13. Research on intelligent load transfer strategy based on distribution automation / C. Li, L. Zhang, J. Sheng et al. // China International Conference on Electricity Distribution (CICED). Xi'an, 2016. P. 13. DOI:10.1088/1742-6596/1601/2/022026.
14. Yue Han, Qiang Gao, Xuebin Li. Research on the Application of Modern Power System Based on Automatic Control Technology // IEEE. 4th International Conference on Modeling and Simulation (MAS). 2015. DOI 10.1109/MAS.2015.16.

15. Пулятков А.В., Трофимов Ю.А., Скоробогатов М.Э. Комплексные решения по повышению устойчивости работы устройств автоматической локомотивной сигнализации на участках с электротягой переменного тока // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2015. Т. 1. С. 328–332.

16. Пулятков А.В., Скоробогатов М.Э., Халиманов Д.С. Исследование влияния электромагнитных помех на работу устройств авто-матической локомотивной сигнализации // Образование – Наука – Производство : материалы Всерос. науч.-практ. конф. Чита, 2018. Т. 1. С. 191–198.

17. Создание аппаратно-программного комплекса увязки устройств полуавтоматической блокировки с электрической централизацией на международном стыке Забайкальск-Маньчжурия / А.Н. Сенотрусов, К.В. Менакер, М.В. Востриков и др. // Образование – Наука – Производство : материалы Всерос. науч.-практ. конф. Чита, 2018. Т. 1. С. 186–191.

18. Research on new traction power system using power flow controller and Vx connection transformer / Zh. Xiaozhou, Ch. Minwu, X. Shaofeng et al. // IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT). Birmingham, 2016. P. 111–115. DOI 10.1109/ICIRT.2016.7588719.

19. Puzina E.Yu., Cherniga M.Yu., Khudonogov I.A. Strengthening the power supply system of electrified railways, taking into account the use of interval control devices // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020. С. 9271385. DOI 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271385.

20. 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.

21. Черепанов А.В., Куцкий А.П. Использование управляемых источников реактивной мощности в системах тягового электроснабжения // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2016. Т. 20. № 9 (116). С. 103–110.

22. Пузина Е.Ю. Усиление системы тягового электроснабжения участка Чуро – Таксимо ВСЖД // Транспорт: наука, образование, производство : тр. междунар. науч.-практ. конф. Ростов-на-Дону. 2016. Т. 2. С. 306–310.

23. Королева А.В., Аршинов С.А. К вопросу об энергосбережении на метрополитене // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2013. № 11(82). С. 283–288.

24. Воинова Д.В., Пузина Е.Ю. Повышение эффективности функционирования энергетических объектов муниципальной инфраструктуры // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири : материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Иркутск, 2016. Т. 2. С. 170–175.

25. Захарова М.Ю., Пузина Е.Ю. Особенности проведения энергетического обследования нефтебазовых комплексов // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири : материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Иркутск, 2014. Т. 2. С. 235–240.

26. Сковородников А.А. Методы экономической оценки проектных решений по энергосбережению // Математическое моделирование и информационные технологии : материалы Семнадцатой Всерос. (девятой международной) науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2022». Иваново, 2022. Т. 6. С. 69.

## References

1. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Stepanov A.D. Eksperimental'naya proverka matematicheskikh modelei elektricheskikh sistem, postroennykh na osnove faznykh koordinat [Experimental verification of mathematical models of electrical systems based on phase coordinates]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Irkutsk State Technical University], 2004, no. 4(20), pp. 152–157.

2. Potapov V.V., Suslov K.V., Kostina K.V. Theoretical Bases of Electrical Engineering. Irkutsk : Irkutsk National Research Technical University, 2020. 158 p.

3. Cherepanov A., Kutsyi A. Modeling of tractive power supply systems for heavy-tonnage trains operation. *International Russian Automation Conference, RusAutoCon2018*, 2018, P.8501734.

4. Sheverdin I.N., Shamanov V.I., Trofimov Yu.A. Vliyaniye tyazhelovesnykh poezdov na rel'sovye tsepi i ALS [Influence of heavy trains on track circuits and ALS]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics], 2004, no. 8, p. 24.

5. Alekseenko V.A., Puzina E.Yu. Analiz povrezhdenii izmeritel'nykh transformatorov na tyagovykh podstantsiyakh VSZhD [Analysis of damage to measuring transformers at traction substations of the ESRW]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona* [Transport infrastructure of the Siberian region], 2009, vol. 2, pp. 4–9.

6. Esaulenko A.S., Stupitskii V.P., Tikhomirov V.A., Lobanov O.V. K povysheniyu nadezhnosti ustroystv kontaktnoi seti [To increase the reliability of contact network devices]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2021, no. 2(12), pp. 200–205.

7. Sheverdin I.N., Shamanov V.I., Trofimov Yu.A., Pulytkov A.V. Vliyaniye tyazhelovesnykh poezdov na rel'sovye tsepi i ALSN [Influence of heavy trains on track circuits and ALSN]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics], 2006, no. 10, pp. 16–19.

8. Khudonogov A.M., Khudonogov I.A., Dulskiy E.Y. et al. Reliability Analysis of Power Equipment of Traction Rolling Stock Within the Eastern Region. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region*, 2020, vol. 760, P. 012018. DOI: 10.1088/1757-899X/760/1/012018.

9. Grigoriev N.P., Klykov M.S., Tikhomirov V.A. et al. Reduction of electrical energy losses of power transformer of 25 kV traction substations. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 760, P. 012060. DOI 10.1088/1757-899X/760/1/012060.

10. Firuzi K., Vakilian M., Toan Phung B. Partial Discharges Pattern Recognition of Transformer Defect Model by LBP &

- HOG Features. *Power Delivery IEEE Transactions on*, 2019, vol. 34, no. 2, pp. 542–550. DOI:10.1109/TPWRD.2018.2872820.
11. Eliseev S.V., Gozbenko V.E., Bykova N.M., Sobolev V.I., Upry' R.Yu., Logunov A.S., Nasnikov D.N., Dyachenko A.A., Permyakov M.A., Moscovskikh A.O., Ermochenko Yu.V., Kashtanov Yu.B., Uzunov V.G., Zasyadko A.A. Obespechenie bezopasnosti slozhnykh tekhnicheskikh sistem (tekhnologicheskoe podkhody) [Mine ensuring the safety of complex technical systems (technological approach)]. *Deponirovannaya rukopis'* [Deposited manuscript]. VINITI RAN, no. 328-V2008, 17.04.2008.
12. Cherepanov A.V., Kutsyi A.P., Esaulenko A.S. Primenenie tekhnologii virtual'noi stepki dlya poezdov povyshennoi massy [Application of virtual coupling technology for high-mass trains]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2020, no. 2(8), pp. 191–199.
13. Li C., Zhang L., Sheng J. et al. Research on intelligent load transfer strategy based on distribution automation. *China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*. Xi'an, 2016, P. 13. DOI:10.1088/1742-6596/1601/2/022026.
14. Yue Han, Qiang Gao, Xuebin Li. Research on the Application of Modern Power System Based on Automatic Control Technology. *IEEE. 4th International Conference on Modeling and Simulation (MAS)*, 2015. DOI 10.1109/MAS.2015.16.
15. Pul'tyakov A.V., Trofimov Yu.A., Skorobogatov M.E. Kompleksnye resheniya po povysheniyu ustoichivosti raboty ustroystv avtomaticheskoi lokomotivnoi signalizatsii na uchastkakh s elektroyagoi peremennogo toka [Integrated solutions to improve the stability of automatic locomotive signaling devices in areas with alternating current electric traction]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona* [Transport infrastructure of the Siberian region], 2015, vol. 1, pp. 328–332.
16. Pulyakov A.V., Skorobogatov M.E., Khalimanov D.S. Issledovanie vliyaniya elektromagnitnykh pomekh na rabotu ustroystv avtomaticheskoi lokomotivnoi signalizatsii [Research of the influence of electromagnetic interference on the operation of automatic locomotive signaling devices]. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Obrazovanie – Nauka – Proizvodstvo»* [Proceedings of the All-Russian scientific-practical conference «Education – Science – Production»]. Chita, 2018, vol. 1, pp. 191–198.
17. Senotrusov A.N., Menaker K.V., Vostrikov M.V., Ezhikov D.V. Sozdanie apparatno-programmnogo kompleksa uvyazki ustroystv poluavtomaticheskoi blokirovki s elektricheskoi tsentralizatsiei na mezhdunarodnom styke Zabaikal'sk-Man'chzhuriya [Creation of a hard ware and soft ware complex for linking semi-automatic locking devices with electrical centralization at the international junction of Zabaikalsk-Manchzhuriya]. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Obrazovanie – Nauka – Proizvodstvo»* [Proceedings of the All-Russian scientific-practical conference «Education – Science – Production»]. Chita, 2018, vol. 1, pp. 186–191.
18. Xiaozhou Zh., Minwu Ch., Shaofeng X. et al. Research on new traction power system using power flow controller and Vx connection transformer. *IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT)*. Birmingham, 2016, pp. 111–115. DOI 10.1109/ICIRT.2016.7588719.
19. Puzina E.Yu., Cherniga M.Yu., Khudonogov I.A. Strengthening the power supply system of electrified railways, taking into account the use of interval control devices. *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020*. P. 9271385. DOI 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271385.
20. Cherepanov A.V., Kutsyi A.P., Khisamov A.R. Vliyanie rezhimov sistem vneshnego elektrosnabzheniya na propusknyuyu sposobnost' sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya [Influence of modes of external power supply systems on the capacity of the traction power supply system]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona* [Transport infrastructure of the Siberian region], 2019, vol. 2, pp. 8–14.
21. Cherepanov A.V., Kutsyi A. P. Ispol'zovanie upravlyaemykh istochnikov reaktivnoi moshchnosti v sistemakh tyagovogo elektrosnabzheniya [The use of controlled reactive power sources in traction power supply systems]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Irkutsk State Technical University], 2016, vol. 20, no. 9(116), pp. 103–110.
22. Puzina E.Yu. Usilenie sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya uchastka Churo – Taksimo VSZhD [Strengthening of the traction power supply system of the Churo-Taksimo section of the ESRW]. *Trudy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo»* [Proceedings of the International scientific and practical conference «Transport: science, education, production»]. Rostov-on-Don, 2016, vol. 2, pp. 306–310.
23. Koroleva A.V., Arshinov S.A. K voprosu ob energosberezhenii na metropolitene [On the issue of energy saving in the subway]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Irkutsk State Technical University], 2013, no. 11(82), pp. 283–288.
24. Voinova D.V., Puzina E.Yu. Povysenie effektivnosti funktsionirovaniya energeticheskikh ob'ektov munitsipal'noi infrastruktury [Improving the efficiency of the functioning of energy facilities of the municipal infrastructure]. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Povysenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyakh Sibiri»* [Proceedings of the All-Russian scientific-practical conference with international participation «Increasing the efficiency of production and use of energy in Siberia»]. Irkutsk, 2016, vol. 2, pp. 170–175.
25. Zakharova M.Yu., Puzina E.Yu. Osobennosti provedeniya energeticheskogo obsledovaniya neftebazovykh kompleksov [Features of the energy survey of oil and gas complexes]. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Povysenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyakh Sibiri»* [Proceedings of the All-Russian scientific-practical conference with international participation «Increasing the efficiency of production and use of energy in Siberia»]. Irkutsk, 2014, vol. 2, pp. 235–240.
26. Skovorodnikov A.A. Metody ekonomicheskoi otsenki proektnykh reshenii po energosberezheniyu [Methods of economic evaluation of design solutions for energy conservation]. *Materialy Semnadsatoi Vserossiiskoi (devyatoy mezhdunarodnoi) nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchennykh «Energiya-2022» (V 6 t)* [The seventeenth All-Russian (ninth international) scientific and technical conference of students, postgraduates and young scientists «Energy-2022» (in 6 vol.)]. Ivanovo, 2022, vol. 6, p. 69.

**Информация об авторах**

*Пузина Елена Юрьевна*, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; доцент кафедры электроснабжения и электротехники, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск; e-mail: lena-rus05@mail.ru.

**Information about the authors**

*Elena Yu. Puzina*, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electric Power Industry of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; Associate Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk; e-mail: lena-rus05@mail.ru.