

Разработка мероприятий по поддержанию необходимого уровня напряжения в контактной сети грузонапряженного участка Восточного полигона

Ю.Н. Макаренко, Е.Ю. Пузина✉

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

✉lana-rus05@mail.ru

Резюме

Одним из основных параметров режима работы системы тягового электроснабжения, уровень которого должен находиться в определенных пределах для обеспечения требуемой пропускной способности данной системы, является напряжение в контактной сети. Реальное значение этого параметра может отклоняться от требований нормативных документов в том случае, если на участке, особенно имеющем сложный профиль пути, изменяются условия организации перевозок: растет их объем, увеличиваются массы составов, уменьшаются межпоездные интервалы. Такая проблема в настоящее время характерна для многих дистанций электроснабжения Восточного полигона в связи с его модернизацией. С целью ее решения в программу развития Восточного полигона закладывается внедрение комплекса средств усиления системы тягового электроснабжения. Однако, несмотря на поэтапную реализацию этой программы, в силу наличия особенностей в системе внешнего электроснабжения (как в ее составе, так и в режимах работы, особенно ремонтных) необходимо более детальное изучение пропускной способности, особенно грузонапряженных участков полигона. В представленной работе приведены результаты исследования текущей пропускной способности участка ТШ–ТЛ на базе моделирования системы электроснабжения в программном комплексе Fazonord. Модели разработаны с учетом предложенных средств усиления. Анализ результатов подтвердил необходимость применения оптимального комбинированного способа усиления системы тягового электроснабжения, включающего такие средства усиления, как устройства продольной компенсации и компенсации реактивной мощности с плавным регулированием, установка дополнительного силового трансформатора на тяговых подстанциях.

Ключевые слова

системы тягового и внешнего электроснабжения, допустимое напряжение в контактной сети, устройство продольной компенсации, средства усиления систем электроснабжения, параллельная работа силовых трансформаторов

Для цитирования

Макаренко Ю.Н. Разработка мероприятий по поддержанию необходимого уровня напряжения в контактной сети грузонапряженного участка Восточного полигона / Ю.Н. Макаренко, Е.Ю. Пузина // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2025. № 3 (87). С. 40–52. DOI 10.26731/1813-9108.2025.3(87).40-52.

Информация о статье

поступила в редакцию: 11.09.2025 г.; поступила после рецензирования: 18.09.2025 г.; принята к публикации: 19.09.2025 г.

Development of measures to maintain the required voltage level in the contact network of the freight-intensive section of the Eastern polygon

Yu.N. Makarenko, E.Yu. Puzina✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉lana-rus05@mail.ru

Abstract

One of the main parameters of the operating mode of the traction power supply system, the level of which must be within certain limits in order to ensure the required throughput of this system, is the voltage in the contact network. The actual value of this parameter may deviate from the requirements of regulatory documents if on a section, especially one with a complex track profile, the conditions for organizing transportation change: their volume and mass of trains increase, and the intervals between trains decrease. This problem is currently characteristic of many power supply distances of the Eastern Polygon in connection with its development. To solve it, the implementation of a set of means for strengthening the traction power supply system is included in the development program of the Eastern Polygon. However, despite the step-by-step implementation of this program, due to the presence of features in the external power supply system, both in its composition and in operating modes, especially repair ones, a more detailed study of the throughput, particularly of freight-intensive sections of this testing ground is necessary. This work presents the results of a study of the current throughput of the TS-TL section based on modeling the power supply system of this section in the Fazonord PVK. The models are developed taking into account the proposed amplification means, an

analysis of the results obtained during the modeling is performed. The results of the analysis confirmed the need to use an optimal combined method of strengthening the traction power supply system, including such means of strengthening as devices for longitudinal compensation and reactive power compensation with smooth regulation, and the installation of an additional power transformer at traction substations.

Keywords

traction and external power supply systems, permissible voltage in the contact network, longitudinal compensation device, means of amplifying power supply systems, parallel operation of power transformers

For citation

Makarenko Yu.N., Puzina E.Yu. Razrabotka meropriyatiy po podderzhaniyu neobhodimogo urovnya napryazheniya v kontaktnoi seti gruzonapryazhennogo uchastka Vostochnogo poligona [Development of measures to maintain the required voltage level in the contact network of the freight-intensive section of the Eastern polygon]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2025. № 3(87). Pp. 40–52. DOI: 10.26731/1813-9108.2025.3(87).40-52.

Article Info

Received: September 11, 2025; Revised: September 18, 2025; Accepted: September 19, 2025.

Введение

ОАО «РЖД» является фундаментом российской экономики, обеспечивая до 45 % общего грузооборота страны. Важнейшую роль в обеспечении движения поездов играет система электроснабжения (СЭС), которая должна обеспечивать бесперебойное питание электроподвижного состава для поддержания надлежащего объема перевозок согласно планам развития экономики страны в целом и железнодорожного транспорта в частности. В связи с этим объекты железнодорожной энергетики должны постоянно совершенствоваться и при необходимости модернизироваться для поддержания минимальных межпоездных интервалов движения.

В настоящее время значительное внимание уделяется развитию Восточного полигона ОАО «РЖД», где размеры движения по главному ходу близки к предельным по нагрузке на основные узлы системы тягового электроснабжения (СТЭ) [1–3]. При этом необходимо учитывать и существенный износ тех устройств СТЭ, которые находятся в эксплуатации не один десяток лет [4–7]. Также повышенные нагрузки данной части СЭС оказывают значительное влияние на работу устройств системы внешнего электроснабжения (СВЭ), особенно в период выполнения в ней ремонтных работ [8–10].

Следует учитывать и тот факт, что при постоянном росте объема грузоперевозок требуется сокращение межпоездных интервалов, что многократно усиливает обозначенную проблему. Особенно остро данная ситуация проявляется на участках, для которых характерны крутые или протяженные подъемы в профиле пути.

Все перечисленные обстоятельства вызывают необходимость дальнейшего усиления СТЭ и СВЭ.

Проблеме усиления СЭС посвящены исследования многих российских ученых [11–18]. Предлагается внедрение отдельных средств, повышающих пропускную способность конкретных участков в зависимости от предполагаемого роста объема грузоперевозок [19–20], сочетание нескольких средств на сложных по профилю отрезках железных дорог [1–3, 8–9] и даже целые комплексы мероприятий по усилению как системы тягового, так и внешнего электроснабжения в тех случаях, когда силами только одной системы не удастся реализовать поставленную задачу, а также за счет других систем железнодорожного транспорта [21–24].

Целью данной работы является разработка технических мероприятий, обеспечивающих оптимальное сочетание средств усиления как с технической, так и с экономической точки зрения, с учетом всех особенностей грузонапряженного участка Восточного полигона ТШ–ТЛ.

Постановка задачи исследования

СВЭ исследуемого участка представляет собой двухцепную воздушную линию напряжением 110 кВ. Питание ВЛ-110 кВ осуществляется от двух районных подстанций (РП): ТШ – 500 кВ и ТЛ – 220 кВ.

ВЛ-110 кВ имеет различное сечение на своем протяжении: на участке ТШ–ЗМ выполнена проводами марки АС-300, на ЗМ–ШБ – проводами марки АС-185, на ШБ–ТЛ – АС-300.

Автотрансформаторы РП имеют мощность от 125 до 250 МВА.

Исследуемый участок железной дороги электрифицирован по системе тяги переменного тока напряжением 1×25 кВ. Электроснабжение участка обеспечивается за счет семи тяговых подстанций (ТП), оснащенных силовыми трансформаторами (СТ) мощностью 40 МВА. Его протяженность составляет 280 км. На участке расположены посты секционирования (ПС) и пункты параллельного соединения (ППС). Также на ряде ТП уже используются в качестве средств усиления устройства продольной компенсации (УПК) мощностью 12,8–14,4 МВАр и поперечной компенсации (КУ) мощностью 3–10 МВАр.

На всем протяжении расчетного участка на контактной сети (КС) используется подвеска типа ПБСМ-95 + МФ100, за исключением трех участков: ХГ–ХД – М-120 + МФ-100 с усиливающим проводом А-185 по второму пути; ЗМ–КМ – М-120 + МФ-100; КМ–УК – М-120 + МФ-100 с усиливающим проводом М-120.

Исследуемый участок ТШ–ТЛ характеризуется сложным горно-перевальным профилем пути. На нем присутствуют затяжные подъемы: участок ЗМ–УК (максимальный уклон 8,2‰ длиной 17 км), участок НЖ–ХД (максимальный уклон 9,1‰ длиной 3 км) и участок ХД–БД (максимальный уклон 9,5‰ длиной 2 км).

В 2020–2024 гг. в СТЭ и СВЭ уже реализованы следующие мероприятия по усилению:

- на РП ТШ смонтирован третий резервный автотрансформатор (АТ) мощностью 250 МВА;
- на ПС ХГ установлено устройство компенсации реактивной мощности с плавным регулированием (УКРМп) мощностью 10 МВАр;
- ведутся работы по строительству третьей цепи ВЛ-110 кВ на участке ТШ–ЗМ;
- на ТП УК смонтирован третий тяговый трансформатор.

Несмотря на выполненные работы, остаются некоторые проблемы.

При выводе в ремонт одной из двухцепной ВЛ-110 кВ нагрузка, оказываемая на вторую цепь, является недопустимой. Кроме того, оказывается колоссальная нагрузка на оставшиеся в работе АТ на РП ТШ и ТЛ. Для предотвращения выхода из строя АТ, уменьшения нагрузки на вторую цепь ВЛ, районное диспетчерское управление практикует такой способ, как разрыв транзита СВЭ.

Согласно протоколу совместного совещания филиала АО «СО ЕЭС» Иркутское районное диспетчерское управление (РДУ), ВСИБ НТЭ и ОАО «ИЭСК» на тему «Особенности управления электроэнергетическим режимом на транзите 110 кВ ТШ–ТЛ» от 2022 г. зафиксированы случаи фактического превышения длительно допустимой токовой нагрузки (ДДТН) ВЛ-110 кВ ЗМ–ТШ с отпайками, обусловленные недостаточной пропускной способностью электросетевого оборудования и несимметричной тяговой нагрузкой, для ликвидации которых требуется деление транзита 110 кВ ТШ–ТЛ.

При разрыве транзита ВЛ-110 кВ ЗМ–НЖ по обеим цепям для организации движения поездов необходимо увеличивать предельно допустимые межпоездные интервалы: 12 мин для поездов от 4 200 до 6 300 т, 15 мин для поездов от 6 300 до 7 500 т и 30 мин для соединенных поездов весом от 7 500 т на участке ЗМ–ХД.

Таким образом, при организации движения пакетным графиком и разрыве транзита по обеим цепям ВЛ-110 кВ ЗМ–НЖ расчетная допустимая пропускная способность данного участка составит 72 пары поездов в сутки, что на 20 % меньше, чем планируемые размеры движения нормативного графика 2025 г. при нормальной схеме внешнего электроснабжения.

По предварительной оценке ОАО «ИЭСК», при осуществлении реконструкции существующих ВЛ-110 кВ ЗМ–НЖ разрыв транзита по обеим цепям составит 95 суток, что приведет к снижению пропускной способности данного участка на 9,79 млн т.

Для исключения деления транзита 110 кВ ТШ–ТЛ и обеспечения при этом необходимой пропускной способности в рамках данного исследования необходимо решение следующих задач для участка Восточного полигона ТШ–ТЛ:

- анализ существующей пропускной способности СЭС;
- выявление проблемных зон, ограничивающих пропускную способность;
- разработка предложений по усилению СЭС;
- выбор оптимальных вариантов усиления СТЭ, обеспечивающих необходимую пропускную способность.

Анализ пропускной способности системы тягового электроснабжения ТШ–ТЛ

В соответствии с проектом тяговых и электрических расчетов для определения перспективных электрических нагрузок и разработки мероприятий III этапа развития Восточного полигона в части объектов электрификации и электроснабжения для участка ТШ–ТЛ при моделировании организован пакетный график движения: в четном направлении – 2 поезда массой 7 388 т через 8 мин и 4 поезда массой 6 588 т также через 8 мин; в нечетном – 48 поездов массой 3 287 т через 11 мин.

На рис. 1 представлен пакетный график движения поездов на исследуемом участке с учетом существующей системы внешнего и тягового электроснабжения.

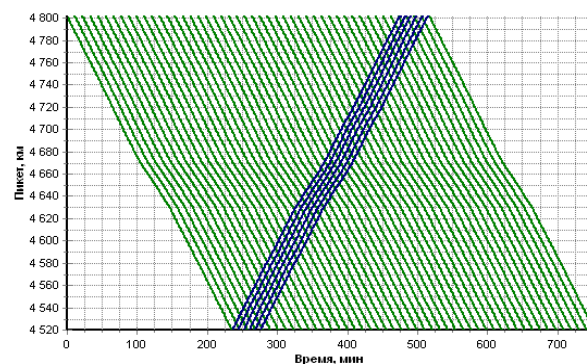


Рис. 1. Расчетный график движения поездов на участке ТШ–ТЛ

Fig. 1. Estimated train schedule on the section ТШ–ТЛ

Для анализа параметров режимов работы СТЭ для участков ТШ–КР и ТШ–ТЛ созданы модели их СЭС в программном комплексе Fazonord (рис. 2, 3).

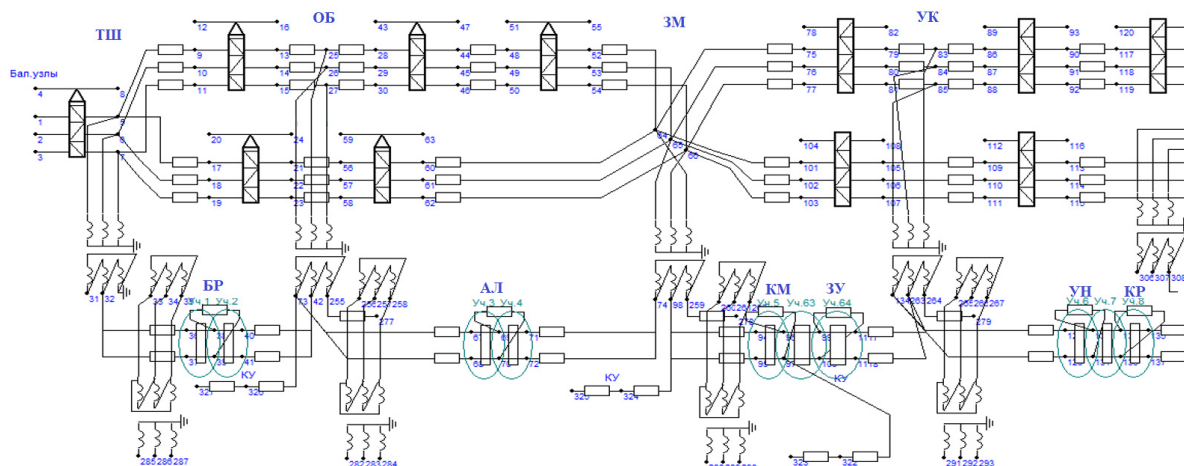


Рис. 2. Модели систем внешнего и тягового электроснабжения на участке ТШ–КР

Fig. 2. Models of external and traction power supply systems on the section ТШ–КР

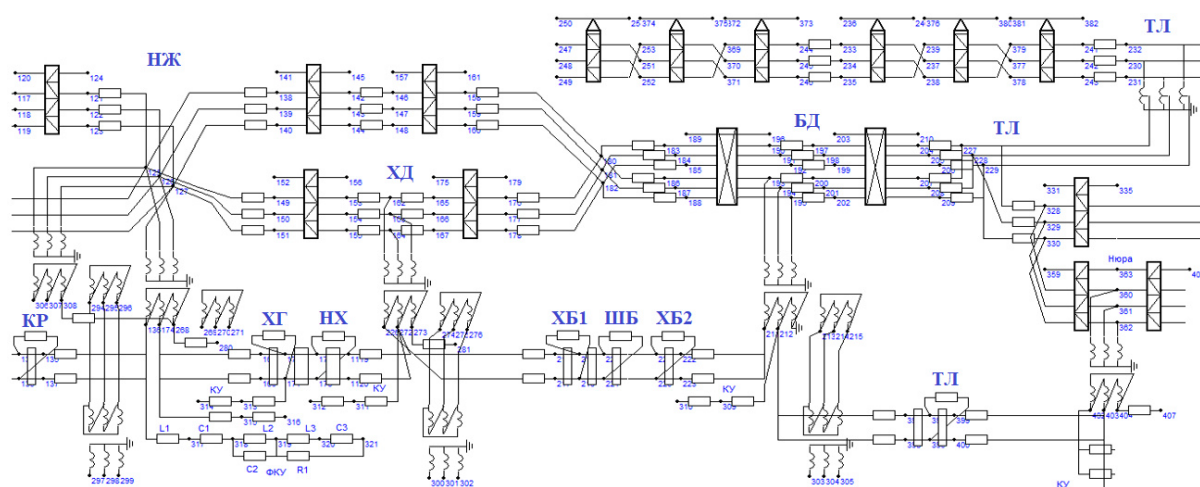


Рис. 3. Модели систем внешнего и тягового электроснабжения на участке КР–ТЛ

Fig. 3. Models of external and traction power supply systems on the site КР–ТЛ

Результаты моделирования свидетельствуют о несоответствии параметров СЭС заданной пропускной способности СТЭ, так как напряжение в КС снижается до 16,5 кВ, поэтому существующая СТЭ на сегодняшний день не способна обеспечить надежное электроснабжение участка ТШ–ТЛ при организации движения поездов с заданными интервалами.

В ходе дальнейшего моделирования выявлено, что существующая СТЭ способна обеспечивать движение поездов по заданному графику при соответствии уровня напряжения в КС нормативному значению только при величине межпоездного интервала 35 мин.

Согласно полученным результатам, делаем вывод, что для поддержания надлежащего уровня напряжения в КС для пропуска потока поездов с интервалами не более 8 мин существующая СТЭ нуждается в усилении. Данная СТЭ способна пропускать пакет поездов с интервалами, превышающими заданные в 4,3 раза.

По результатам моделирования выделены проблемные зоны на участке ТШ–ТЛ (табл. 1).

Таблица 1. Лимитирующие зоны на участке ТШ–ТЛ

Table 1. Limiting zones on the ТШ–ТЛ section

Направление Direction	Лимитирующий участок Limiting plot	Минимальное напряжение в контактной сети U_{\min} , кВ Minimum voltage in the contact network U_{\min} , kV
Четное Even	ХД–БД	19,351
Нечетное Even		19,705

Стоит отметить, что при уменьшении межпоездных интервалов количество проблемных зон будет увеличиваться.

Разработка мероприятий по поддержанию необходимого уровня напряжения в контактной сети

Существует несколько способов усиления СТЭ. Рассмотрим каждый отдельно для выбора оптимального.

Установка устройства компенсации реактивной мощности с плавным регулированием. С целью плавного изменения уровня

напряжения в КС особенно эффективно применять УКРМп-27,5 кВ.

Выполним моделирование такого устройства в СЭС исследуемого участка – мощностью 10 МВАр на постах секционирования БР и КР. На посту секционирования КМ произведем замену КУ мощностью 3 МВАр на УКРМп-27,5 кВ мощностью 20 МВАр. На посту секционирования ХГ согласно проектным расчетам «Росжелдор Проект» на 2028 г. смоделируем увеличение мощности УКРМп-27,5 кВ с 10 до 15 МВАр. На ПС ХБ2 смоделируем установку УКРМп-27,5 кВ мощностью 15 МВАр.

Пример установки УКРМп-27,5 кВ 15 МВАр на ПС ХГ в разработанной модели представлен на рис. 4.

На рис. 5 показан график изменения напряжения в КС для четного поезда массой 7 100 т при установке УКРМп-27,5 кВ.

Результаты моделирования показали, что применение только данного средства усиления СТЭ не обеспечивает пропуск сформированного пакета поездов без недопустимой просадки напряжения, так как минимальное значение напряжения в КС (U_{\min}) ниже минимально допустимого уровня.

Выделим проблемные зоны на участке ТШ–ТЛ, требующие дополнительного усиления, и сведем полученную информацию в табл. 2. Как видно из приведенных результатов, серьезного усиления требует участок НЖ–ХД.

Таблица 2. Лимитирующие зоны на участке ТШ–ТЛ с учетом установки УКРМп-27,5

Table 2. Limiting zones on the ТШ–ТЛ section taking into account the installation of RPCDs-27,5

№	Проблемный участок Problematic section	Четный поезд Even train	Нечетный поезд Odd train
		U_{\min} , кВ	U_{\min} , кВ
1	ТШ–ОБ	20,270	–
2	УК–НЖ	20,148	19,679
3	НЖ–ХД	14,869	15,242
4	БД–ТЛ	–	20,850

Повышение мощности используемых устройств продольной компенсации. Применение УПК основной своей целью имеет повышение напряжения в КС. Если установленные ранее данные устройства не обеспечивают необходимого в этом отношении эффекта, то изменить ситуацию может увеличение их мощности.

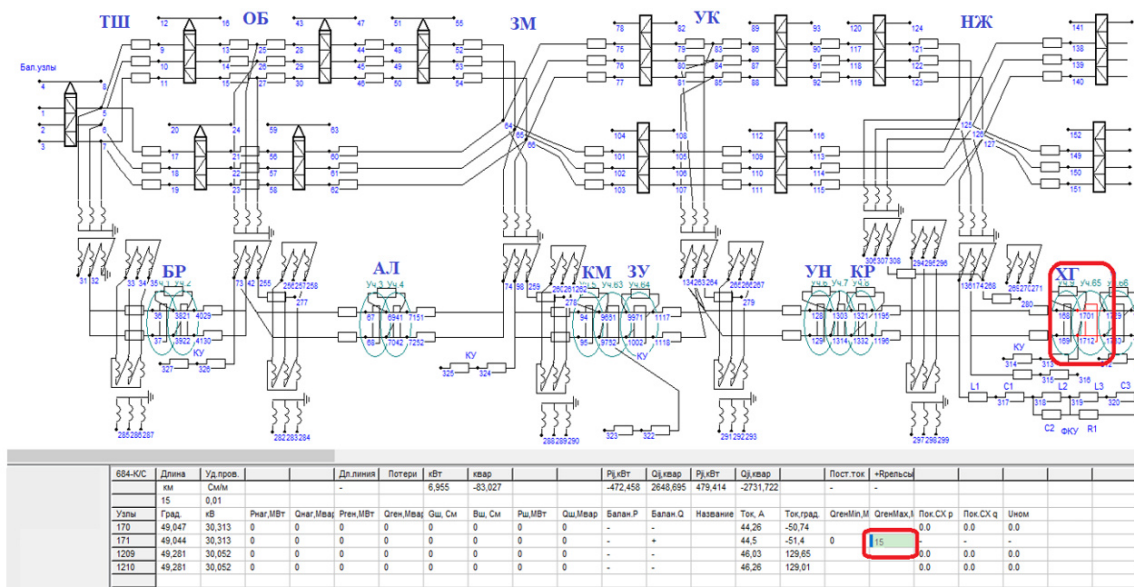


Рис. 4. Пример установки УКРМП-27,5 кВ мощностью 15 МВАр на посту секционирования ХТ
Fig. 4. An example of installation of a 27.5 kV PPCDs with a capacity of 15 MVar at a sectioning post of ХТ
 PPCDs-parallel power compensation device with smooth regulation

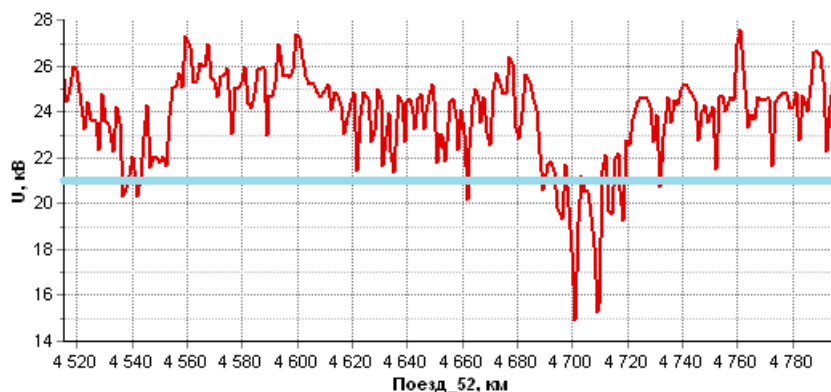


Рис. 5. Диаграмма напряжения в контактной сети во время движения четного поезда
 при использовании УКРМП-27,5 кВ
Fig. 5. Voltage diagram in the contact network during the movement of an even-numbered train
 using the RPCDs-27,5 kV

Смоделируем ситуацию повышения мощности УПК ($Q_{\text{УПК}}$) путем добавления дополнительных секций конденсаторных батарей.

В табл. 3 представлены существующие и перспективные мощности УПК. Изменение напряжения в КС показано на графике (рис. 6).

Использование отдельно УПК с увеличенной мощностью привело к снижению напряжения в КС на отдельных зонах и одновременно к перекомпенсации реактивной мощности в момент слабой загрузки участка, когда расчетный пакет поездов еще не окончательно начал свое движение, поскольку напряжение в это время превышает максимально допустимое – 29 кВ.

Стоит также отметить, что по результатам моделирования выявлено и негативное влияние УПК на загрузку СТ ТП. Отмечается перегрузка СТ на всех ТП, а на ТП ХД две из трех фаз СТ перегружены в 2 раза, что является недопустимым для надежной работы.

Установка дополнительного силового трансформатора на тяговой подстанции. Данный способ усиления позволяет включить в параллельную работу СТ, существенно увеличивая выдаваемую в КС мощность и повышая напряжение на токоприемнике электроподвижного состава.

Таблица 3. Значения мощностей устройств продольной компенсации
Table 3. Power values of series compensation devices

№	Наименование тяговой подстанции Name of traction substation	$Q_{\text{УПКсуществ.}},$ МВАр	$Q_{\text{УПКперспект.}},$ МВАр
1	ОБ	12,2	14,4
2	ЗМ	12,2	14,4
3	УК	14,4	14,4
4	НЖ	14,4	19,2
5	ХД	14,4	19,2

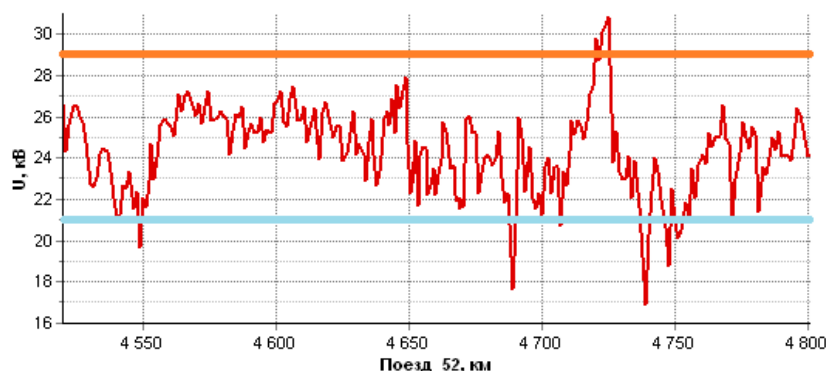


Рис. 6. Диаграмма напряжения в контактной сети при движении четного поезда после увеличения мощности устройства продольной компенсации

Fig. 6. Voltage diagram in the contact network during the movement of an even-numbered train after increasing the power of the longitudinal compensation device

Так как существующая СТЭ не обеспечивает надежного электроснабжения участка ТШ–ТЛ и на всех межподстанционных зонах фиксируются низкие значения напряжения, смоделируем ситуацию, при которой в параллельной работе находятся СТ на следующих ТП: ОБ, ЗМ, ХД.

Параллельная работа СТ на ТП УК и НД учитывается как существующая СТЭ. По требованию РДУ параллельная работа СТ на ТП Д

возможна при условии наличия дифференциально-фазной защиты, предотвращающей отключения линии в связи с короткими замыканиями на КС.

Диаграмма напряжения в КС в случае установки дополнительных СТ на ряде ТП приведена на рис. 7. Лимитирующие зоны на участке ТШ–ТЛ представлены в табл. 4.

По сравнению с ранее рассмотренными вариантами усиления существенно усилился

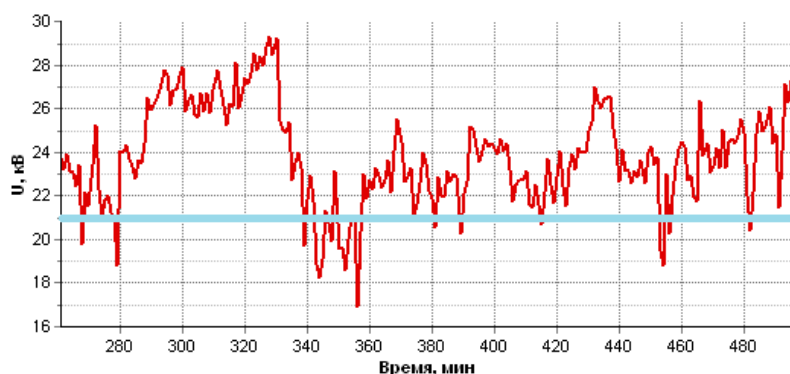


Рис. 7. Диаграмма напряжения в контактной сети

при движении четного поезда при параллельной работе силового трансформатора

Fig. 7. Voltage diagram in the contact network

when an even-numbered train is moving with the power transformer operating in parallel

Таблица 4. Лимитирующие зоны на участке при параллельной работе силового трансформатора
Table 4. Limiting zones on the site during parallel operation of the power transformer

№	Проблемный участок Problematic section	Четный поезд Even train	Нечетный поезд Odd train
		U_{\min} , кВ	U_{\min} , кВ
1	ТШ–ОБ	18,781	–
2	ЗМ–УК	17,070	17,155
3	УК–НД	20,049	20,144
4	НД–ХД	20,535	–
5	ХД–БД	18,831	18,955
6	БД–ТЛ	20,387	20,190

участок НД–ХД, но возникли проблемы на других зонах – ЗМ–УК, ХД–БД, БД–ТЛ.

Рассмотренные варианты усиления положительно повлияли на уровень напряжения в КС. Так, при одиночном усилении СТЭ путем установки УКРМп-27,5 кВ на участках ЗМ–УК и ХД–БД уровень напряжения в КС не опускается ниже минимально допустимого – 21 кВ. В свою очередь, на участке НД–ХД после повышения мощности УКРМп на ПС ХГ уровень напряжения остается ниже минимально допустимого значения, однако повышается с 14 до 16 кВ.

После повышения мощности УПК напряжение в КС значительно повышается, что говорит об эффективности его использования в рамках стабилизации напряжения в КС. Также УПК значительно влияет на загрузку СТ, что может привести к перегрузке силового оборудования. Для более значительного эффекта необходимо использовать УПК совместно с другими средствами усиления.

Так как отдельные способы усиления не

произвели достаточного усиливающего эффекта, необходимо рассмотреть различные варианты их комбинирования.

Вариант № 1. Совместная работа устройства компенсации реактивной мощности с плавным регулированием и СТ, включенных в параллель. Смоделируем установку УКРМп-27,5 кВ мощностью 15 МВАр на ТП ХД, ПС ХГ и ПС 4 754 км, 10 МВАр на ПС БР и КР, 20 МВАр на ПС КМ. Также включим в параллельную работу СТ на ТП ОБ, ЗМ и ХД.

График изменения напряжения в контактной сети представлен на рис. 8.

Вариант № 2. Совместная работа устройства компенсации реактивной мощности с плавным регулированием, СТ, включенных в параллель, и УПК с увеличением мощности до 19,2 МВАр.

Смоделируем увеличение мощности УПК на ТП УК и НД при совместной работе с вариантом № 1. Результаты моделирования представлены на рис. 9.

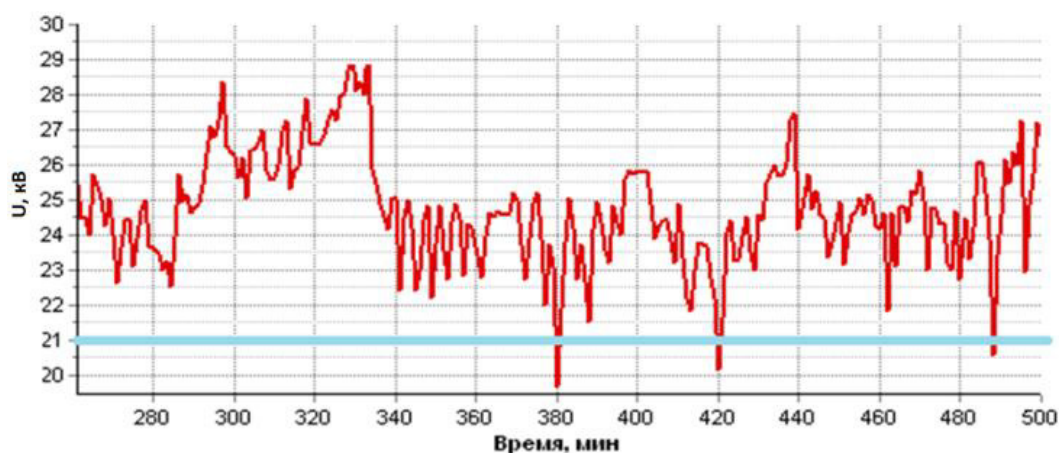


Рис. 8. Диаграмма напряжения в контактной сети при движении четного поезда при варианте № 1 комбинированного способа усиления

Fig. 8. Voltage diagram in the contact network when an even-numbered train is moving for option No 1 of the combined amplification method

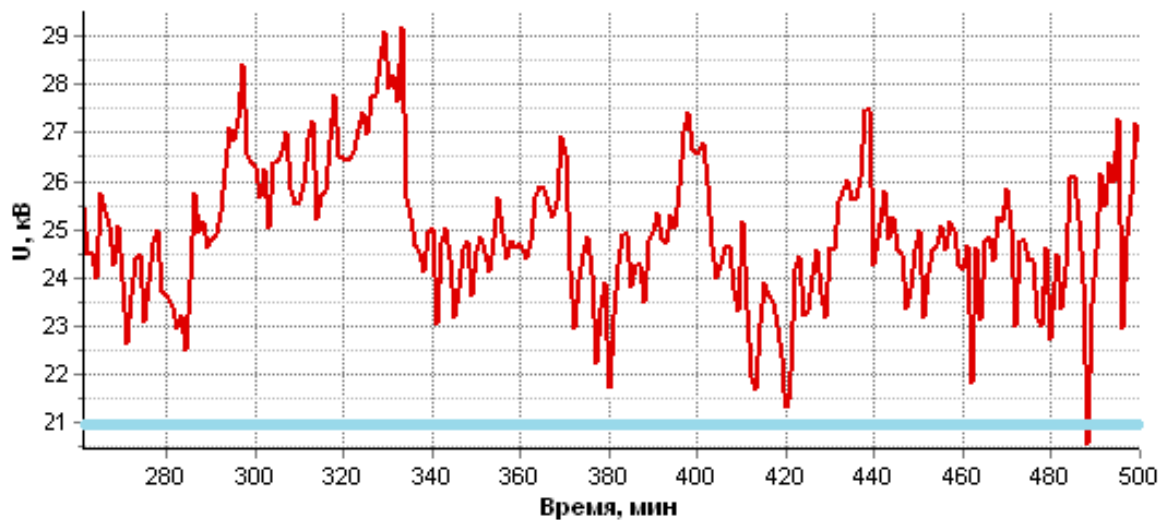


Рис. 9. Диаграмма напряжения в контактной сети при движении четного поезда при втором варианте комбинированного способа усиления

Fig. 9. Voltage diagram in the contact network

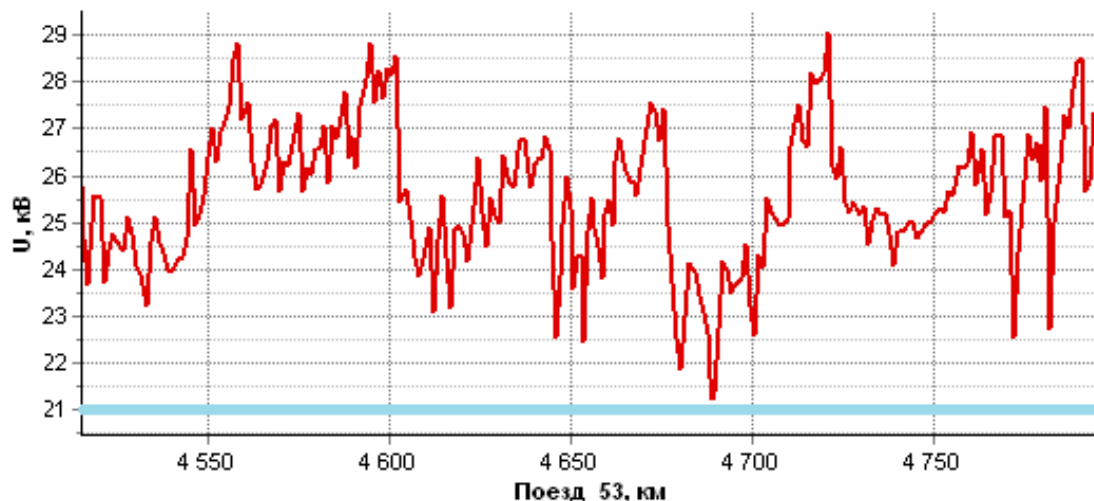


Рис. 10. Диаграмма напряжения в контактной сети при движении четного поезда при варианте № 3 комбинированного способа усиления

Fig. 10. Voltage diagram in the contact network when an even-numbered train is moving for option No 3 of the combined amplification method

Вариант № 3. Установка устройства компенсации реактивной мощности с плавным регулированием мощностью 10 МВАр на посту секционирования БР, мощностью 20 МВАр на посту секционирования КМ, мощностью 15 МВАр на посту секционирования ХГ. Включение в параллельную работу СТ на ТП ОБ, ЗМ и ХД. Увеличение мощности УПК до 19,2 МВАр на ТП УК, НЖ и ХД, а также установка УПК мощностью 12,2 МВАр на ТП БД

Результаты моделирования приведены на рис. 10.

При комбинированном варианте усиления № 3 на протяжении всего исследуемого участка уровень напряжения, подводимого к токоприемнику локомотива, остается выше минимально допустимого значения, что говорит об эффективности предложенных мероприятий по усилению.

Проведем сравнительный анализ всех рассмотренных вариантов усиления и сведем результаты в табл. 5.

Диаграмма изменения напряжения при различных способах усиления СТЭ представлена на рис. 11.

Таблица 5. Результаты моделирования усиления участка ТШ–ТЛ по минимальному напряжению в контактной сети
Table 5. Results of modeling the amplification of the TSH–TL section based on minimum voltage in the contact network

Участок Section	Способы усиления Methods of strengthening				
	Устройство компенсации реактивной мощности с плавным регулированием Device compensation reactive power with smooth regulation	Устройство продольной компенсации Series compensation device	Параллельная работа силового трансформатора Parallel work of the power transformer	Монтаж усиливающего провода Installation amplifying wire	Комбинированный способ № 3 Combined Method No 3
	U_{\min} контактной сети, кВ U_{\min} of contact network, kV				
ТШ–ОБ	20,269	18,435	18,781	16,943	23,238
ОБ–ЗМ	23,011	24,109	25,648	23,102	25,656
ЗМ–УК	21,554	22,895	17,070	15,142	22,512
УК–НЖ	20,165	21,574	20,049	17,573	22,508
НЖ–ХД	16,634	16,839	20,535	12,934	21,208
ХД–БД	21,424	16,914	18,756	17,486	24,411
БД–ТЛ	20,726	21,095	20,190	20,432	22,544

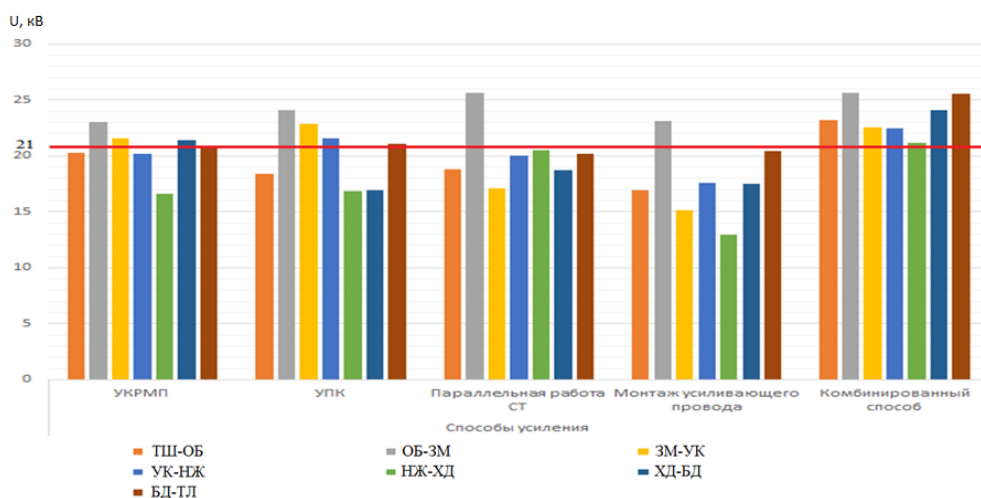


Рис. 11. Диаграмма изменения напряжения контактной сети при различных вариантах усиления системы тягового электроснабжения
Fig. 11. Diagram of voltage changes in the contact network with various options for strengthening the traction power supply system

По результатам комбинирования способов усиления самым эффективным является вариант № 3, так как именно при нем напряжение в КС превышает минимальное допустимое значение на всем рассматриваемом участке.

Заключение

В ходе выполнения исследования разработаны мероприятия по поддержанию не-

обходимого уровня напряжения в КС исследуемого участка.

По результатам выполненного моделирования СЭС участка ТШ–ТЛ Восточного полигона можно сделать вывод, что единичное усиление СТЭ с помощью какого-либо отдельного средства усиления не привело к удовлетворительным результатам. При комбинированном усилении СТЭ видно, что только при включе-

нии СТ в параллельную работу на указанных ранее ТП, установке УКРМп номинальной мощностью от 10 до 20 МВАр на ряде ПС, увеличении номинальной мощности УПК до 19,2 МВАр на ряде ТП и установке дополнительного УПК мощностью 12,2 МВАр на обозначенной ТП уровень напряжения в КС не опускается ниже 21 кВ на всем протяжении исследуемого участка.

Предлагаемая комбинация средств усиления потребует существенных дополнитель-

ных затрат, но вместе с тем приведет к обеспечению требуемой пропускной способности СТЭ, повысит надежность как ее функционирования, так и СВЭ, позволит получить дополнительную прибыль ОАО «РЖД» от увеличения объема грузоперевозок. Таким образом, задача сохранения и развития пропускной способности как по отдельному участку, так и в целом по Восточному полигону будет решена.

Список литературы

1. Крапивин М.И., Пузина Е.Ю. Моделирование системы тягового электроснабжения с целью обоснования мероприятий по снятию ограничений в пропускной способности // Актуальные проблемы электроэнергетики : сб. науч.-техн. ст. Нижний Новгород, 2024. С. 162–167.
2. Бардушко А.Ю., Куций А.П. Повышение пропускной способности электрифицированного участка железной дороги Якурим – Киренга на перспективу // Молодая наука Сибири. 2023. № 4 (22). С. 182–193.
3. Галков А.А., Худогов И.А. Применение технологии «виртуальной сцепки» при усилении системы тягового электроснабжения на участке Зима – Иркутск-Сортировочный // Повышение эффективности эксплуатации электромеханических преобразователей энергии в промышленности и на транспорте : материалы X Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участ. Омск, 2023. С. 215–220.
4. Лобанов О.В. Система мониторинга работоспособности металлических опорных конструкций для скоростного и высокоскоростного движения электроподвижного состава // Инновационные производственные технологии и ресурсосберегающая энергетика : материалы Междунар. науч.-практ. конф. Омск, 2021. С. 245–250.
5. Пузина Е.Ю. Целесообразность применения системы мониторинга силовых трансформаторов // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири : материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ. Иркутск, 2013. Т. 2. С. 167–171.
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. Никищенков С.А., Козменков О.Н., Сафронова И.А. Оценка экономической эффективности применения автоматизированных систем мониторинга технического состояния масляных трансформаторов на железнодорожном транспорте // Автоматика на транспорте. 2025. Т. 11 № 2. С. 120–136.
8. Увеличение пропускной и провозной способности ВСЖД на участке Лена-Восточная-Новый Уоян в свете развития системы внешнего электроснабжения данного участка БАМ в 2019–2023 гг. / В.В. Чернышев, К.Е. Кузнецов, Д.В. Сальникова и др. // Молодая наука Сибири. 2023. № 3 (21). С. 13–22.
9. Cherpanov A., Kutsyi A. Modeling of Tractive Power Supply Systems for Heavy-Tonnage Trains Operation // International Russian Automation Conference (RusAutoCon). Sochi, 2018. P. 1–5. DOI 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501734.
10. Моделирование режимов электроэнергетических систем, питающих тяговый подстанции постоянного и переменного тока / А.В. Крюков, К.В. Суслов, А.В. Черепанов и др. // Энергетик. 2024. № 2. С. 9–13.
11. Зарубин А.Д., Астраханцев Л.А. Анализ систем тягового электроснабжения // Молодая наука Сибири. 2021. № 2 (12). С. 214–220.
12. Козлов Д.Г., Колпакова О.А., Хляка С.В. Повышение надежности электроснабжения // Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения в АПК : материалы Междунар. науч.-практ. конф. Воронеж, 2023. С. 100–104.
13. Овечкин И.С. Моделирование режимов двойных замыканий на землю в технологических ЛЭП напряжением 35 кВ // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири : материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ. Иркутск, 2024. Т. 2. С. 255–261.
14. Паскарь И.Н., Москалева К.А. Регулирование напряжения в энергосистеме с применением мультиагентного подхода // Горное оборудование и электромеханика. 2022. № 1 (159). С. 36–45.
15. Кубкина О.В., Лысенко В.Г. Энергообеспечение мониторинга параметров системы тягового электроснабжения // Инженерный вестник Дона. 2023. № 11 (107). С. 714–724.
16. Коновалов И.Д., Некрасова В.Н., Волков М.А. К вопросу повышения качества электроснабжения потребителей // Науч.-техн. вестник Поволжья. 2023. № 10. С. 200–205.
17. Влияние надежности электроснабжения и качества электрической энергии на эффективность функционирования электроэнергетической системы / М.А. Дубицкий, Е.В. Зубова, Р.Г. Любовников и др. // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири : материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ. Иркутск, 2020. Т. 1. С. 102–108.
18. Крапивин М.И., Исаков А.Е., Пузина Е.Ю. Целесообразность применения электролитического заземления в грунтах с большим удельным сопротивлением // Молодая наука Сибири. 2023. № 2 (20). С. 98–106.

19. Учет влияния устройств фильтрации и компенсации на показатели качества электрической энергии СТЭ при пропуске поездов повышенной массы / Е.А. Морозов, В.В. Фареных, М.В. Востриков и др. // Молодая наука Сибири. 2022. № 4 (18). С. 94–108.

20. Оценка качества напряжения на шинах 27,5 кВ тяговой подстанции с устройством продольной емкостной компенсации / С.И. Макашева, П.С. Пинчуков, А.Р. Мамаев и др. // Вестн. Брян. гос. техн. ун-та. 2020. № 3 (88). С. 11–20.

21. 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 : материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. Иркутск, 2015. Т. 1. С. 328–332.

22. Каимов Е.В., Оленцевич В.А., Власова Н.В. Проблемы формирования, развития и реконструкции элементов инфраструктурного комплекса железных дорог // Образование – Наука – Производство : материалы VI Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ. Чита, 2022. Т. 1. С. 288–296.

23. Оленцевич В.А., Власова Н.В. Вопросы моделирования работы локомотивного комплекса с целью обоснования возможности освоения перспективных грузопотоков на восточном направлении страны // Постсоветский материк. 2025. № 3 (47). С. 70–84.

24. Рыжова Е.Л. Применение интеллектуальных технологий для реализации проекта цифровой тяговой подстанции // Инновационные транспортные системы и технологии. 2023. Т. 9. № 3. С. 15–31.

References

1. Krapivin M.I., Puzina E.Yu. Modelirovanie sistemy tyagovogo elektroobrazovaniya s tsel'yu obosnovaniya meropriyatiy po snyatiyu ogranicheniy v propusknoi sposobnosti [Modeling of the traction power supply system in order to justify measures to remove restrictions on throughput]. *Sbornik nauchno-tekhnicheskikh statei X Vserossiiskoi (XLIII Regional'noi) nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Aktual'nyye problemy elektroenergetiki»* [Proceedings of the X All-Russian (XLIII Regional) scientific and technical conference «Actual problems of electric power industry»]. Nizhnii Novgorod, 2024, pp. 162–167.

2. Bardushko A.Yu., Kutsyi A.P. Povyshenie propusknoi sposobnosti elektrifitsirovannogo uchastka zheleznoi dorogi Yakurim – Kirenga na perspektivu [Increasing the capacity of the electrified section of the Yakurim – Kirenga railway for the future]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2023, no 4 (22), pp. 182–193.

3. Galkov A.A., Khudonogov I.A. Primenenie tekhnologii «virtual'noi stseпки» pri usilenii sistemy tyagovogo elektroobrazovaniya na uchastke Zima – Irkutsk-Sortirovochnyi [Application of the «virtual coupling» technology when strengthening the traction power supply system on the Zima – Irkutsk-Sortirovochnyi section]. *Materialy X Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Povyshenie effektivnosti ekspluatatsii elektromekhanicheskikh preobrazovatelei energii v promyshlennosti i na transporte»* [Proceedings of the X All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation «Improving the efficiency of operation of electromechanical energy converters in industry and transport»]. Omsk, 2023, pp. 215–220.

4. Lobanov O.V. Sistema monitoringa rabotosposobnosti metallicheskh opornykh konstrukttsii dlya skorostnogo i vysokoskorostnogo dvizheniya elektropodvizhnogo sostava [System for monitoring the operability of metal support structures for high-speed and high-speed movement of electric rolling stock]. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Innovatsionnyi proizvodstvennye tekhnologii i resursoberegayushchaya energetika»* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Innovative production technologies and resource-saving energy»]. Omsk, 2021, pp. 245–250.

5. Puzina E.Yu. Tselesoobraznost' primeneniya sistemy monitoringa silovykh transformatorov [Feasibility of using a power transformer monitoring system]. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v Sibiri»* [Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation «Improving the efficiency of production and use of energy in Siberia»]. Irkutsk, 2013, Vol. 2, pp. 167–171.

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. Nikishchenkov S.A., Kozmenkov O.N., Safronova I.A. Otsenka ekonomicheskoi effektivnosti primeneniya avtomatizirovannykh sistem monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya maslyanykh transformatorov na zheleznodorozhnom transporte [Assessment of the economic efficiency of using automated systems for monitoring the technical condition of oil transformers in railway transport]. *Avtomatika na transporte* [Automation in transport], 2025, Vol. 11, no 2, pp. 120–136.

8. Chernyshev V.V., Kuznetsov K.E., Sal'nikova D.V., Kutsyi A.P. Uvelichenie propusknoi i provoznoi sposobnosti VSZHD na uchastke Lena-Vostochnaya–Novyi Uoyan v svete razvitiya sistemy vneshnego elektroobrazovaniya dannogo uchastka BAM v 2019–2023 godakh [An increase in the capacity and carrying capacity of the Russian Railways on the Lena-Vostochnaya-Novyi Uoyan section in view of the development of the external power supply system for this section of the BAM in 2019–2023]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2023, no 3 (21), pp. 13–22.

9. Cherpanov A., Kutsyi A. Modeling of Traction Power Supply Systems for Heavy-Tonnage Trains Operation // 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). Sochi, 2018, pp. 1–5.

10. Kryukov A.V., Suslov K.V., Cherepanov A.V., Nguyen Q.H. Modelirovanie rezhimov elektroenergeticheskikh sistem, pitayushchikh tyagovye podstantsii postoyannogo i peremennogo toka [Modeling of modes of electric power systems supplying traction substations of direct and alternating current]. *Energetik* [Power Engineering], 2024, no 2, pp. 9–13.

11. Zarubin A.D., Astrakhantsev L.A. Analiz sistem tyagovogo elektroobrazovaniya [Analysis of traction power supply systems]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2021, no 2 (12), pp. 214–220.

12. Kozlov D.G., Kolpakova O.A., Khlyaka S.V. Povyshenie nadezhnosti elektroobrazovaniya [Improving the reliability of power supply]. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Nauka i obrazovanie na sovremennom etape razvitiya: opyt,*

problemy i puti ikh resheniya v APK [Proceedings of the international scientific and practical conference «Science and education at the present stage of development: experience, problems and solutions in agriculture»]. Voronezh, 2023, pp. 100–104.

13. Ovechkin I.S. Modelirovanie rezhimov dvoynykh zamykaniy na zemlyu v tekhnologicheskikh LEP napryazheniem 35 kV [Modeling of double earth fault modes in technological power lines with a voltage of 35 kV]. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyakh Sibiri»* [Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation «Improving the efficiency of energy production and use in Siberia»]. Irkutsk, 2024, pp. 255–261.

14. Paskar' I.N., Moskaleva K.A. Regulirovanie napryazheniya v energosisteme s primeneniem mul'tiagentnogo podkhoda [Voltage regulation in the power system using a multi-agent approach]. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika* [Mining equipment and electromechanics], 2022, no 1 (159), pp. 36–45.

15. Kubkina O.V., Lysenko V.G. Energoobespechenie monitoringa parametrov sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya [Energy supply for monitoring parameters of traction power supply system]. *Inzhenernyi vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2023, no 11 (107), pp. 714–724.

16. Konovalov I.D., Nekrasova V.N., Volkov M.A. K voprosu povysheniya kachestva elektrosnabzheniya potrebiteli [On the issue of improving the quality of power supply to consumers]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya* [Scientific and Technical Bulletin of the Volga region], 2023, no 10, pp. 200–205.

17. Dubitskii M.A., Zubova E.V., Lyubovnikov R.G., Makarova A.V. Vliyanie nadezhnosti elektrosnabzheniya i kachestva elektricheskoi energii na effektivnost' funktsionirovaniya elektroenergeticheskoi sistemy [Influence of reliability of power supply and quality of electric energy on the efficiency of functioning of the electric power system]. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyakh Sibiri»* [Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation «Improving the efficiency of production and use of energy in Siberia»]. Irkutsk, 2020, Vol. 1, pp. 102–108.

18. Krapivin M.I., Isakov A.E., Puzina E.Yu. Tselesoobraznost' primeneniya elektroliticheskogo zazemleniya v gruntakh s bol'shim udel'nym soprotivleniem [Feasibility of using electrolytic grounding in soils with high specific resistance]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2023, no 2 (20), pp. 98–106.

19. Morozov E.A., Farenyk V.V., Vostrikov M.V., Tikhomirov V.A. Uchet vliyaniya ustroystv fil'tratsii i kompensatsii na pokazateli kachestva elektricheskoi energii STE pri propuske poezdov povyshennoi massy [Consideration of the influence of filtration and compensation devices on the quality of electric energy of the traction power supply system when passing trains of increased mass]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2022, no 4 (18), pp. 94–108.

20. Makasheva S.I., Pinchukov P.S., Mamaev A.R., Terletskii S.G. Otsenka kachestva napryazheniya na shinakh 27,5 kV tyagovoi podstantsii s ustroystvom prodol'noi emkostnoi kompensatsii [Evaluation of the quality of voltage on 27,5 kV tires of a traction substation with a longitudinal capacitive compensation device]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Bryansk State Technical University], 2020, no 3 (88), pp. 11–20.

21. Pul'tyakov A.V., Trofimov Yu.A., Skorobogatov M.E. Kompleksnye resheniya po povysheniyu ustoychivosti raboty ustroystv avtomaticheskoi lokomotivnoi signalizatsii na uchastkakh s elektrotiyagoi peremennogo toka [Integrated solutions to improve the stability of automatic locomotive signaling devices in areas with alternating current electric traction]. *Materialy VI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona»* [Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference «Transport infrastructure of the Siberian region»]. Irkutsk, 2015, Vol. 1, pp. 328–332.

22. Kaimov E.V., Olentsevich V.A., Vlasova N.V. Problemy formirovaniya, razvitiya i rekonstruktsii elementov infrastrukturnogo kompleksa zheleznykh dorog [Problems of formation, development and reconstruction of elements of the railway infrastructure complex]. *Materialy VI Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Obrazovanie – Nauka – Proizvodstvo» (v 2-kh t.)* [Proceedings of the VI All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation «Education – Science – Production» (in 2 vol.)]. Chita, 2022, Vol. 1, pp. 288–296.

23. Olentsevich V.A., Vlasova N.V. Voprosy modelirovaniya raboty lokomotivnogo kompleksa s tsel'yu obosnovaniya vozmozhnosti osvoeniya perspektivnykh gruzopotokov na vostochnom napravlenii strany [Issues of modeling the operation of a locomotive complex in order to substantiate the possibility of developing promising freight flows in the eastern direction of the country]. *Postsovetitskii materik* [Post-Soviet Continent], 2025, no 3 (47), pp. 70–84.

24. Ryzhova E.L. Primenenie intellektual'nykh tekhnologii dlya realizatsii proekta tsifrovoy tyagovoi podstantsii [Application of intelligent technologies for the implementation of the digital traction substation project]. *Innovatsionnye transportnye sistemy i tekhnologii* [Innovative transport systems and technologies], 2023, Vol. 9, no 3, pp. 15–31.

Информация об авторах

Макаренко Юрий Николаевич, аспирант кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: makarenkaaa73@gmail.com.

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

Information about the authors

Yurii N. Makarenko, Ph.D. Student of the Department of Electric Power Industry of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: makarenkaaa73@gmail.com.

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; e-mail: lena-rus05@mail.ru.