

## Оценка эффективности применения вольтодобавочных трансформаторов в системе электроснабжения Кругобайкальской железной дороги

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

Одной из основных задач систем электроснабжения является доведение до потребителя электрической энергии не только в достаточном объеме, но и необходимого качества. Не всегда на малодеятельных участках железных дорог решению данной задачи уделяется нужное внимание. Так, на протяжении Кругобайкальской железной дороги, представляющей собой уникальный исторический архитектурный инженерный объект, находятся различные потребители железной дороги: население, туристические объекты, нетяговые железнодорожные потребители. В последнее время поступают жалобы на низкий уровень напряжения в точках подключения, особенно обостряется эта проблема в случаях вынужденного отключения одного из двух источников питания всей системы электроснабжения Кругобайкальской железной дороги. При ее протяженности в несколько десятков километров электроснабжение потребителей осуществляется от линии 6 кВ, т.е. при явно недостаточном уровне питающего напряжения при такой большой протяженности линии электропередачи. Соответственно, при одностороннем питании в вынужденном режиме просадка напряжения от середины длины линии возникает столь существенная, что электроприемники потребителей практически не в состоянии выполнять свои функции. Если учитывать данную ситуацию, а также перспективное развитие туристических проектов, то становится актуальной оценка возможности усиления системы электроснабжения Кругобайкальской железной дороги. Одним из эффективных способов усиления систем электроснабжения является включение вольтодобавочных трансформаторов в тех узлах, в которых проявляются недопустимые отклонения напряжения. При длинной линии электропередачи возможно применение такого трансформатора в том узле схемы, за которым выявлено значительное снижение уровня напряжения. В данной работе выполнено моделирование системы электроснабжения Кругобайкальской железной дороги без применения вольтодобавочного трансформатора и с его установкой. Полученные результаты подтвердили высокую эффективность такого способа усиления, поскольку и в нормальном, и в вынужденном режиме отклонение напряжения во всех точках подключения потребителей не превысило допустимых значений.

### Ключевые слова

качество электроэнергии, вольтодобавочные трансформаторы, вынужденные режимы, линии электропередачи

### Для цитирования

Пузина Е.Ю. Оценка эффективности применения вольтодобавочных трансформаторов в системе электроснабжения Кругобайкальской железной дороги / Е.Ю. Пузина // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 2(78). С. 51–60. DOI 10.26731/1813-9108.2023.2(78).51-60.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 14.04.2023 г.; поступила после рецензирования: 30.05.2023 г.; принята к публикации: 31.05.2023 г.

## Efficiency evaluation of the use of volt-additive transformers in the power supply system of the Circum-Baikal Railway

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

✉lena-rus05@mail.ru

### Abstract

One of the main tasks of power supply systems is to supply electric energy to the consumer not only in sufficient volume, but also of the necessary quality. The necessary attention is not always paid to the solution of this problem on inactive sections of railways. Thus, throughout the Circum-Baikal Railway, which is a unique historical, architectural and engineering object, there are various consumers of the railway: the population, tourist facilities, non-traction railway consumers. Recently, complaints have been received about the low level of voltage at the connection points, the problem especially aggravating in cases of forced disconnection of one of the two power sources of the entire power supply system of the Circum-Baikal Railway. With its length

of several tens of kilometers, power supply to consumers is carried out from a 6 kV line, that is, with a clearly insufficient supply voltage level for such a large length of the power line. Accordingly, with one-way power supply in forced mode, the voltage drawdown from the middle of the line length is so significant that consumers' electric receivers are practically unable to perform their functions. Taking into account the situation as well as the promising development of tourist projects, assessing the possibility of strengthening the power supply system of the Circum-Baikal Railway becomes relevant. One of the effective ways to strengthen power supply systems is the inclusion of voltage-additive transformers in the nodes where unacceptable voltage deviations are manifested. With a long power transmission line, it is possible to use such a transformer in the node of the circuit behind which a significant decrease in the voltage level has been detected. In this paper, a simulation of the power supply system of the Circum-Baikal Railway is performed both with and without the use of an additional voltage transformer. The results obtained confirmed the high efficiency of this amplification method, since both in normal and forced mode, the voltage deviation at all points of connection of consumers did not exceed the permissible values.

### Keywords

quality of electricity, volt-additional transformers, forced modes, power transmission lines

### For citation

Puzina E.Yu. Otsenka effektivnosti primeneniya vol'todobavochnykh transformatorov v sisteme elektrosnabzheniya Kругобайкальской железной дороги [Evaluation of the effectiveness of the use of volt-additive transformers in the power supply system of the Circum-Baikal Railway]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 2 (78), pp. 51–60. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.2(78).51-60.

### Article info

Received: April 14, 2023; Revised: May 30, 2023; Accepted: May 31, 2023.

### Введение

В настоящее время в условиях существующей степени изоляции российской экономики от Западно-Европейской и ряда других стран мира актуальной задачей является всемерное поддержание и дальнейшее развитие внутренней экономики нашей страны [1, 2]. Одна из отраслей экономики, которой уделяется повышенное внимание, – внутренний туризм.

В Восточной Сибири большой интерес у туристов вызывает Кругобайкальская железная дорога (КБЖД), относящаяся в данное время к категории уникальных инженерных сооружений, которое имеет в своем составе большое количество крайне разнообразных тоннелей, галерей, мостов, подпорок. Ежегодно достаточно большой поток туристов посещает дорогу, однако условий для их размещения и проживания в пределах КБЖД не так много, в частности это связано с трудностями подключения новых туристических объектов к системе электроснабжения КБЖД. Это, в свою очередь, объясняется и недостаточной мощностью источников питания системы электроснабжения (СЭС) данной дороги и тем, что для подведения электроэнергии к объектам, расположенным вдоль КБЖД, существует единственная линия электропередачи напряжением 6 кВ, связывающая эти источники. Если учесть протяженность линии (несколько десятков километров), то становится очевидным наличие проблемы развития туризма в названном регионе.

В связи с изложенным, достаточно актуальной задачей является оценка качества электроэнергии [3–10] в системе электроснабжения КБЖД, прежде всего анализ уровня напряжения, подводимого к подстанциям потребителей дороги. Реализовать указанную задачу удобно с применением программно-вычислительных комплексов, предназначенных для моделирования систем электроснабжения [11–13], поскольку нужно поставить не только задачу анализа параметров режима работы существующей СЭС, но и впоследствии выполнить оценку эффективности применения средств ее усиления, направленных не только на повышение пропускной способности этой системы [14], но и на повышение надежности работы всех устройств и узлов СЭС [15–17].

### Описание проблемной ситуации и постановка задачи

В данной работе выполнено моделирование СЭС КБЖД в программно-вычислительном комплексе (ПВК) Fazonord с целью анализа параметров нормального и вынужденных режимов ее работы.

В настоящее время КБЖД от Култук до порта Байкал протяженностью 89 км имеет станции: Култук, Маритуй, Уланово и Байкал, а также ряд туристических баз: Таёжная, Шумиха, Хвойная, Ретро, Серебряный ключ и др. На маршруте КБЖД размещены объекты особого назначения, такие как научно-

исследовательская экспериментальная база Центра сохранения историко-культурного наследия, подразделение Института ядерных исследований.

Уникальность КБЖД заключается в том, что она включает 38 тоннелей общей длиной 9 063 м (самый длинный из них – тоннель через мыс Половинный длиной 777 м); 15 каменных галерей общей длиной 295 м (сейчас используется только пять из них); три железобетонных галереи с отверстиями; 248 мостов и виадуков; 268 подпорных стенок.

Подача электроэнергии к потребителям КБЖД нормально осуществляется от подстанций Култук и порт Байкал с двух сторон. На линии КБЖД установлены комплектные трансформаторные подстанции (КТП) трехфазные в количестве 20 шт., которые используют для трансформации напряжения до 0,4 кВ, и 15 однофазных для питания устройств сигнализации.

В СЭС на КБЖД используют воздушную линию электропередачи с проводами АС-70, в труднодоступных местах применяют провод марки АС-50.

В последние годы стоит вопрос о дальнейшем развитии туризма в данном регионе, что приведет к росту нагрузок в СЭС КБЖД, поэтому актуальными задачами является оценка параметров режимов ее работы, особенно в

связи с имеющимися жалобами на качество электроэнергии со стороны уже подключенных потребителей, и на базе этого разработка технических решений по усилению СЭС и также рекомендаций по применению средств диагностики и мониторинга устройств электроснабжения с целью повышения надежности работы всей системы [18–23].

### Моделирование системы электроснабжения Кругобайкальской железной дороги и анализ уровня напряжения у потребителей

Для оценки параметров режимов работы СЭС КБЖД выполнено ее моделирование в ПСК Fazonord. Разработанная модель приведена на рис. 1, где подключенные КТП представлены в виде моделей силовых трансформаторов.

Выполнен расчет и анализ параметров режима работы СЭС КБЖД для двух вариантов электроснабжения:

- двустороннее питание с разделом СЭС между КТП-160 и КТП-32;
- одностороннее питание (вынужденный режим).

Уровни напряжений обмоток низкого напряжения силовых трансформаторов КТП сведены в табл. 1.

Как видно из результатов, представленных в табл. 1, даже при имеющихся, а не перспек-

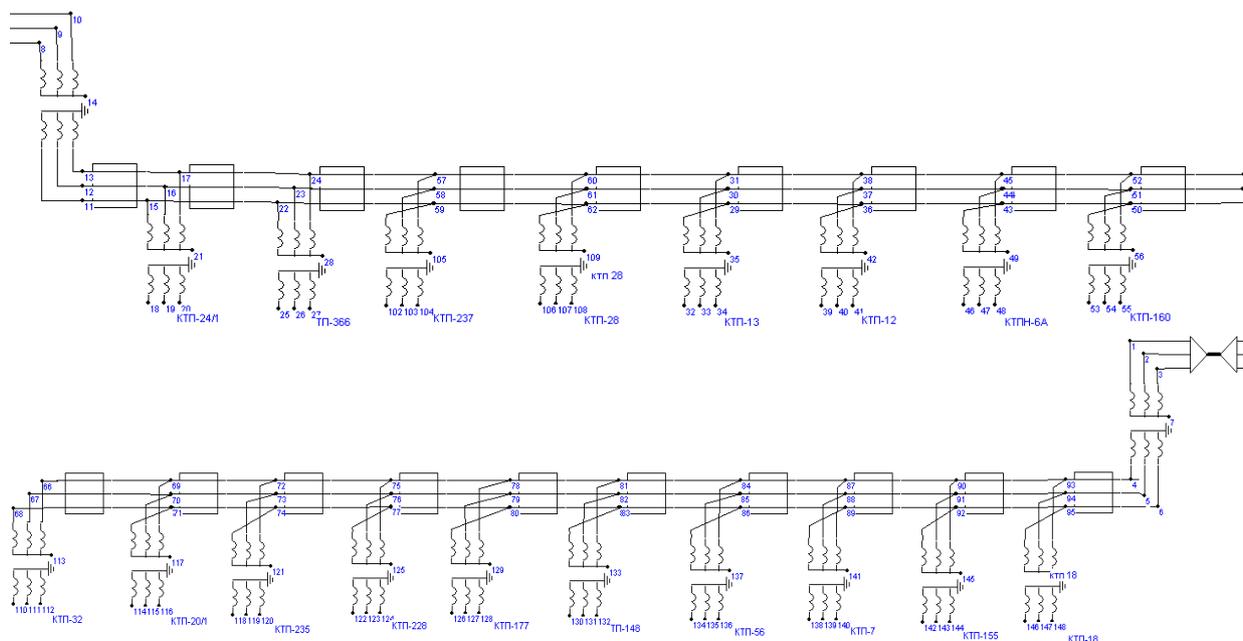


Рис. 1. Модель системы электроснабжения Кругобайкальской железной дороги в нормальном режиме работы

Fig. 1. Model of the power supply system of the Circum-Baikal Railway in normal operation mode

**Таблица 1.** Уровни напряжений обмоток низкого напряжения силовых трансформаторов комплектных трансформаторных подстанций

**Table 1.** Voltage levels of low voltage windings in power transformers of complete transformer substations

Номер комплектной трансформаторной подстанции Part number of complete transformer substations	Вариант 1 Variant 1		Вариант 2 Variant 2	
	Уровень напряжения, $U$ , кВ Voltage level $U$ , kV	Отклонение напряжения, $\Delta U$ , % Voltage deviation, $\Delta U$ , %	Уровень напряжения, $U$ , кВ Voltage level, $U$ , kV	Отклонение напряжения, $\Delta U$ , % Voltage deviation
КТП-24/1	0,227	3,18	0,212	-3,64
ТП-366	0,225	2,27	0,208	-5,45
КТП-237	0,215	-2,27	0,195	-11,36
КТП-28	0,201	-8,64	0,165	-25,00
КТП-13	0,201	-8,64	0,165	-25,00
КТП-12	0,201	-8,64	0,167	-24,09
КТПН-6А	0,203	-7,23	0,164	-25,45
КТП-160	0,203	-7,23	0,157	-28,64
КТПН-32	0,227	3,18	0,147	-33,18
КТП-20/1	0,227	3,18	0,147	-33,18
КТП-235	0,229	4,09	0,145	-34,09
КТП-228	0,221	0,45	0,139	-36,82
КТП-177	0,229	4,09	0,143	-35,00
ТП-148	0,228	3,64	0,140	-36,364
КТП-56	0,232	5,45	0,146	-33,64
КТП-7	0,234	6,36	0,143	-35,00
КТП-155	0,239	8,64	0,140	-36,36
КТП-144	0,242	10,00	0,141	-35,91
КТП-18	0,227	3,18	0,147	-33,18

тивных нагрузках, особенно при отключении одной из подстанций, происходят большие просадки напряжения в межподстанционных зонах (МПЗ), до уровня 139 В в отдельных узлах схемы, что совершенно недопустимо. Также необходимо отметить, что на подстанциях Култук и Байкал отсутствует резерв мощности силовых трансформаторов.

В результате приходим к выводу о необходимости повышения надежности электроснабжения потребителей КБЖД.

### **Разработка мероприятий по усилению системы электроснабжения Кругобайкальской железной дороги**

Проанализировав существующую ситуацию в СЭС КБЖД, можно с уверенностью сказать, что система электроснабжения нуждается в реконструкции. С целью реконструкции ис-

следуемой системы электроснабжения предлагается установка вольтодобавочных трансформаторов (ВДТ) в МПЗ в точках потенциально недопустимого снижения напряжения.

На рис. 2 представлена электрическая схема ВДТ. На схеме обозначено:  $S$  – ввод ВДТ от источника;  $L$  – ввод вольтодобавочного трансформатора от нагрузки;  $SL$  – ввод ВДТ от общей точки.

Принцип действия ВДТ основан на следующем. При включении ВДТ в работу аппаратная часть шкафа управления (ШУ) измеряет уровень напряжения на вводе от нагрузки  $L$  и сравнивает его с пороговым напряжением. Если измеренное напряжение не равняется пороговому, то ШУ осуществляет управляющее воздействие на электродвигатель, который переключает ступени ВДТ для повышения либо понижения уровня напряжения в линии.

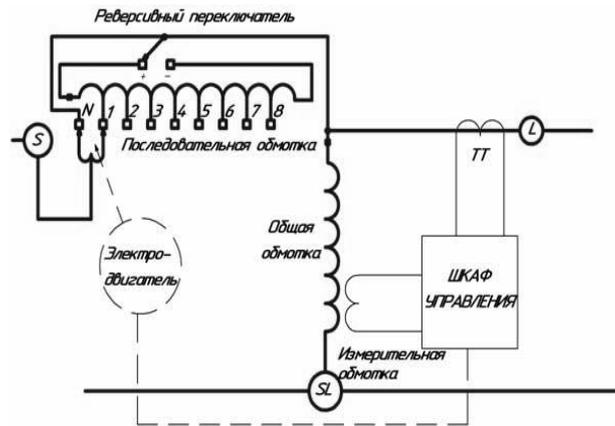


Рис. 2. Электрическая схема вольтодобавочного трансформатора  
 Fig. 2. The electrical circuit of the booster transformer

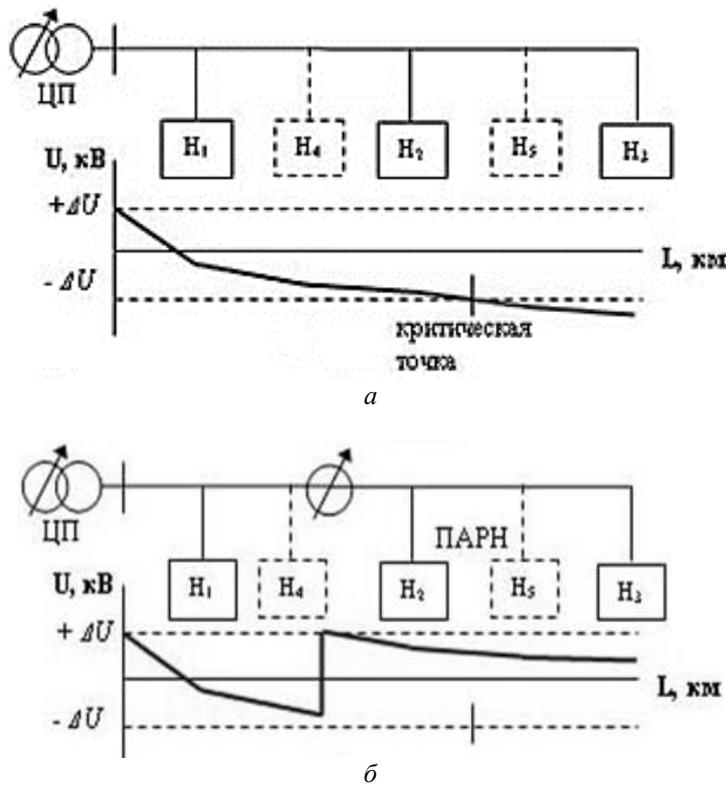


Рис. 3. Распределение напряжения вдоль воздушной линии при отсутствии (а) и установке (б) переключателя для автоматического регулирования напряжения  
 Fig. 3. Voltage distribution along the overhead line in the absence (a) and with installation (b) of the automatic voltage regulation switch

Пример распределения напряжения вдоль высоковольтной линии в случаях отсутствия и установки ВДТ представлены на рис. 3.

На данном рисунке введены обозначения: ЦП – центр питания, Н1, Н2, Н3 – существующая нагрузка, Н4, Н5 – нагрузка дополнительного регулирования напряжения; ПАРН – переключатель для автоматического регулирования

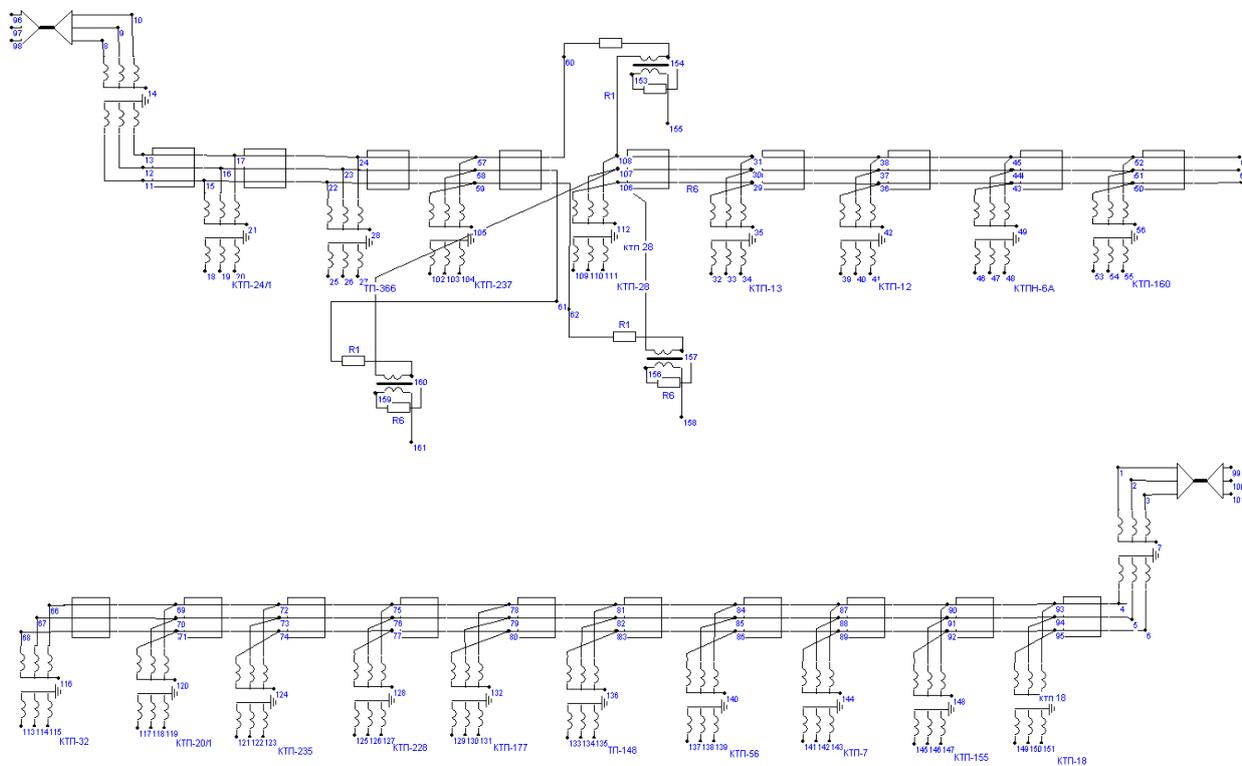
напряжения.

Таким образом, хорошо видно, что благодаря установке ВДТ происходит существенное увеличение напряжения в точке его подключения, позволяющее и на дальнейшей части воздушной линии иметь требуемый уровень напряжения.

Поскольку, согласно ранее представленным результатам моделирования, в случае од-

ностороннего питания исследуемого участка недопустимые просадки напряжения отмечены от точки подключения КТП-237 и далее, то ВДТ предлагается включить в работу в зоне

между КТП-237 и КТП-28. В разработанную модель СЭС внедрен указанный ВДТ (рис. 4). Уровни напряжений обмоток низкого напряжения после внедрения ВДТ сведены в табл. 2.



**Рис. 4.** Модель системы электроснабжения Кругобайкальской железной дороги в нормальном режиме работы с включением вольтодобавочного трансформатора в линию

**Fig. 4.** Model of the power supply system of the Circum-Baikal Railway in normal operation with the booster transformer included in the line

**Таблица 2.** Уровни напряжений обмоток низкого напряжения силовых трансформаторов комплектных трансформаторных подстанций после внедрения вольтодобавочного трансформатора

**Table 2.** Low voltage windings voltage levels of transformer substations' power transformers after the introduction of a booster transformer

Номер комплектной трансформаторной подстанции Part number of transformer substations	Вариант 1 Variant 1		Вариант 2 Variant 2	
	Уровень напряжения, $U$ , кВ Voltage level, $U$ , kV	Отклонение напряжения, $\Delta U$ , % Voltage deviation, $\Delta U$ , %	Уровень напряжения, $U$ , кВ Voltage level, $U$ , kV	Отклонение напряжения, $\Delta U$ , % Voltage deviation, $\Delta U$ , %
КТП-24/1	0,235	6,82	0,236	7,27
ТП-366	0,234	6,36	0,235	6,82
КТП-237	0,231	5,00	0,231	5,454
КТП-28	0,240	9,09	0,240	9,09
КТП-13	0,241	9,55	0,240	9,09
КТП-12	0,242	9,55	0,239	8,64
КТПН-6А	0,242	9,55	0,239	8,64
КТП-160	0,240	9,09	0,236	7,27
КТПН-32	0,227	3,18	0,230	4,55
КТП-20/1	0,226	2,73	0,230	4,55

КТП-235	0,229	4,09	0,228	3,64
КТП-228	0,221	0,45	0,218	-0,91
КТП-177	0,229	4,09	0,227	3,18
ТП-148	0,227	3,18	0,227	3,18
КТП-56	0,232	5,45	0,229	4,09
КТП-7	0,234	6,36	0,228	3,64
КТП-155	0,241	9,55	0,224	1,82
КТП-18	0,227	3,18	0,226	2,73

Результаты моделирования свидетельствуют о целесообразности использования ВТД на МПЗ между КТП-237 и КТП-28 (147 км), поскольку ни в одной точке подключения потребителей в вынужденном режиме в случае отключения одной из питающих подстанций Култук или порт Байкал отклонение напряжения не выходит за пределы допустимых значений. В нормальном режиме при двусторонней схеме питания имеется некоторый запас по уровню напряжения, который поможет обеспечить нормальные условия электроснабжения в случае увеличения нагрузок в СЭС КБЖД в связи с планируемым в перспективе развитием туризма.

### Заключение

В ходе проведенного в данной работе исследования выявлено, что при имеющихся нагрузках в СЭС КБЖД не обеспечивается требуемое качество электроэнергии для потребителей. Так, в нормальном режиме при двусторонней схеме питания участка отклонение напряжения достигает в отдельных узлах подключения КТП потребителей  $-8,64\%$  и  $+10\%$ , а при вынужденном режиме в случае одностороннего питания в отдельных точках МПЗ и вовсе достигает  $36,64\%$ . При таких отклонени-

ях напряжения работа электроприемников потребителей КБЖД невозможна. Тем более в этих условиях не может быть никакой речи об увеличении нагрузок за счет планируемого развития туризма в данном регионе.

Для нормализации качества электроэнергии, передаваемой потребителям КБЖД предлагается установка вольтодобавочных трансформаторов в критичных узлах схемы электроснабжения. Результаты моделирования в ПВК Fazonord исследуемой системы электроснабжения с учетом ее усиления путем внедрения ВДТ на 147 км КБЖД доказали эффективность данного способа усиления. Уровни напряжения в узлах подключения потребителей стали существенно выше, и даже в вынужденном режиме не наблюдается отклонений напряжения выше допустимых значений.

Таким образом, благодаря внедрению вольтодобавочных трансформаторов решается задача обеспечения требуемого качества электрической энергии для имеющихся потребителей СЭС КБЖД и обеспечивается потенциальная возможность подключения дополнительных потребителей в связи с развитием туризма в данном регионе.

### Список литературы

1. Безопасность железнодорожного транспорта в условиях Сибири и Севера / В.А. Акимов, В.А. Алексеенко, Р.С. Ахметханов и др. М. : Знание, 2014. 856 с.
2. 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. участием. Чита, 2022. Т. 1. С. 288–296.
3. Makasheva S., Pinchukov P., Szołtysek J. The power quality as a pretext for developing smart city concepts // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). Vladivostok, 2020. P. 1–7. DOI 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271462.
4. Shamanov V.I., Pulyakov A.V., Trofimov Y.A. Main electromagnetic jammer sources with impact on the railroad automation systems // International Conference on Information Technology in Business and Industry (ITBI 2020). Bristol. 2020. DOI 10.1088/1742-6596/1661/1/012012.
5. Kustov A., Zatsepin E., Zatsepina V. Analysis of the highest harmonic component in networks with isolated neutral in single-phase short circuit // 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). Lipetsk, 2021. P. 1113–1116. DOI 10.1109/SUMMA53307.2021.9632097.
6. Шевердин И.Н., Шаманов В.И., Трофимов Ю.А. Влияние тяжеловесных поездов на рельсовые цепи и АЛС // Автоматика, связь, информатика. 2004. № 8. С. 24.

7. Шаманов В.И., Трофимов Ю.А. Асимметрия тяговых токов под катушками АЛС // Автоматика, связь, информатика. 2008. № 11. С. 37–39.
8. Макашева С.И. Оценка синусоидальности кривых напряжения высоковольтной линии автоблокировки // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2019. № 4 (21). С. 88–91.
9. Куцкий А.П. Снижение несимметрии и несинусоидальности в линиях электропередач, питающих тяговые подстанции // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. 2018. Т. 1. С. 692–696.
10. Учет влияния устройств фильтрации и компенсации на показатели качества электрической энергии СТЭ при пропуске поездов повышенной массы / Е.А. Морозов, В.В. Фареньк, М.В. Востриков и др. // Молодая наука Сибири. 2022. № 4 (18). С. 94–108. URL: <https://ojs.irgups.ru/index.php/mns/article/view/933>. (дата обращения 01.02.2023).
11. 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.
12. Potapov V.V., Suslov K.V., Kostina K.V. Theoretical Bases of Electrical Engineering. Irkutsk : Irkutsk National Research Technical University, 2020. 158 p.
13. Соловской А.С., Решетко К.А. Реализация математической модели продольной винтовой прокатки в программном комплексе ANSYS // Электрофизические методы обработки в современной промышленности : материалы V Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов. Пермь, 2022. С. 67–70.
14. Куцкий А.П., Овечкин И.С., Галков А.А. Повышение пропускной способности участка Якурим – Киренга для обеспечения графика движения поездов с максимальной массой 7 100 тонн // Молодая наука Сибири. 2022. № 2 (16). С. 166–174. URL: <https://ojs.irgups.ru/index.php/mns/article/view/777> (дата обращения 01.02.2023).
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 : материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. Иркутск, 2015. Т. 1. С. 328–332.
16. 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. URL: <https://mnv.irgups.ru/k-povysheniyu-nadezhnosti-ustroystv-kontaktnoy-seti> (дата обращения 01.02.2023).
17. Электроснабжение децентрализованных потребителей с использованием возобновляемых источников энергии / Т.В. Сокольникова, И.Н. Шушпанов, К.В. Суслов и др. // Техничко-экономические проблемы развития регионов : материалы науч.-практ. конф. Иркутск, 2011. Вып. 7. С. 79–82.
18. Khudonogov I.A., Puzina E.Yu., Tuigunova A.G. Summarized diagnostic parameter for condition assessment of power transformer windings insulation // International Russian Automation Conference. 2019. DOI 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867610.
19. Филиппов Д.М., Ступицкий В.П., Лобанов О.В. Проблемы диагностики параметров контактной сети // Молодая наука Сибири. 2021. № 2 (12). С. 125–131. URL: <https://mnv.irgups.ru/problemu-diagnostiki-parametrov-kontaktnoy-seti> (дата обращения 01.02.2023).
20. 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.
21. Крюков А.В., Асташин С.М., Степанов А.Д. Системный анализ факторов, влияющих на эффективность тепловизионных обследований электрооборудования // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы Межвуз. науч.-практ. конф. Иркутск, 2009. Т. 2. С. 67–71.
22. Khudonogov I.A., Puzina E.Yu., Tuigunova A.G. Modeling turn insulation thermal aging process for traction substation transformer // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. 2020. DOI 10.1109/ICIEAM48468.2020.9112021.
23. 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. участием. Иркутск, 2013. Т. 2. С. 167–171.

## References

1. Akimov V.A., Alekseenko V.A., Akhmetkhanov R.S. et al. Bezopasnost' zheleznodorozhnogo transporta v usloviyakh Sibiri i Severa [Safety of railway transport in Siberia and the North]. Moscow: Znanie Publ., 2014. 856 p.
2. Kaimov E.V., Olentsevich V.A., Vlasova N.V. Problemy formirovaniya, razvitiya i rekonstruktsii elementov infrastruktornogo kompleksa zheleznikh 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.
3. Makasheva S., Pinchukov P., Szołtysek J. The Power Quality as a Pretext for Developing Smart City Concepts // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). Vladivostok, 2020, pp. 1–7. DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271462.
4. Shamanov V.I., Pulytkov A.V., Trofimov Y.A. Main electromagnetic jammer sources with impact on the railroad automation systems. 2020 *International Conference on Information Technology in Business and Industry (ITBI 2020)*. Bristol, 2020. DOI: 10.1088/1742-6596/1661/1/012012.

5. Kustov A., Zatspein E., Zatspeina V. Analysis of the Highest Harmonic Component in Networks with Isolated Neutral in Single-phase Short Circuit. *2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)*. Lipetsk, 2021, pp. 1113–1116. DOI: 10.1109/SUMMA53307.2021.9632097.
6. 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, pp. 24.
7. Shamanov V.I., Trofimov Yu.A. Asimmetriya tyagovykh tokov pod katuskami ALS [Asymmetry of traction currents under coils of automatic locomotive signaling]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communications, computer science], 2008, no. 11, pp. 37–39.
8. Makasheva S.I. Otsenka sinusoidal'nosti krivykh napryazheniya vysokovol'tnoi linii avtoblokirovki [Evaluation of the sinusoidal voltage curves of the high-voltage auto-locking line]. *Transport Aziatsko-Tikhoookeanskogo regiona* [Transport of the Asia-Pacific region], 2019, no. 4 (21), pp. 88–91.
9. Kutsyi A.P. Snizhenie nesimmetrii i nesinusoidal'nosti v liniyakh elektroperedach, pitayushchikh tyagovye podstantsii [Reduction of asymmetry and non-sinusoidality in power lines feeding traction substations]. *Materialy IX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona»* [Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference «Transport infrastructure of the Siberian region»]. Irkutsk, 2018, vol. 1, pp. 692–696.
10. Morozov E.A., Farenok 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 [Taking into account the influence of filtration and compensation devices on the quality indicators of the electric energy of the traction power supply system when passing trains of increased mass]. *Molodaya nauka Sibiri* [The young science of Siberia], 2022, no. 4 (18), pp. 94–108.
11. 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.
12. Potapov V.V., Suslov K.V., Kostina K.V. Theoretical Bases of Electrical Engineering. Irkutsk : Irkutsk National Research Technical University, 2020. 158 p.
13. Solovskoi A.S., Reshetko K.A. Realizatsiya matematicheskoi modeli prodol'noi vintovoi prokatki v programmnom komplekse ANSYS [Implementation of a mathematical model of longitudinal screw rolling in the ANSYS software package]. *Materialy V Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov «Elektrofizicheskie metody obrabotki v sovremennoi promyshlennosti»* [Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference of Young scientists, postgraduates and students «Electro-physical processing methods in modern industry»]. Perm', 2022. pp. 67–70.
14. Kutsyi A.P., Ovechkin I.S., Galkov A.A. Povyshenie propusknoi sposobnosti uchastka Yakurim – Kirenga dlya obespecheniya grafika dvizheniya poezdov s maksimal'noi massoi 7 100 tonn [Increasing the capacity of the Yakurim – Kirenga section to ensure the schedule of trains with a maximum weight of 7,100 tons]. *Molodaya nauka Sibiri* [The young science of Siberia], 2022, no. 2 (16), pp. 166–174.
15. Pul'tyakov A.V., Trofimov Yu.A., Skorobogatov M.E. Kompleksnye resheniya po povysheniyu ustoichivosti 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.
16. 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.
17. Sokol'nikova T.V., Shushpanov I.N., Suslov K.V., Potapov V.V. Elektrosnabzhenie detsentralizovannykh potrebitel'ei s ispol'zovaniem vozobnovlyаемykh istochnikov energii [Power supply of decentralized consumers using renewable energy sources]. *Materialy nauchno-prakticheskoi konferentsii «Tekhniko-ekonomicheskie problemy razvitiya regionov»* [Proceedings of the scientific and practical conference «Technical and economic problems of regional development»]. Irkutsk, 2011, is. 7, pp. 79–82.
18. Khudonogov I.A., Puzina E.Yu., Tuigunova A.G. Summarized Diagnostic Parameter for Condition Assessment of Power Transformer Windings Insulation. *International Russian Automation Conference*. 2019. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867610.
19. Filippov D.M., Stupitskii V.P., Lobanov O.V. Problemy diagnostiki parametrov kontaktnoi seti [Problems of diagnostics of contact network parameters]. *Molodaya nauka Sibiri* [The young science of Siberia], 2022, no. 2 (12), pp. 125–131.
20. 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*. 9271385. DOI 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271385.
21. Kryukov A.V., Astashin S.M., Stepanov A.D. Sistemnyi analiz faktorov, vliyayushchikh na effektivnost' teplovizionnykh obsledovaniy elektrooborudovaniya [System analysis of factors affecting the effectiveness of thermal imaging surveys of electrical equipment]. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona»* [Proceedings of the Interuniversity scientific and practical conference «Transport infrastructure of the Siberian region»]. Irkutsk, 2009, vol. 2, pp. 67–71.
22. Khudonogov I.A., Puzina, E.Yu., Tuigunova A.G. Modeling turn insulation thermal aging process for traction substation transformer. *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing*. 2020. DOI:10.1109/ICIEAM48468.2020.9112021.

23. Puzina E.Yu. Tselesoobraznost' primeneniya sistemy monitoringa silovykh transformatorov [The expediency of using a monitoring system for power transformers]. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskaya 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, 2013, vol. 2, pp. 167–171.

#### **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 электро-техники, 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.