

Анализ ремонтных режимов работы системы электроснабжения участка Тайшет – Тулун Восточно-Сибирской железной дороги

Е. Ю. Пузина^{1,2}, И. А. Худонов¹✉

¹ Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

² Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ hudonogovi@mail.ru

Резюме

Одним из наиболее проблемных участков Восточно-Сибирской железной дороги является участок Тайшет – Тулун, где при организации ремонтных режимов отмечается не только понижение уровня напряжения в контактной сети, но и значительно снижается напряжение в питающих линиях системы внешнего электроснабжения при возрастании нагрузок воздушных линий. С учетом роста объема грузоперевозок в перспективе до 2025 г., а также с целью проверки необходимости усиления систем внешнего и тягового электроснабжения исследуемого участка железной дороги на основе программно-вычислительного комплекса «Fazonord» была разработана комбинированная модель данных систем при различных комбинациях усиления. С целью обеспечения заданной пропускной способности участка исследован ряд возможных способов усиления, одним из которых является комбинация с установкой автотрансформатора, включением трансформаторов на параллельную работу и увеличением сопротивления устройства параллельной компенсации. Данное сочетание устройств электроснабжения почти идеально подходит как по качеству напряжения, так и по токам в контактной сети и воздушной линии, однако не является оптимальным из-за превышения предельно допустимого значения тока в устройстве продольной компенсации. Модель усиления предполагает установку автотрансформатора на распределительной районной подстанции Нижнеудинска с включением в параллель на трансформаторных подстанциях Замзора, Ука и Нижнеудинска тяговых трансформаторов и монтаж компенсирующего устройства на посту секционирования Худоеланского.

Ключевые слова

усиление системы электроснабжения, автотрансформатор, тяговые трансформаторы, устройство продольной компенсации, устройство параллельной компенсации, пост секционирования

Для цитирования

Пузина Е. Ю. Анализ ремонтных режимов работы системы электроснабжения участка Тайшет – Тулун Восточно-Сибирской железной дороги / Е. Ю. Пузина, И. А. Худонов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 1 (69). – С. 223–234. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).223-234

Информация о статье

поступила в редакцию: 05.12.2020, поступила после рецензирования: 19.12.2020, принята к публикации: 12.01.2021

Analysis of power supply system repair modes of the Tayshet – Tulun section of the East Siberian railway

E. Yu. Puzina^{1,2}, I. A. Khudonogov¹✉

¹ Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

² Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ hudonogovi@mail.ru

Abstract

One of the most problematic sections of the East Siberian Railway is the Tayshet – Tulun section, where, when organizing repair modes, one can note not only a decrease in the voltage level in the overhead contact system, but also a significant decrease in the voltage in the supply lines of the external power supply system with an increase in the loads of overhead lines. Taking into account the growth in the cargo transportation volume to the year 2025 and beyond, as well as in order to verify the need to strengthen the external and traction power supply systems of the railway section under study on the basis of the Fazonord software package, a combined model of these systems was developed with various combinations of reinforcement. In order to ensure the specified throughput capacity of the section, a number of possible reinforcement methods have been investigated, one of which is a combination with the installation of an autotransformer, the inclusion of transformers for parallel operation and an increase in the resistance of the parallel capacitor bank. This combination of power supply devices is almost ideal both in terms of voltage quality and currents in the overhead contact system and overhead line. However, it is not optimal due to the excess of the maximum permissible current value in the series capacitor bank. The reinforcement model assumes the installation of an autotransformer at the distribution point of Nizhneudinsk with the connection of traction transformers in parallel at the traction substations of Zamzora, Uka and Nizhneudinsk, and the installation of a compensating device at the sectioning station of Khudoelansky.

Keywords

power supply system reinforcement, autotransformer, traction transformers, longitudinal compensation device, parallel compensation devices, post-partitioning

For citation

Puzina E. Yu., Khudonogov I. A. Analiz remontnykh rezhimov raboty sistemy elektrosnabzheniya uchastka Taishet – Tulun Vostochno-Sibirskoi zheleznoi dorogi [Analysis of power supply system repair modes of the Tayshet – Tulun section of the East Siberian railway]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 1 (69), pp. 223–234. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).223-234

Article Info

Received: 05.12.2020, Revised: 19.12.2020, Accepted: 12.01.2021

Введение

В настоящее время актуальна проблема увеличения объема грузоперевозок на железнодорожном транспорте с учетом организации движения тяжеловесными поездами массой 7 100 т, двояными поездами массой 12 600 т. При этом возрастает нагрузка как на систему тягового электроснабжения (СТЭ), так и на систему внешнего электроснабжения (СВЭ) [1–4]. При этом большая часть электрифицированных железных дорог была проложена в XX в. и рассчитана на меньшие объемы грузоперевозок [5–8].

Повышение нагрузок на воздушную линию (ВЛ) СВЭ, на контактную сеть (КС) и тяговые трансформаторы СТЭ особенно сильно проявляются в ремонтных режимах работы при отключении таких важных их элементов, как участки питающих ВЛ, автотрансформаторы на крупных районных подстанциях [9–14].

На Восточно-Сибирской железной дороге (ВСЖД) в последние годы обострилась данная проблема на участке Тайшет – Тулун, где при необходимости организации ремонтных режимов отмечается не только понижение уровня напряжения в КС, но и в питающих линиях из-за существенно возрастающих нагрузок ВЛ. Это говорит о недостаточной мощности СВЭ и приводит к необходимости рассмотрения вопроса об установке дополнительных автотрансформаторов, связывающих ВЛ-110 и ВЛ-220 кВ. Также необходимо рассмотреть вопрос об усилении СТЭ указанного участка различными средствами: установкой кодирующих устройств (КУ) и устройствами параллельной компенсации (УПК), организацией параллельной схемы питания КС, включением на параллельную работу тяговых трансформаторов [15–19].

Описание проблемной ситуации и постановка задачи

По данным филиала АО «Системный оператор Единой энергетической системы» (СО ЕЭС) выявлено, что при анализе токовых нагрузок транзита ТШ – ТЛ в соответствии с данными сертифицированной автоматизированной информационно-измерительной системы коммерческого учета электроэнергии (АИИС КУЭ) в период с 7 по 17 ноября

2018 г. токи по ВЛ-110 кВ 33-ТШ значительно увеличились по сравнению с предыдущим и последующим периодами. При этом анализ исполненных графиков движения поездов показывает, что интенсивность потребления тяговых нагрузок 14 ноября 2018 г. принципиально не отличается от предыдущих и последующих периодов.

Необходимо отметить, что с 7 по 17 ноября 2018 г. в соответствии с данными АИИС КУЭ значительно увеличился переток мощности по ВЛ-110 кВ от ХЛ до ТЛ. Например, 14 ноября за вычетом нагрузки ПС-110 БД с колебаниями от 30 до 61 МВА – при отсутствии какой-либо иной тяговой нагрузки на этом участке. Данный дополнительный переток, создавая добавочную нагрузку на транзит в совокупности с тяговой нагрузкой, и привел к отключению ШСВ-110 ПС 110 НУД при ненормальной схеме питания.

Анализируя схемы электроснабжения за период 7–17 ноября 2018 г., необходимо отметить, что в данное время была выведена в ремонт воздушная линия ВРЗ – НУД. Данное обстоятельство с большой долей вероятности и привело к увеличению дополнительного перетока, так как с 18 ноября 2018 г он не превышает 30 МВА и нередко имеет отрицательную направленность. Соответственно и токи по ВЛ-110 кВ 33 – ТШ Тайшет значительно снизились и по данным АИИС КУЭ не превышают величины 400 А, а уровень напряжения 110 кВ на тяговых подстанциях транзита ТШ – ТЛ стабилизировался.

Из протокола совещания Иркутской электросетевой компании (ИЭС) [13], на которой присутствовали представители ООО «Транснефть-Восток», ООО «Транснефть-энерго», филиала ОАО «РЖД» – Восточно-Сибирская дирекция инфраструктуры, а также филиала СО ЕЭС «Региональное диспетчерское управление энергосистемы Иркутской области», следует, что рассматривалась проблема по обеспечению надежности и качества поставляемой электрической энергии на Нижнеудинскую нефтеперерабатывающую станцию. В ходе данного совещания представители сделали вывод, что основной проблемой являются коэффициенты несимметрии напряжений по обратной последовательности, значения которых в большинстве рассмотренных ре-

жимов превышают 4 % (предельно-допустимое значение), коэффициенты напряжений гармоник и не-синусоидальности превышают нормы ГОСТ 32144-2013. При этом выявлено, что источником искажений напряжений являются тяговые нагрузки ОАО «РЖД». На сегодняшний день питание тяговой нагрузки и районной нагрузки осуществляется по разным трансформаторам.

Необходимо отметить, что потребляемая тяговыми подстанциями мощность транзита на участке ТШ–ТЛ не превышает разрешенную мощность. Исходя из опыта эксплуатации следует, что СВЭ 110 кВ ТШ–ТЛ давно выработала свой ресурс по пропускной способности. Это подтверждается фактическими измерениями и нестабильным уровнем напряжения в сети 110 кВ. Внедрение различных компенсирующих, стабилизирующих и иных устройств для повышения пропускной способности системы 110 кВ, как показала практика внедрения БСК на ПС ВД, БСК на ПС СБ и других объектах, не приводит к повышению показателей качества электроэнергии. Единственным надежным средством улучшения является усиление системы, как произошло при включении ВЛ-500 кВ по ПС Усть-Кут, где качество после включения улучшилось в два раза. По всей вероятности, и в данном случае наиболее надежным вариантом усиления сети является подпитка транзита 110 кВ от линии 220 (500) кВ с установкой автотрансформатора (АТ) по РП НУД.

Таким образом, можно сделать вывод, что участок ТШ – ТЛ требует масштабного усиления для обеспечения достаточной пропускной способности СВЭ, пропуска поездов необходимой массы с потребным минимальным межпоездным интервалом и требований к качеству напряжения не только в нормальном режиме, но и особенно в ремонтных режимах энергосистемы.

Анализ параметров ремонтных режимов работы системы тягового электроснабжения участка ТШ – ТЛ

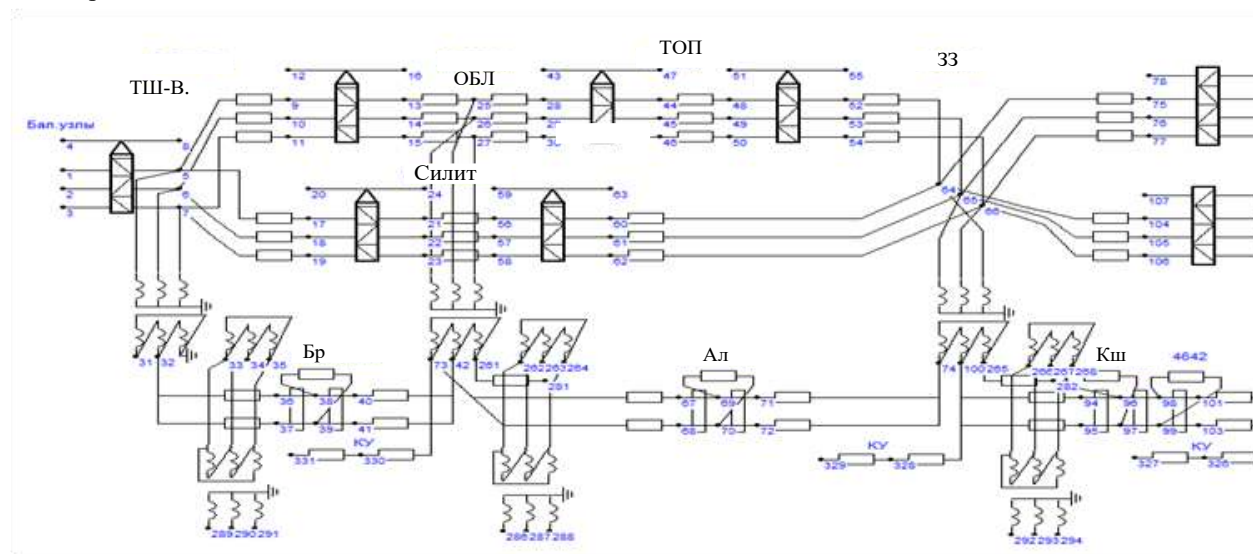
Для исследуемого участка наиболее тяжелыми ремонтными режимами являются:

1. Вывод ВЛ ВРЗ – НУД;
2. Вывод ВЛ НУД – ХЛ;
3. Вывод ВЛ ТШ – СЛ.

С целью оценки параметров указанных ремонтных режимов выполнено моделирование совместно СВЭ и СТЭ участка Тайшет – Тулун в программно-вычислительном комплексе «Fazonord» (рис. 1).

Данные по изменению напряжения в ремонтном режиме 1, полученные в «Fazonord», представлены ниже (рис. 2), (табл. 1).

Также в ремонтном режиме 1 по результатам расчета получен максимальный ток ВЛ-110 кВ, равный 521,3 А, превышающий ее допустимый ток 510 А, на участке 33 – ВРЗ. При этом коэффициенты загрузки СТ на тяговых подстанциях 33, УК, НУД превышают максимально допустимое значение и составляют соответственно 2,15; 2,14; 2,08. В ремонтном режиме 2 получен максимальный ток ВЛ-110 кВ, равный 538 А, превышающий ее допустимый ток 510 А, на участке НУД – РБ. При этом коэффициенты загрузки СТ на тяговых подстанциях участка не превысили максимально допустимого значения. В ремонтном режиме 2 получен максимальный ток ВЛ-110 кВ, равный 562 А, превышающий ее допустимый ток 510 А, на участке ТШ – ОБЛ. При этом коэффициенты загрузки СТ на тяговых подстанциях 33, УК, НУД превышают максимально допустимое значение и составляют соответственно 2,16; 2,17; 2,14. Уровень напряжения в контактной сети явно ниже минимально допустимого во всех трех ремонтных режимах.



a

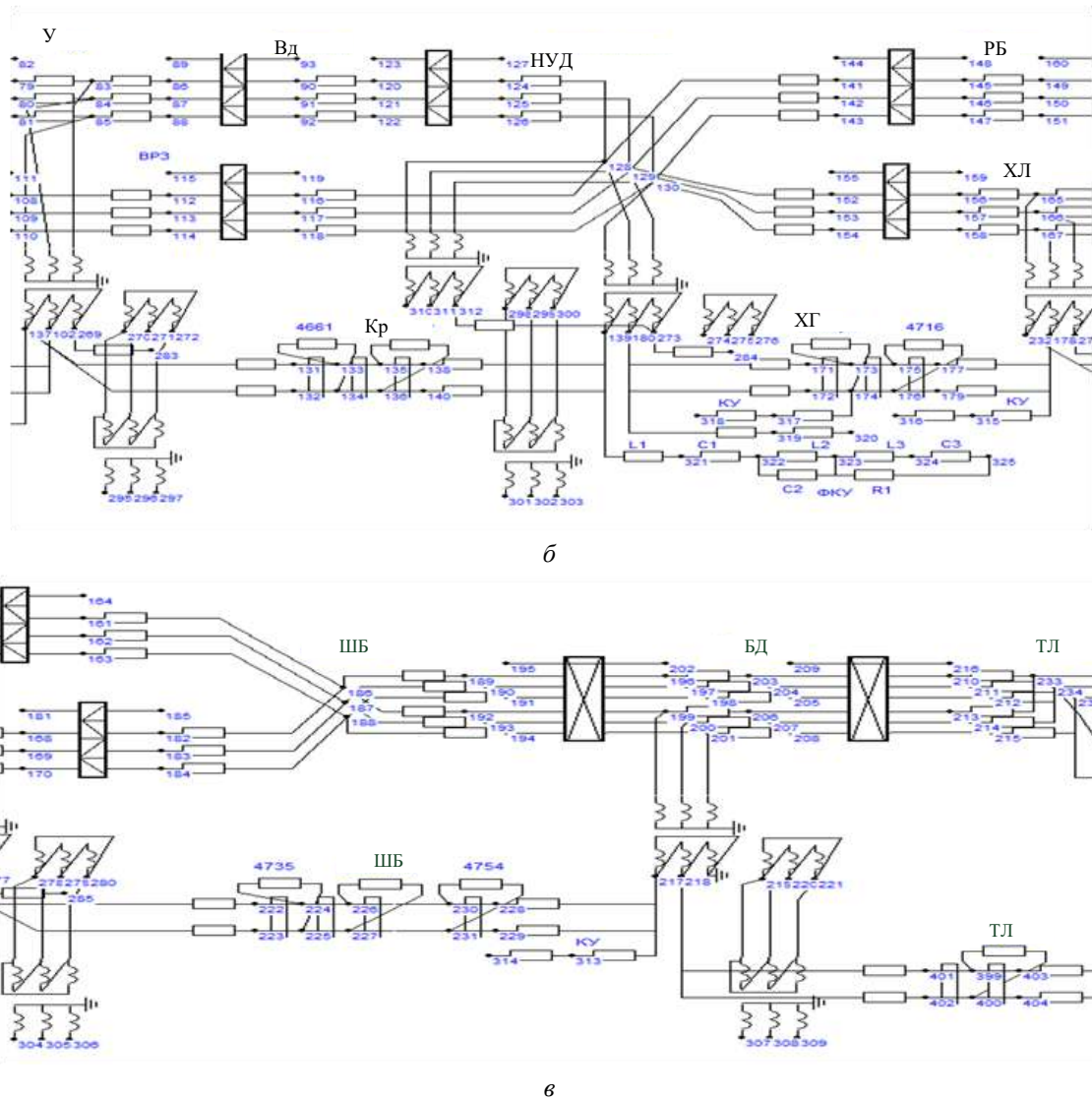


Рис. 1. Расчетная модель участка ТШ – ТЛ: *а* – 1 участок; *б* – 2 участок; *в* – 3 участок
Fig. 1. Design model of the Tayshet – Tulun section: *a* – 1 section; *b* – section 2; *c* – section 3

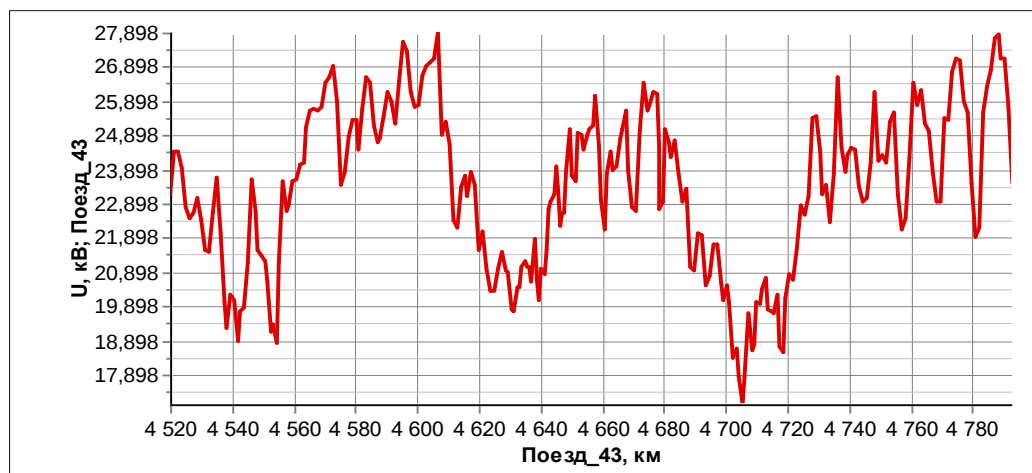


Рис. 2. График изменения напряжения четного поезда от координаты в ремонтном режиме 1
Fig. 2. The graph of the voltage variation of the up train from the coordinate in repair mode 1

Таблица 1. Полученные данные при схеме без усиления в ремонтных режимах
Table 1. Obtained data for a diagram without reinforcement in repair modes

Ремонтный режим	Данные по нескольким поездам (в четном и нечетном направлениях)	Минимальное напряжение в контактной сети $U_{\min \text{ КС}}$, кВ	Максимальный ток в контактной сети $I_{\max \text{ КС}}$, А
1 (вывод воздушной линии ВРЗ – Нижнеудинск)	четное	19,343	795,35
	четное	17,034	870,56
	четное	16,611	877,6
	нечетное	17,93	390
	нечетное	18,556	456,6
2 (вывод воздушной линии НУД-ХЛ)	четное	17,652	876,31
	четное	17,415	838,86
	четное	17,679	851,95
	нечетное	17,361	796,11
	нечетное	18,474	785,38
3 (вывод воздушной линии ТШ – СЛ)	четное	18,323	735,58
	четное	16,058	780,56
	четное	15,650	777,74
	нечетное	16,730	360
	нечетное	17,756	413,26

Таким образом, видим, что при трех различных ремонтных режимах напряжение в контактной сети не соответствует минимально допустимому значению (в четном 15,65 кВ, в нечетном 16,73 кВ). Ток ВЛ превышает предельно допустимые значения. Качество электрической энергии по коэффициенту несимметрии напряжения по обратной последовательности также не соответствует ГОСТ-32144-2013 и превышает нормально допустимое значение. Следовательно, для обеспечения требуемых параметров режима работы СЭС исследуемого участка в ремонтных режимах необходимо провести ее усиление.

Предложения по усилению системы электроснабжения

Для обеспечения стабильной работы СВЭ и СТЭ участка ТШ – ТЛ в ремонтных режимах проанализи-

зирован ряд способов усиления. Рассмотрим те из них, которые обеспечивают нормальный уровень напряжения в КС.

Способ усиления 1.

Включение трансформаторов в параллельную работу, увеличение мощности КУ и увеличение сопротивления УПК в ремонтных режимах.

Далее приведены результаты расчета основных параметров, учитываемых в ремонтных режимах на участке при данном варианте усиления (табл. 2–4), графически изображено сравнение напряжения ремонтных режимов до усиления и после для способа усиления 1 (рис. 3).

Способ усиления 2.

Установка автотрансформатора на РП НУД, включение тяговых трансформаторов на параллельную работу и увеличение сопротивления УПК в ремонтных режимах.

Таблица 2. Сравнение напряжения и тока контактной сети при различных ремонтных режимах (способ усиления 1)

Table 2. Comparison of voltage and current of the overhead contact system under various repair modes (reinforcement method 1)

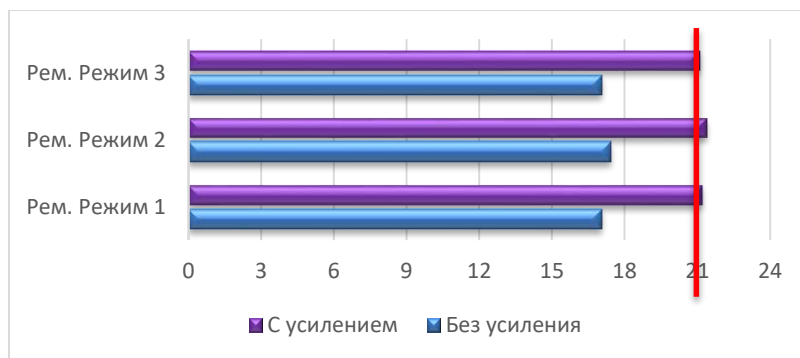
Ремонтный режим	Данные по нескольким поездам (в четном и нечетном направлениях)	Минимальное напряжение в контактной сети $U_{\min \text{ КС}}$, кВ	Максимальный ток в контактной сети $I_{\max \text{ КС}}$, А
1	четное	21,35	637,4
	четное	21,18	634,24
	нечетное	21,09	349,52
	нечетное	21,25	346,7
2	четное	21,43	640,8
	четное	21,37	675,9
	нечетное	21,13	348,6
	нечетное	21,85	324,8
3	четное	21,69	639,54
	четное	21,08	643,96
	нечетное	21,23	344,01
	нечетное	22,55	338,8

Таблица 3. Сравнение тока воздушной линии при различных ремонтных режимах (способ усиления 1)**Table 3.** Comparison of overhead line current under various repair modes (amplification method 1)

Ремонтный режим	Участок с максимальным током на воздушной линии	Максимальный ток воздушной линии $I_{\max \text{ВЛ}}$, А
1	ЗЗ – ВРЗ	468,5
2	НУД – РБ	522,2
3	ТШ – ОБЛ	562,2

Таблица 4. Коэффициенты загрузки трансформаторов при различных ремонтных режимах (способ усиления 1)**Table 4.** Load factors of transformers under various repair modes (reinforcement method 1)

	Коэффициент загрузки		
	Ремонтный режим 1	Ремонтный режим 2	Ремонтный режим 3
Тайшет	0,65	0,64	0,61
Облепиха	0,55	0,55	0,49
Замзор	1,49	1,32	1,48
Ук	1,35	0,99	1,36
Нижеудинск	1,25	1,28	1,35
Худоеланская	1,05	1,02	1,21
Будагово	0,81	0,78	0,81

**Рис. 3.** Сравнение напряжения в ремонтных режимах (способ усиления 1)**Fig. 3.** Comparison of voltage in repair modes (reinforcement method 1)

Приведены расчеты основных параметров, учитываемых в ремонтных режимах на участке при данном варианте усиления (табл. 5–7), графически

изображено сравнение напряжения ремонтных режимов до усиления и после для способа усиления 2 (рис. 4).

Таблица 5. Сравнение напряжения и тока контактной сети при различных ремонтных режимах (способ усиления 2)**Table 5.** Comparison of voltage and current of the contact network under various repair modes (reinforcement method 2)

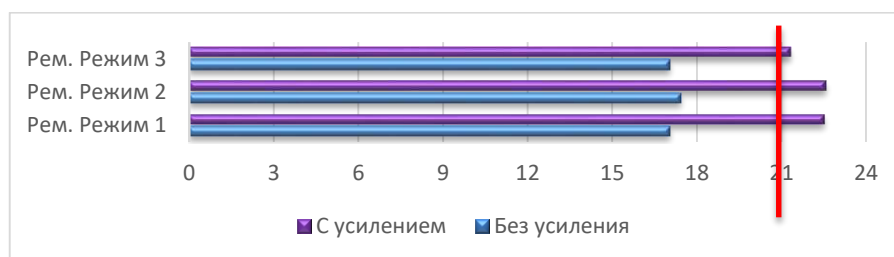
Ремонтный режим	Данные по нескольким поездам (в четном и нечетном направлении)	Минимальное напряжение в контактной сети $U_{\min \text{КС}}$, кВ	Максимальный ток в контактной сети $I_{\max \text{КС}}$, А
1	четное	22,51	608,48
	четное	22,5	616,16
	нечетное	22,52	328,53
	нечетное	22,61	339,26
2	четное	22,6	607,087
	четное	22,57	617,756
	нечетное	22,55	328,89
	нечетное	22,64	339,43
3	четное	21,97	685,9
	четное	21,32	646,56
	нечетное	22,01	328,58
	нечетное	22,21	339,142

Таблица 6. Сравнение тока воздушной линии при различных ремонтных режимах (способ усиления 2)**Table 6.** Comparison of overhead line current under various repair modes (reinforcement method 2)

Ремонтный режим	Участок с максимальным током на воздушной линии	Максимальный ток воздушной линии $I_{\max ВЛ}$, А
1	ЗЗ – ВРЗ	443,1
2	НУД – РБ	412,3
3	ТШ – ОБЛ	437,5

Таблица 7. Коэффициенты загрузки трансформаторов при различных ремонтных режимах (способ усиления 2)**Table 7.** Load factors of transformers under various repair modes (reinforcement method 2)

Коэффициент ТП загрузки	Ремонтный режим 1	Ремонтный режим 2	Ремонтный режим 3
Тайшет	0,65	0,67	0,71
Облепиха	0,54	0,54	0,64
Замзор	1,45	1,47	1,55
Ук	1,35	1,1	1,44
Нижеудинск	1,27	1,34	1,42
Худоеланская	0,96	0,95	1,09
Будагово	0,83	0,84	0,83

**Рис. 4.** Сравнение напряжения в ремонтных режимах (способ усиления 2)**Fig. 4.** Comparison of voltage in repair modes (reinforcement method 2)

Способ усиления 3.

Установка автотрансформатора на РП НУД, включение трансформаторов на параллельную работу и увеличение мощности КУ на ПС ХГ в ремонтных режимах.

Приведены расчеты основных параметров, учитываемых в ремонтных режимах на участке при данном варианте усиления (табл. 8–10), графически изображено сравнение напряжения ремонтных режимов до усиления и после для способа усиления 3 (рис. 5).

Заключение

Сравнительный анализ полученных результатов по способам усиления позволил сделать ряд выводов. При этом модель СЭС при оптимальном способе усиления отображена на (рис. 6).

При установке автотрансформатора и включении силовых трансформаторов на тяговых подстанциях в параллель уровень напряжения в КС почти во всех

режимах удалось увеличить до минимально допустимого, за исключением режима с выводом ВЛ ТШ – СЛ.

При установке автотрансформатора и включении КУ и УПК удалось добиться нужных результатов по напряжению в ремонтных режимах, однако ток ВЛ превышает допустимое значение.

Комбинация с установкой автотрансформатора, включением трансформаторов на параллельную работу и увеличением сопротивления УПК на первый взгляд идеально подходит как по качеству напряжения, так и по токам в КС и ВЛ. Однако, прежде чем окончательно выбрать этот вариант, необходимо рассмотреть ток на элементах УПК (в нормальном режиме максимальный ток на элементах УПК $I_{упк} = 1\,755,5$ А, в ремонтных $I_{упк} = 1\,930,4$ А; $I_{упк} = 1\,912,2$ А; $I_{упк} = 1\,948,6$ А). Оказалось, что ток на элементах УПК превышает предельно допустимое значение 1 600 А. Поэтому данный вариант не подходит в качестве оптимального способа усиления.

Таблица 8. Сравнение напряжения и тока контактной сети при различных ремонтных режимах (способ усиления 3)

Table 8. Comparison of voltage and current of the overhead contact system under various repair modes (reinforcement method 3)

Ремонтный режим	Данные по нескольким поездам (в четном и нечетном направлении)	Минимальное напряжение в контактной сети $U_{\min \text{ КС}}$, кВ	Максимальный ток в контактной сети $I_{\max \text{ КС}}$, А
1	четное	21,98	635,91
	четное	21,14	657,32
	нечетное	21,38	340,75
	нечетное	22,21	339,34
2	четное	21,86	635,69
	четное	21,07	658,54
	нечетное	21,37	341,6
	нечетное	22,12	339,9
3	четное	21,26	645,7
	четное	21,12	670,6
	нечетное	21,16	344,75
	нечетное	21,14	341,4

Таблица 9. Сравнение тока воздушной линии при различных ремонтных режимах (способ усиления 3)

Table 9. Comparison of overhead line current under various repair modes (reinforcement method 3)

Ремонтный режим	Участок с максимальным током на воздушной линии	Максимальный ток воздушной линии $I_{\max \text{ ВЛ}}$, А
1	ЗЗ – ВРЗ	441,2
2	НУД – РБ	421,4
3	ТПШ – ОБЛ	451,2

Таблица 10. Коэффициенты загрузки трансформаторов при различных ремонтных режимах (способ усиления 3)

Table 10. Load factors of transformers under various repair modes (reinforcement method 3)

Кэффициент ТПЗагрузки	Ремонтный режим 1	Ремонтный режим 2	Ремонтный режим 3
Тайшет	0,91	0,71	0,77
Облепиха	0,84	0,58	0,84
Замзор	1,32	1,44	1,52
Ук	1,28	1,32	1,46
Нижнеудинск	1,32	1,35	1,34
Худоеланская	0,98	0,96	1,12
Будагово	0,84	0,84	0,84

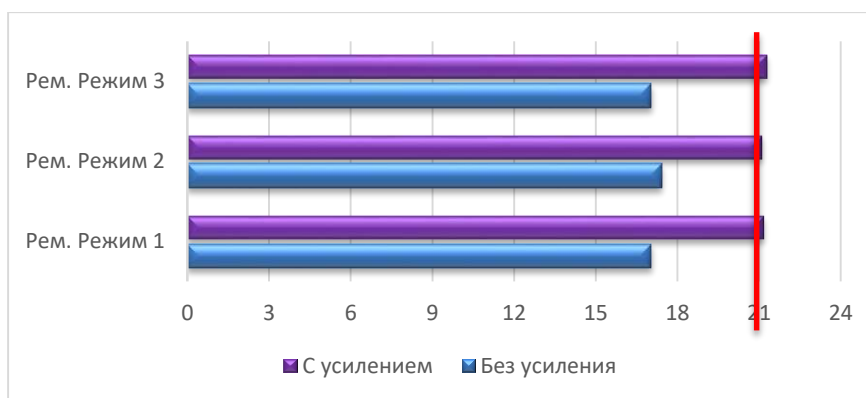
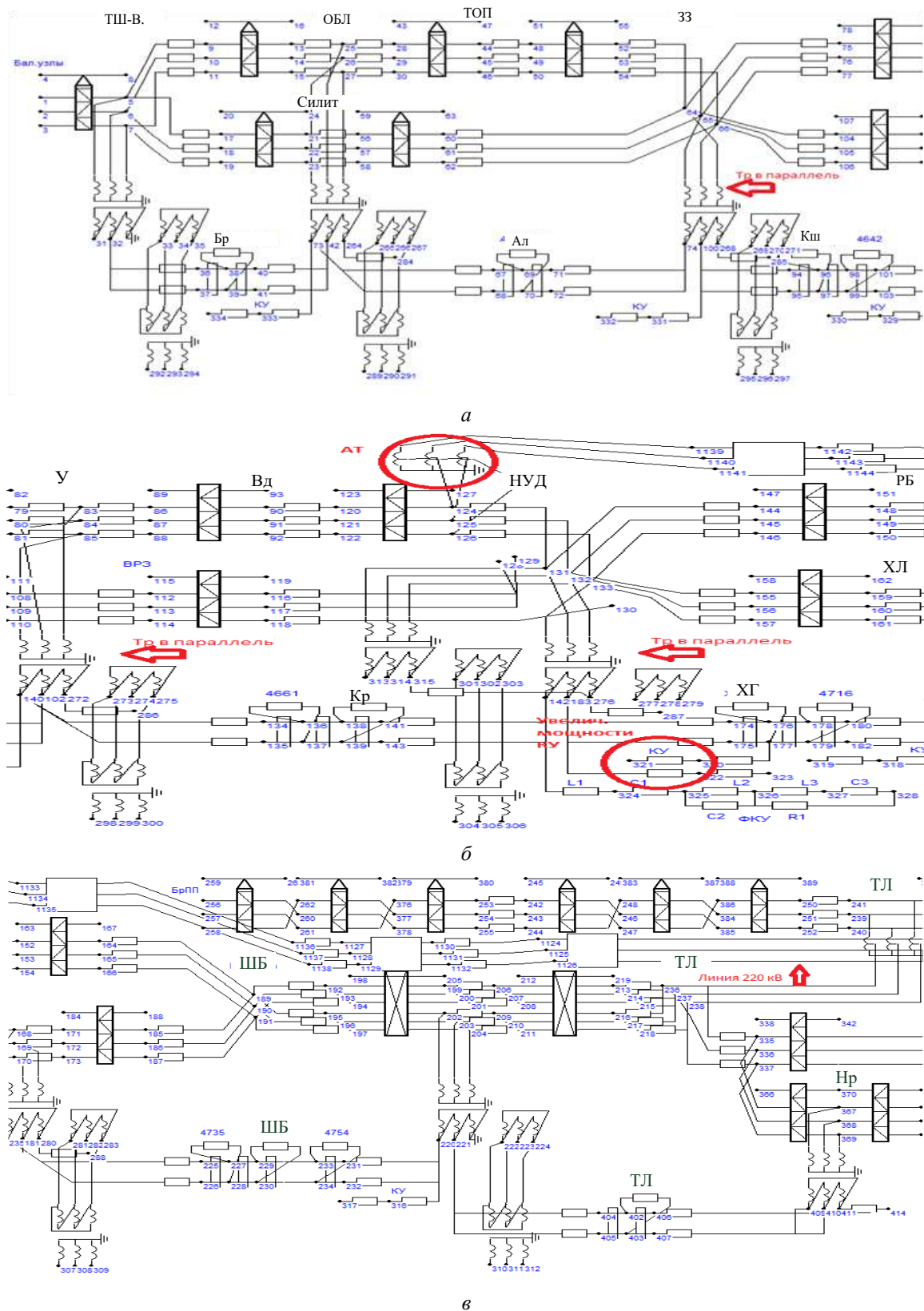


Рис. 5. Сравнение напряжения в ремонтных режимах (способ усиления 3)

Fig. 5. Comparison of voltage in repair modes (reinforcement method 3)



Из всех рассмотренных вариантов усиления наиболее оптимальным является комбинированный вариант усиления – установка автотрансформатора на РП Нижнеудинск, включение тяговых трансформаторов в параллель на ТП 33, УК и НУД и монтаж КУ на посту секционирования ХГ. Именно этот способ усиления позволяет достичь требуемых показа-

телей как в СВЭ, так и в СТЭ исследуемого участка. Вместе с тем окончательный выбор конкретных решений по усилению системы электроснабжения участка Тайшет – Тулун должен в настоящее время осуществляться в соответствии с требованиями системы энергетического менеджмента [20–23].

Список литературы

1. Пузина Е.Ю. Усиление системы тягового электроснабжения участка Якурим-Звездная ВСЖД // Транспорт-2013 : тр. Междунар. науч.-практ. конф. Ростов-н/Д : Изд-во РГУПС, 2013. С. 176–178.
2. Пузина Е.Ю. Усиление системы тягового электроснабжения участка Чуро-Таксимо ВСЖД // Транспорт: наука, образование, производство : тр. Междунар. науч.-практ. конф. Ростов н/Д, 2016. С. 306–310.
3. Cherepanov A., Kutsiy A. Modeling of Tractive Power Supply Systems for Heavy-Tonnage Trains Operation // International Russian Automation Conference, RusAutoCon2018. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501734.
4. Пузина Е.Ю. Оценка потенциала повышения энергоэффективности системы тягового электроснабжения Абаканской дистанции электроснабжения // Транспорт: наука, образование, производство : сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. Ростов н/Д, 2017. С. 149–153.
5. Пузина Е.Ю. Усиление системы тягового электроснабжения участка Ния-Киренга Восточно-Сибирской железной дороги // Электрификация и развитие инфраструктуры энергообеспечения тяги поездов на железнодорожном транспорте : материалы VI Междунар. симпозиума ELTRANS-2011. СПб., 2013. С. 464–468.
6. Туйгунова А.Г., Худоногов И.А., Пузина Е.Ю. О переводе питания СЦБ с 27,5 кВ на нетяговую обмотку на тяговой подстанции переменного тока // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2018. № 4 (60). С. 93–98.
7. Физические основы проектирования электротяговых сетей высокоскоростных железнодорожных магистралей / А.Т. Бурков, В.В. Сероносков, Е.В. Кудряшов и др. // Транспорт Российской Федерации. 2015. № 2 (57). С. 36–41.
8. Сравнительный анализ методов решения транспортных задач при оптимальном планировании перевозочного процесса / О.А. Лебедева, В.Е. Гозбенко, А.А. Пыхалов и др. // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2020. № 3 (67). С. 134–139.
9. Крюков А.В., Куций А.П., Черепанов А.В. Улучшение качества электроэнергии в сетях 110–220 кВ, питающих тяговые подстанции // Электроэнергетика глазами молодежи – 2017 : материалы VIII Междунар. науч.-технич. конф. Самара, 2017. С. 318–321.
10. Khudonogov I.A., Puzina E.Y., Tuigunova A.G. Modeling turn insulation thermal aging process for traction substation transformer (2020) // Proceedings – 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM. Sochi, 2020. Ст. № 9112021. DOI:10.1109/ICIEAM48468.2020.9112021.
11. Пузина Е.Ю., Туйгунова А.Г., Худоногов И.А. Системы мониторинга силовых трансформаторов тяговых подстанций. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2020. 184 с.
12. Бурков А.Т., Мирсаитов М.М., Сероносков В.В. Анализ электропотребления при высокоскоростном движении электропоезда на заданном участке с различным количеством остановок // Вестн. Ростов. гос. ун-та путей сообщ. 2015. № 3 (59). С. 106–112.
13. Бурков А.Т., Мирсаитов М.М. Особенности методики определения электропотребления при выборе максимальной скорости пассажирских составов // Изв. Петерб. ун-та путей сообщ. 2015. № 1 (42). С. 5–12.
14. Leibfried Thomas. Online Monitors Transformers in Service // IEEE Computer Applications in Power. 1998. № 7. Р. 36–42.
15. Григорьев Н.П., Трофимович П.Н. Повышение эффективности работы системы тягового электроснабжения устройствами продольной компенсации // Изв. высш. учеб. заведений. Электромеханика. 2019. Т.62. № 3. С. 64–68.
16. Dang Y., Chen W. Design of Oil-Immersed Apparatus Oil Velocity Measure System Based on the Ultrasonic Wave Doppler Effect // IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe // IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC / I&CPS Europe). Palermo, 2018. P. 1–4.
17. Xiaozhou Zhu, Minwu Chen, ShaofengXie and Jie Luo Research on new traction power system using power flow controller and Vx connection transformer // 2016 IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT). Birmingham, 2016. P. 111–115.
18. Пат. 2427484 Рос. Федерация, МПК В60М 3/02, Система электроснабжения электрифицированных железных дорог переменного тока 25 кВ / Н.П. Григорьев, А.А. Крикун. № 2010119621/11 ; заявл. 17.05.2010 ; опубл. 27.08.2011, Бюл. №24. 10 с.
19. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Суслов К.В., Черепанов А.В. Оперативное определение запасов статической устойчивости в системах электроснабжения с установками распределенной генерации // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2021. Т. 25, № 1 (156). С. 31–43.
20. Бурков А.Т., Сероносков В.В., Степанская О.А. Маркетинг в электроэнергетике М. : УМЦ по образованию на ж.-д. трансп., 2014. 284 с.
21. Горбунова В.С., Пузина Е.Ю. Эффективность внедрения системы энергетического менеджмента в промышленных компаниях России // Транспортные системы и технологии. 2018. Т. 4. № 1. С. 119–137.
22. Коноплев Т.Ф. Методика оценки качества управления энергосбережением и повышением энергоэффективности предприятий газовой отрасли // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 5 (82). С. 161–172.

23. Сафаров Г.Г., Глинка Д.Ю. Управление энергетическими затратами промышленных предприятий как фактор повышения эффективности // Инновационные подходы развития экономики и управления в XXI веке : сб. тр. III Нац. науч.-практ. конф. СПб, 2020. С. 220–225.

References

1. Puzina E.Yu. Usilenie sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya uchastka Yakurim-Zvezdnaya VSZhD [Strengthening of the traction power supply system of the Yakurim-Zvezdnaya section of the VSZhD]. *Transport-2013: trudy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. [Transport-2013: proceedings of the international scientific and practical conference]*. Rostov-on-don: RSUPS Publ., 2013. Pp. 176–178.
2. 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 VSZhD]. *Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo: trudy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. [Transport: science, education, production: proceedings of the International scientific and practical conference]*. Rostov-on-don: RSUPS Publ., 2016. Pp. 306–310.
3. Cherepanov A., Kutsiy A. Modeling of traction power supply systems for heavy-tonnage trains operation. *International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2018*. Pp. 850-1734.
4. Puzina E.Yu. Otsenka potentsiala povysheniya energoeffektivnosti sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya Abakanskoi distantzii elektrosnabzheniya [Assessment of the potential for improving energy efficiency of the traction power supply system of the Abakan power supply distance]. *Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo: sbornik nauchnykh trudov Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. [Transport: science, education, production: collection of scientific papers of the International scientific and practical conference]*. Rostov-on-don: RSUPS Publ., 2017. Pp. 149–153.
5. Puzina E.Yu. Usilenie sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya uchastka Niya-Kirenga Vostochno-Sibirskoi zheleznoi dorogi [Strengthening the systems of the traction power supply of the section of Nia-Kirenga VSZHD]. *Elektrifikatsiya i razvitie infrastruktury energoobespecheniya tyagi poezdov na zheleznodorozhnom transporte: materialy VI Mezhdunarodnogo simpoziuma ELTRANS-2011 [Electrification and development of infrastructure for power supply of railway traction trains: Proceedings of the Sixth International Symposium ELTRANS-2011]*, 2013. Pp. 464–468.
6. Tuigunova A.G., Khudonogov I.A., Puzina E.Yu. O perevode pitaniya STsB s 27,5 kV na netyagovuyu obmotku na tyagovoi podstantsii peremennogo toka [On the transfer of the power supply of the SCB from 27.5 kV to a non-traction winding at an AC traction substation]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern technology. System analysis. Modeling]*, 2018. No. 4 (60). Pp. 93–98.
7. Burkov A.T., Seronov V.V., Kudryashov E.V., Stepankaya O.A. Fizicheskie osnovy proektirovaniya elektrotiyagovykh setei vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magistrali [Physical foundations of design of the electric traction networks of high-speed rail lines]. *Transport Rossiiskoi Federatsii. [Transport of the Russian Federation]*, 2015. No. 2 (57). Pp. 36–41.
8. Lebedeva O.A., Gozbenko V.E., Pykhalov A.A., Mukhopad Yu.F. Sravnitel'nyi analiz metodov resheniya transportnykh zadach pri optimal'nom planirovanii perevoznogo protsessa [Comparative analysis of methods for solving transport problems with optimal planning of the transportation process]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern technologies. System analysis. Modeling]*, 2020. No. 3 (67). Pp. 134–139.
9. Kryukov A.V., Kutsiy A.P., Cherepanov A.V. Uluchshenie kachestva elektroenergii v setyakh 110–220 kV, pitayushchikh tyagovye podstantsii [Improving the quality of electricity in 110–220 kV networks feeding traction substations]. *Elektroenergetika glazami molodezhi – 2017. Materialy VIII Mezhdunar. nauch.-tekhnich. konf. [Electric power industry through the eyes of youth-2017: Materials of the VIII International scientific and technical conference]*, 2017. Pp. 318–321.
10. Khudonogov I.A., Puzina E.Y., Tuigunova A.G. Modeling turn insulation thermal aging process for traction substation transformer. *Proceedings – 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2020*, art. No. 9112021.
11. Puzina E.Yu., Tuigunova A.G., Khudonogov I.A. Sistemy monitoringa silovykh transformatorov tyagovykh podstantsii [Monitoring systems for power transformers of traction substations]. Irkutsk, 2020. 184 p.
12. Burkov A.T., Mirsaitov M.M., Seronov V.V. Analiz elektropotrebleniya pri vysokoskorostnom dvizhenii elektropoezda na zadannom uchastke s razlichnym kolichestvom ostanovok [Power consumption analysis at high speed movement of electric trains on a given site with different number of stops]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya*, 2015. No. 3 (59). Pp. 106–112.
13. Burkov A.T., Mirsaitov M.M. Osobennosti metodiki opredeleniya elektropotrebleniya pri vybore maksimal'noi skorosti passazhirskikh sostavov [Features of the methodology for determining power consumption when choosing the maximum speed of passenger trains]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniya [Proceedings of Petersburg Transport University]*, 2015. No. 1 (42). Pp. 5–12.
14. Leibfried Thomas. Online Monitors Transformers in Service. *IEEE Computer Applications in Power*, July 1998. Pp. 36–42.
15. Grigor'ev N.P., Trofimovich P.N. Povyshenie effektivnosti raboty sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya ustroystvami prodol'noi kompensatsii [Improving the efficiency of the traction power supply system with longitudinal compensation devices]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika [News of higher educational institutions. Electromechanics]*, 2019. Vol. 62. No. 3. Pp. 64–68.
16. Dang Y., Chen W. Design of Oil-Immersed Apparatus Oil Velocity Measure System Based on the Ultrasonic Wave Doppler Effect, *2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, Palermo, 2018. Pp. 1–4.
17. Xiaozhou Zhu, Minwu Chen, Shaofeng Xie and Jie Luo Research on new traction power system using power flow controller and Vx connection transformer, *2016 IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT)*,

Birmingham, 2016. Pp. 111–115.

18. Grigoriev N.P., Krikun A.A. *Sistema elektrosnabzheniya elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog peremennogo toka 25 kV* [Power supply system of electrified Railways AC 25 kV]. Patent for invention RU 2427484 C1, 27.08.2011. Application no. 2010119621/11 dated May 17, 2010.

19. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Suslov K.V., Cherepanov A.V. *Operativnoe opredelenie zapasov staticheskoi ustoychivosti v sistemakh elektrosnabzheniya s ustanovkami raspredelennoi generatsii* [Operational determination of static stability reserves in power supply systems with distributed generation installations]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2021. Vol. 25 No. 1 (156). Pp. 31–43.

20. Burkov A.T., Seronov V.V., Stepanskaya O.A. *Marketing v elektroenergetike* [Power engineering marketing]. *Transportnye sredstva. Sistemy obespecheniya dvizheniya poezdov* [Vehicles. Train traffic support systems]. Moscow, 2014. 284 p.

21. Gorbunova V.S., Puzina E.Yu. *Effektivnost' vnedreniya sistemy energeticheskogo menedzhmenta v promyshlennyykh kompaniyakh Rossii* [Efficiency of energy management system implementation in industrial companies of Russia]. *Transportnye sistemy i tekhnologii* [Transportation systems and technology], 2018. Vol. 4. No. 1. Pp. 119–137.

22. Konoplev T.F. *Metodika otsenki kachestva upravleniya energosberezheniem i povysheniem energoeffektivnosti predpriyatii gazovoi otrasli* [The methodology of assessing the quality of energy saving management and energy efficiency improvement of gas industry enterprises]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [The bulletin of civil engineers], 2020. No. 5 (82). Pp. 161–172.

23. Safarov G.G., Glinka D.Yu. *Upravlenie energeticheskimi zatratami promyshlennyykh predpriyatii kak faktor povysheniya effektivnosti* [Management of energy costs of industrial enterprises as a factor in increasing efficiency]. *Innovatsionnye podkhody razvitiya ekonomiki i upravleniya v XXI veke. Sbornik trudov III Natsional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii. Federal'noe agentstvo zheleznodorozhnogo transporta* [Innovative approaches to economic development and management in the XXI century. Proceedings of the III National Scientific and Practical Conference. Federal Agency for Railway Transport]. St. Petersburg State Transport University of Emperor Alexander I, 2020. Pp. 220–225.

Информация об авторах

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

Худонотов Игорь Анатольевич – д-р техн. наук, профессор кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: hudonogovi@mail.ru

Information about the authors

Elena Yu. Puzina – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof. of the Subdepartment of Electric Power Industry of Transport, Irkutsk State Transport University; Assoc. Prof. at the Subdepartment of Power Supply and Electrical Engineering, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, e-mail: lena-rus05@mail.ru

Igor' A. Khudonogov – Doctor of Engineering Science, Professor of the Subdepartment of Electric Power Industry of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: Hudonogovi@mail.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2021.1(69).234-241

УДК 656.222.4

Процедура эффективной организации работы автоматизированной системы прогрева тягового электрооборудования электровоза

Н. П. Асташков, В. А. Оленцевич✉, Ю. И. Белоголов

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

✉ olencevich_va@mail.ru

Резюме

При разработке методики расчёта надёжности электрической машины одним из основных этапов является разработка математической модели, в которой возможен учет факторов, воздействие которых непосредственно отражается на техническом состоянии и уровне безопасности эксплуатации. В настоящее время в различных областях науки и техники существует достаточно большое количество методов прогнозирования показателей надёжности, отличающихся совокупностью решаемых задач и особенностями применяемого математического аппарата. Учет возмущающих воздействий при реализации технологического процесса возможен при условии использования средств автоматики. Выполненный авторами факторный анализ статистических данных по отказам тяговых электродвигателей позволил обосновать целесообразность организации процедуры прогрева. Наибольший процент технических отказов электрической части приходится на осенне – зимне – весенний периоды. Выявленная динамика распределения отказов в определенной степени обусловлена непосредственным увлажнением изоляции и снижением ее диэлектрической прочности, что вызвано резким перепадом внешних и внутренних температурных режимов при постановке локомотива в депо. Выявлено, что именно данный фактор способствует появлению конденсата на изоляции, ее дальнейшему разрушению. Параметры окружающей среды являются основным фактором, который оказывает влияние на эксплуатационную надёжность электрических машин, что подчеркивает актуальность представленной к рассмотрению статьи. Предложенное в статье техническое решение по прогреву тягового электрооборудования ориентировано на целочисленное уменьшение количества технических отказов электрической части рассматриваемых электродвигателей. С целью учета параметров окружающей среды в представленной математической модели использован многопозиционный ключ МК2, с помощью которого