



УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СТАЦИОНАРНЫХ ОБЪЕКТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Крюков^{1,2} А.В., Любченко² И.А.

¹ Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия

² Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Россия

Резюме: ЦЕЛЬ. Разработка методики моделирования режимов систем электроснабжения железных дорог, оснащенных устройствами для улучшения качества электроэнергии в сетях, питающих стационарные объекты железнодорожного транспорта. Рассматривались два конструктивных решения, обеспечивающих снижение несимметрии и отклонений напряжения на шинах 0,4 кВ подстанций, питающих эти объекты. Первое из них базировалось на применении отсасывающих трансформаторов, а второе – на использовании линий с заземленной фазой. Рассматривались два способа включения данных трансформаторов: в изолирующие стыки рельсов и в обратный провод. МЕТОДЫ. Исследования проведены с помощью программного комплекса Fazonord, обеспечивающего комплексное моделирование в фазных координатах режимов систем электроснабжения. Для определения влияния отсасывающих трансформаторов и линий с заземленной фазой на показатели качества электроэнергии рассмотрена межподстанционная зона тяговой сети двухпутного участка переменного тока 25 кВ протяженностью 45 км. РЕЗУЛЬТАТЫ. Полученные результаты позволили сделать следующие выводы: при использовании отсасывающих трансформаторов, которые включались в рассечку рельсов, среднее значение коэффициента несимметрии по обратной последовательности на шинах 0,4 кВ подстанции объекта уменьшалось на 2,5 % по сравнению с отсутствием таких устройств; при наличии трансформаторов, которые включались в обратный провод, данный показатель снижался на 19 %. Применение линий с заземленной фазой вместо линии «два провода – рельс» позволило улучшить качество электроэнергии на шинах 0,4 кВ, при этом максимум коэффициента несимметрии по обратной последовательности снижался на 40 %. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. На основе компьютерного моделирования показано, что применение отсасывающих трансформаторов с обратным проводом и линий 25 кВ с заземленной фазой позволяет улучшить качество электроэнергетики в системах электроснабжения стационарных объектов железнодорожного транспорта.

Ключевые слова: системы электроснабжения стационарных объектов железных дорог; отсасывающие трансформаторы; линии электропередачи с заземленной фазой и «два провода – рельс».

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке по гранту государственного задания Министерства науки и высшего образования России (проект № 0667-2020-0039).

Для цитирования: Крюков А.В., Любченко И.А. Улучшение качества электроэнергии в системах электроснабжения стационарных объектов железнодорожного транспорта // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 6. С. 53-65. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-6-53-65.

IMPROVING THE QUALITY OF ELECTRICITY IN THE POWER SUPPLY SYSTEMS OF STATIONARY OBJECTS OF RAILWAY TRANSPORT

AV. Kryukov^{1,2}, IA. Lyubchenko²

¹ Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

² Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

Abstract: THE PURPOSE. Development of a methodology for modeling the modes of power supply systems for railways equipped with devices to improve the quality of electricity in the networks supplying stationary objects of railway transport. Two design solutions were considered

that ensure the reduction of unbalance and voltage deviations on the 0,4 kV buses of substations supplying these objects. The first of them was based on the use of suction transformers, and the second - on the use of lines with a grounded phase. **METHODS.** The studies were carried out using the Fazonord software package, which provides complex modeling in phase coordinates of the modes of power supply systems. **RESULTS.** The results obtained made it possible to draw the following conclusions: when using suction transformers, which were included in the rail cut, the average value of the unbalance coefficient in negative sequence on the 0.4 kV buses of the object's substation decreased by 2,5% compared to the absence of such devices; in the presence of transformers, which were included in the return wire, this indicator decreased by 19%. The use of lines with a grounded phase instead of a two-wire-rail line made it possible to improve the quality of electricity on 0.4 kV buses, while the maximum of the unbalance coefficient in the negative sequence was reduced by 40%. **CONCLUSION.** On the basis of computer modeling, it is shown that the use of suction transformers with a return wire and 25 kV lines with a grounded phase makes it possible to improve the quality of the electric power industry in the power supply systems of stationary objects of railway transport.

Key words: power supply systems for stationary railway facilities, drop-off transformers, power lines with a grounded phase and «two wires-rail».

For citation: Kryukov AV, Lubchenco IA. Improving the quality of electricity supply systems in stationary objects of railway transport. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021;23(6):53-65. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-6-53-65.

Acknowledgments: This work was financially supported by a grant from the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of Russia (project No. 0667-2020-0039).

Введение и литературный обзор

Электроснабжение железных дорог осуществляется от сетей 110-220 кВ электроэнергетических систем через тяговые подстанции (ТП), от которых получают питание устройства электрической тяги и стационарные железнодорожные потребители. К ним относятся ремонтные заводы, локомотивные и вагонные депо, железнодорожные станции и т. д. [1, 2]. В данную группу также входят устройства сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ), которые предназначены для управления движением поездов и повышения пропускной и провозной способностей железнодорожных магистралей. Об актуальности задач повышения надежности электроснабжения объектов СЦБ, а также улучшения качества электроэнергии свидетельствуют результаты анализа статистики по сети дорог России. Из-за нарушений электроснабжения сигнальных точек СЦБ ежегодно происходит вынужденная задержка движения нескольких тысяч поездов [2]. Это свидетельствует об актуальности задач повышения надежности электроснабжения объектов СЦБ, а также улучшения качества электроэнергии.

Кроме того, от обмоток 6-10-35 кВ ТП могут получать питание промышленные, сельскохозяйственные и жилищно-коммунальные объекты, для потребителей которых вопросы обеспечения высокого качества электроэнергии также имеют первостепенное значение.

Исследованию систем электроснабжения (СЭС) стационарных объектов железнодорожного транспорта посвящено значительное количество работ, часть из которых представлена в библиографическом списке к данной статье. Общие вопросы, связанные с построением таких СЭС, рассмотрены в работах [1-4]. Решению задач повышения надежности сетей, питающих стационарные объекты транспорта, посвящены статьи [5-9]. Вопросы моделирования и управления режимами СЭС стационарных объектов рассмотрены в публикациях [10-17]. Задачи повышения энергоэффективности и качества электроэнергии в системах электроснабжения указанных объектов представлены в работах [18-22].

В условиях цифровизации транспортной электроэнергетики задачи улучшения качества электроэнергии в СЭС стационарных объектов должны решаться на основе компьютерного моделирования. Такое моделирование может быть реализовано на основе методов и средств, разработанных в ИрГУПС [16, 20]. Ниже представлена методика моделирования систем электроснабжения железных дорог, оснащенных устройствами для улучшения качества электроэнергии в электрических сетях стационарных объектов железнодорожного транспорта. Рассматривались два конструктивных решения, обеспечивающих снижение несимметрии и отклонений напряжения на шинах 0,4 кВ подстанций, питающих потребителей стационарных объектов. Первое из них базировалось на применении отсасывающих трансформаторов, а второе – на использовании линий с

заземленной фазой. Рассматривалось два способа включения указанных трансформаторов: в изолирующие стыки рельсов и в обратный провод.

Методы моделирования

Для определения режимов системы электроснабжения (СЭЖД) магистральной железной дороги необходимо сформировать модели отдельных элементов: линий электропередачи, контактных сетей, трансформаторов, устройств компенсации реактивной мощности и т. д. Кроме того, необходимо создание алгоритма взаимодействия этих моделей. Процесс формирования модели СЭЖД для расчета режимов включает следующие этапы [16]:

- обработка графика движения поездов, который связывает координату положения поезда со временем (рис. 1);
- формирование ряда мгновенных схем, каждая из которых отвечает положению отдельных поездов в пространстве для рассматриваемого момента времени; при этом учитываются величины тяговых и стационарных нагрузок;
- определение режима каждой мгновенной схемы;
- формирование сводных результатов моделирования в виде таблиц и графических зависимостей параметров от времени.

На основе данного подхода формируются информационные массивы, характеризующие динамику изменения режимов СЭЖД, вызванную движением поездов. Кроме того, возможен учет изменений стационарных нагрузок. На основе этой информации возможно определить уровни напряжений в узловых точках сети, коэффициенты, характеризующие величину несимметрии, показатели, отвечающие гармоническим искажениям, а также расходы активной и реактивной энергии по выбранным присоединениям и СЭЖД в целом.

Нагрузки, создаваемые движущимися поездами, находятся на основе тяговых расчетов или путем обработки экспериментальных данных.

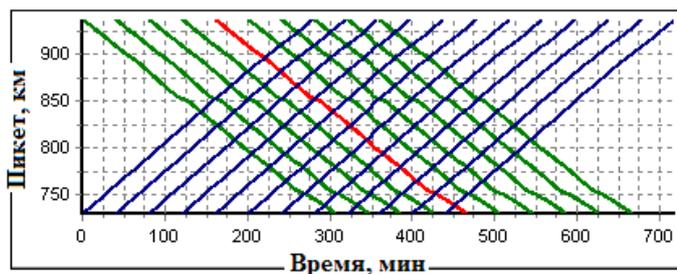


Рис. 1 График движения поездов

Fig. 1 Train schedule

Способы адекватного моделирования элементов СЭЖД, учитывающие электромагнитные взаимодействия, и основные принципы имитационного моделирования приведены в работе [16].

Алгоритм формирования мгновенной схемы базируется на данных тяговых расчетов и анализе графиков движения поездов. Он включает следующие этапы:

- для заданного момента времени определяется положение каждого поезда;
- рассчитываются активные и реактивные мощности нагрузки в узлах, соответствующих расположению поездов;
- переопределяются параметры, отвечающие протяженностям элементов контактной сети (КС);
- параметры моделей элементов КС пересчитываются;
- выполняется присоединение этих моделей к стационарной части расчетной схемы.

На основе такой методики, реализованной в программном комплексе Fazonord, возможно корректное решение следующих задач, актуальных при проектировании и эксплуатации систем электроснабжения:

- определение динамики изменений уровней напряжения на зажимах потребителей;
- расчет показателей, характеризующих несимметрию напряжений по обратной и нулевой последовательностям;
- анализ влияния размеров движения поездов на показатели качества электрической энергии по отклонениям и несимметрии;
- расчет показателей, характеризующих гармонические искажения токов и напряжений, которые возникают из-за влияния нелинейных тяговых нагрузок, создаваемых выпрямительными электровозами;
- анализ энергоэффективности процессов передачи и распределения электроэнергии путем расчета ее потерь в отдельных элементах системы электроснабжения и СЭС в целом;

- определение динамики изменения температур нагревов проводов ЛЭП и тяговых сетей;
- расчет нагревов и теплового износа изоляции силовых трансформаторов;
- анализ эффективности применения установок продольной и поперечной компенсации реактивной мощности;
- расчеты токов и напряжений для любых видов коротких замыканий, в неполнофазных режимах, а также при сложных повреждениях в электрической сети, характеризующихся возникновением продольных и поперечных несимметрий;
- определение наведенных напряжений на отключенных линиях электропередачи и связи, а также на протяженных металлических конструкциях;
- расчет электромагнитных полей на трассах линий электропередачи и в распределительных устройствах подстанций.

Программный комплекс *Fazonord* позволяет моделировать активные элементы электроэнергетических систем, построенных с использованием технологий *smart grid* [23]. К числу таких элементов можно отнести:

- установки распределенной генерации;
- устройства *FACTS*;
- многофазные линии электропередачи;
- газоизолированные и криогенные ЛЭП;
- фазоповоротные устройства;
- токоограничители;
- управляемые устройства для устранения несимметрии;
- активные кондиционеры высших гармоник;
- кабельные линии подземной прокладки с изоляцией из молекулярно сшитого полиэтилена.

Результаты моделирования. Отсасывающие трансформаторы.

Для снижения напряжений магнитных влияний на смежные линии в тяговых сетях 25 кВ используются отсасывающие трансформаторы (ОТ). Они повышают электромагнитные связи между контактной сетью (КС) и рельсами. Это приводит к тому, что тяговые токи начинают протекать по рельсам или специальному обратному проводу вместо возврата через землю. Расстояние между КС и цепью обратного тока уменьшается, что вызывает снижение магнитного поля КС и наведенных напряжений на смежные линии. Включение ОТ может осуществляться по двум вариантам: в первом – вторичная обмотка ОТ присоединяется к рельсовой сети (рис. 2 а); во втором – к специальному обратному проводу (рис. 2 б).

Отсасывающие трансформаторы характеризуются коэффициентом трансформации, равным единице. Сопротивления нагрузки вторичной обмотки зависит от варианта подключения:

- для схемы, представленной на рис. 2 а, оно оставляет доли Ома;
- для схемы, показанной на рис. 2 б, этот параметр лежит в диапазоне от 1...3 Ом.

Поэтому, также как у трансформаторов тока, режим работы ОТ близок к короткому замыканию. В обеих схемах, приведенных на рис. 2, токи, протекающие по обмоткам ОТ являются противофазными, а напряжения обмоток сравнительно небольшие.

Чтобы обратный провод использовался наиболее эффективно, он должен располагаться как можно ближе к контактной подвеске. Эффективность систем электроснабжения с ОТ зависит и от количества трансформаторов, установленных в межподстанционной зоне (МПЗ). Для типовой МПЗ протяженностью 40...50 км расстояние между ОТ, включенными в рассечку рельсов, принимается равным 3 км, а для ОТ, по схеме рис. 2 б – 4,5 км.

Эффективность применения ОТ для снижения наведенных напряжений проанализировано в работе [24]. Однако влияние ОТ на качество электроэнергии на шинах подстанций стационарных объектов ЖД в указанной работе не рассматривалось. Результаты компьютерных исследований, направленных на решение этой задачи, приведены ниже. В качестве объекта исследований взята типовая межподстанционная зона двухпутного участка железной дороги протяженностью 45 км. Рассматривалась контактная подвеска 25 кВ с контактным проводом (КП) типа МФ 100 и несущим тросом (НТ) марки ПБСМ 95, рельсы Р-65 и линия «два провода–рельс» (ДПР), выполненная проводами А-70.

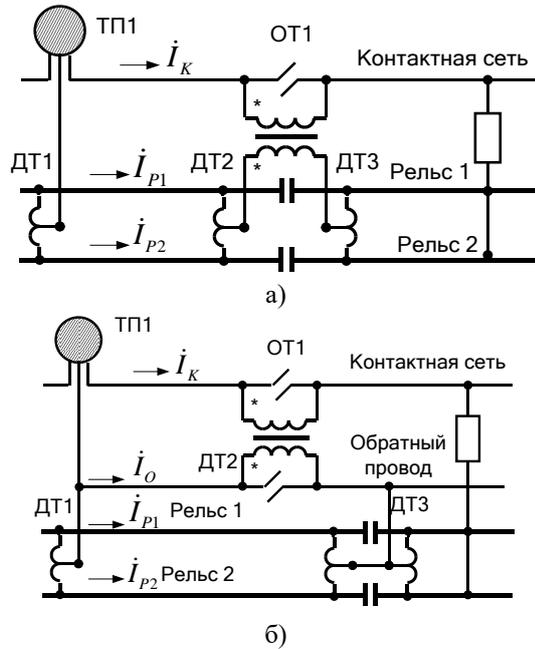


Рис. 2 Схемы включения ОТ: а – включение ОТ в изолирующие стыки рельсов; б – ОТ с обратным проводом; ДТ1...ДТ3 – дроссель-трансформаторы

Fig. 2 Connection diagrams for sucking transformers (ST): a - inclusion of ST in the insulating joints of the rails; b - ST with a return wire; DT1 ... DT3 - choke-transformers

Моделирование осуществлялось в программном комплексе Fazonord. Рассматривалось движение пяти нечетных поездов массой 6300 т (рис. 3, 4) с токовым профилем, показанным на рисунке 5.

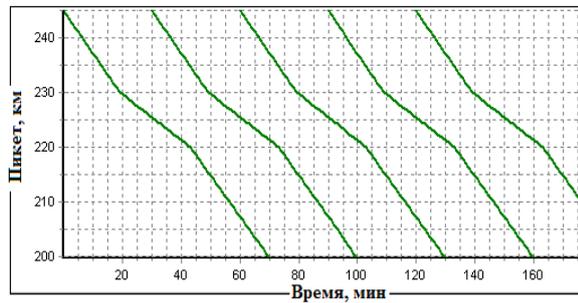


Рис. 3 Полный график движения поездов

Fig. 3 Complete train schedule

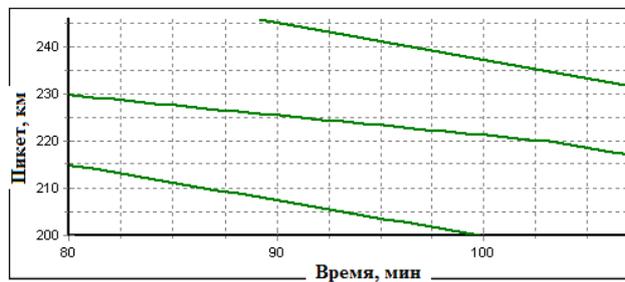


Рис. 4 График движения поездов в рассматриваемом интервале 80...110 мин

Fig. 4 Train schedule in the considered interval 80 ... 110 min

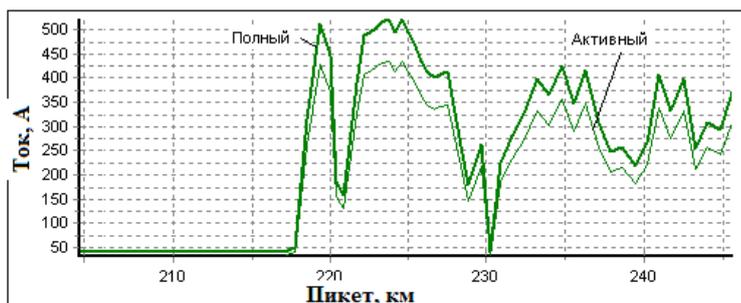


Рис. 5 Токвый профиль поезда массой 6300 т

Fig. 5 Current profile of a train weighing 6300 t

Моделирование работы СЭЖД проведено в трех вариантах:

- 1) тяговая сеть (ТС) 25 кВ без отсасывающих трансформаторов;
- 2) ТС включала ОТ с обратным проводом, расположенные через 4,5 км;
- 3) ТС имела ОТ, которые подключались в изолирующее сопряжение рельсов через 3 км.

На рисунке 6 показаны координаты расположения токоведущих частей в поперечном сечении тяговой сети. На рисунках 7 –9 приведены расчетные схемы, отвечающие указанным выше вариантам моделирования, результаты которого представлены в таблицах 1 и 2 и на рисунках 10 и 11.

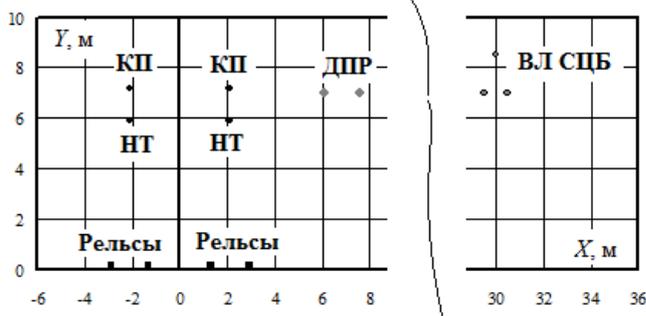


Рис. 6 Координаты токоведущих частей

Fig. 6 Coordinates of live parts

Таблица 1

Коэффициенты несимметрии напряжений k_{2U} , %, на шинах 0,4 кВ

Параметр	Схема ТС			Различие, %	
	Нет ОТ	ОТ, включенные в рассечку рельсов	ОТ с обратным проводом	Между столбцами 2 и 3	Между столбцами 2 и 4
1	2	3	4	5	6
Минимум	2,03	1,92	1,89	5,4	6,9
Среднее	5,55	5,42	4,49	2,5	19,2
Максимум	9,11	9,15	7,55	-0,4	17,1
Среднеквадратическое отклонение (СКО)	2,11	2,14	1,60	-1,1	24,1
Размах	7,08	7,23	5,66	-2,1	20,1

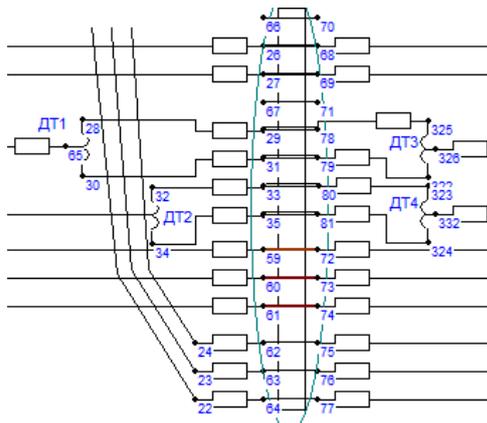


Рис. 7 Фрагмент расчетной схемы без отсасывающих трансформаторов *Fig. 7 A fragment of the design scheme without suction transformers*

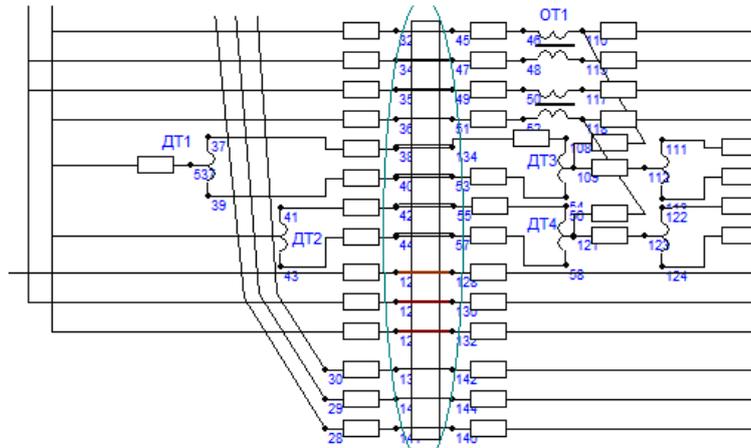


Рис. 8 Фрагмент расчетной схемы с отсасывающими трансформаторами и обратным проводом *Fig. 8 Fragment of the design diagram with sucking transformers and a return wire*

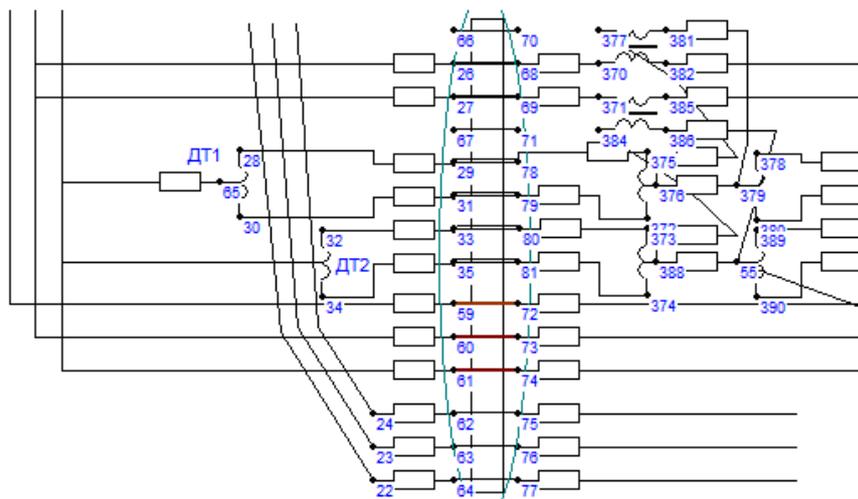


Рис. 9 Фрагмент расчетной схемы с ОТ, включенными в рассечку рельсов *Fig. 9 Fragment of the design model with ST included in the rail cut*

Таблица 2

Коэффициенты несимметрии напряжений k_{0U} , %, на шинах 0,4 кВ

Параметр	Схема ТС			Различие, %	
	Нет ОТ	ОТ с обратным проводом	ОТ, включенные в рассечку рельсов	Между столбцами 2 и 3	Между столбцами 2 и 4
1	2	3	4	5	6
Минимум	0,09	0,04	0,04	50,2	50,1
Среднее	0,21	0,16	0,20	25,4	7,3
Максимум	0,38	0,28	0,38	26,6	-0,1
СКО	0,09	0,06	0,09	29,9	-4,7
Размах	0,29	0,23	0,33	19,3	-15,6

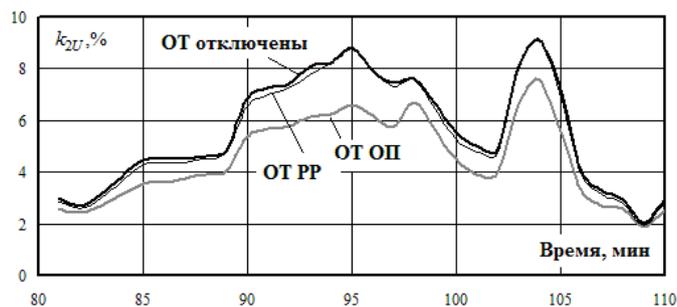


Рис. 10 Зависимость коэффициента несимметрии k_{2U} от времени

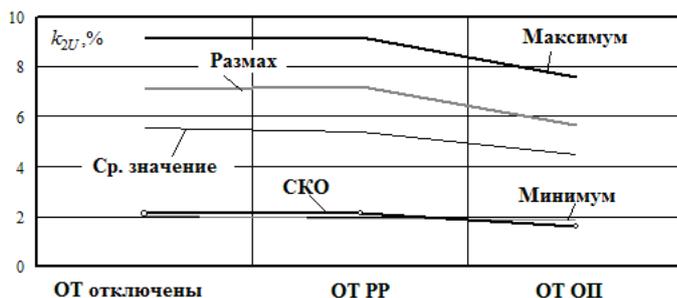


Рис. 11 Сводные показатели по коэффициенту несимметрии k_{2U} , %

Результаты моделирования позволяют сделать следующие выводы:

- по сравнению с отсутствием ОТ, оснащение тяговой сети отсасывающими трансформаторами, включенными в рассечку рельсов, приводит к тому, что среднее значение коэффициента несимметрии по обратной последовательности k_{2U} на вторичной обмотке трансформатора ДПР уменьшается незначительно, всего на 2,5 %; а максимальное значение практически не изменяется (табл. 1);

- гораздо больший эффект наблюдается в ТС, оснащенной ОТ, которые включаются в обратный провод; при этом среднее значение коэффициента k_{2U} понижается на

19 %, а максимум – на 17 %; кроме того, имеет место заметное уменьшение показателей, характеризующих динамику изменений параметра k_{2U} , СКО уменьшается на 24 %, а размах колебаний – на 20 %; однако уровень несимметрии на шинах 0,4 кВ подстанции потребителя превышает допустимые пределы, что требует применения дополнительных средств для ее уменьшения, например, управляемых источников реактивной мощности [20];

- коэффициенты несимметрии по нулевой последовательности при симметричной нагрузке трансформатора ДПР не превышают 1 %; использование ОТ с обратным проводом приводит к снижению среднего значения этого показателя на 25 %, а максимума – на 27 %.

Линии с заземленной фазой

В условиях электромагнитного влияния контактной сети линии ДПР имеют существенные недостатки. За счет магнитного влияния КС в проводах этой линии возникает продольная ЭДС, искажающая симметрию треугольника напряжений. Величина этой ЭДС определяется токами, протекающими по проводам контактной сети.

На практике часто не обеспечиваются необходимые уровни напряжения на подключенных к шинам 0,4 кВ подстанций ДПР устройствах железнодорожной автоматики

и связи, что приводит к их отказам. Кроме того, дополнительные нагрузки рельсов, которые выступают в качестве третьего провода ДПР, негативно влияют на работу рельсовых цепей. Также, при определенных условиях, проанализированных в работе [16], работа линий ДПР в режиме холостого хода может вызывать мощные резонансные явления.

Новая конструкция линии ДПР – линия с заземленной фазой (ЛЗФ-25 кВ, рис. 12) предложена в работе [25]. Она обеспечивает уменьшение электромагнитных влияний КС, что подтверждается опытной эксплуатацией участка такой линии на Северо-Кавказской железной дороге. Однако вопросы количественной оценки влияния ЛЗФ на качество электроэнергии на шинах 0,4 кВ, питающих стационарные объекты рассмотрены не в полном объеме.

Для определения эффективности линий ЛЗФ по критерию качества электроэнергии выполнено моделирование режимов на модели, полученной путем модификации схемы, представленной на рис. 7. Результаты моделирования показаны в табл. 3 и на рис. 13 – 16.

Таблица 3

Сравнение ДПР и ЛЗФ по качеству электроэнергии

Параметр	$k_{2U}, \%$			$k_{0U}, \%$		
	ЛЗФ	ДПР	Различие, %	ЛЗФ	ДПР	Различие, %
Минимум	1,90	2,03	-6,8	0,1	0,1	-0,2
Среднее	4,23	5,55	-31,5	0,2	0,2	-40
Максимум	6,52	9,11	-39,7	0,2	0,4	-65
СКО	1,39	2,11	-52,0	0,1	0,1	-66
Размах	4,62	7,08	-53,3	0,1	0,3	-104

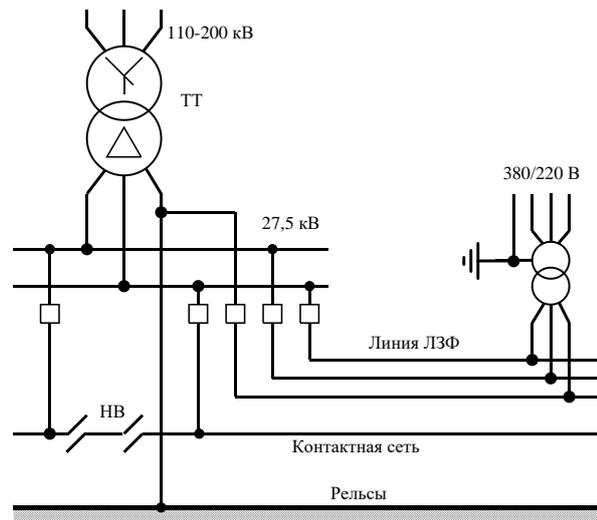


Рис. 12 Схема ЛЗФ

Fig. 11 Line diagram with grounded phase

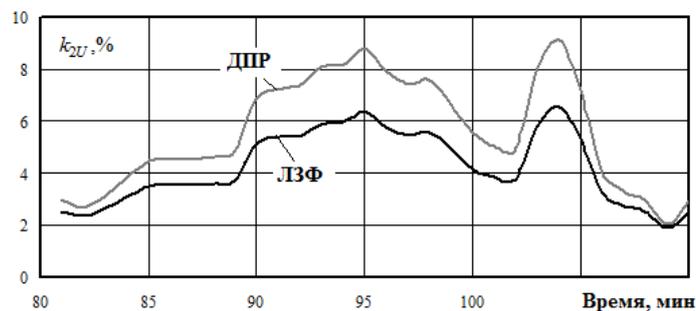


Рис. 13 Зависимости коэффициентов несимметрии k_{2U} от времени

Fig. 13 Dependences of asymmetry coefficients k_{2U} on time

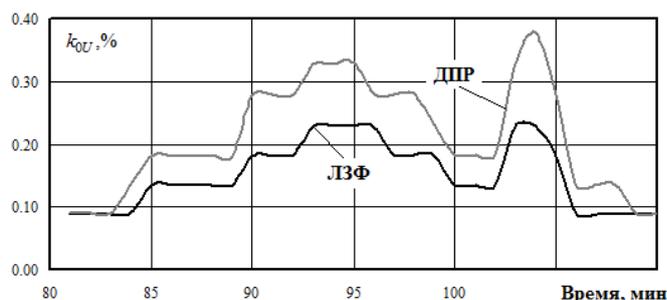


Рис. 14 Зависимости коэффициентов несимметрии k_{0U} от времени *Fig. 14 Dependences of the asymmetry coefficients k_{0U} on time*

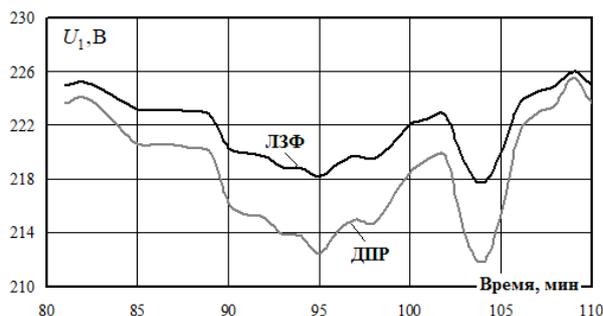


Рис. 15 Зависимости напряжений прямой последовательности от времени *Fig. 15 Dependences of positive sequence voltages on time*

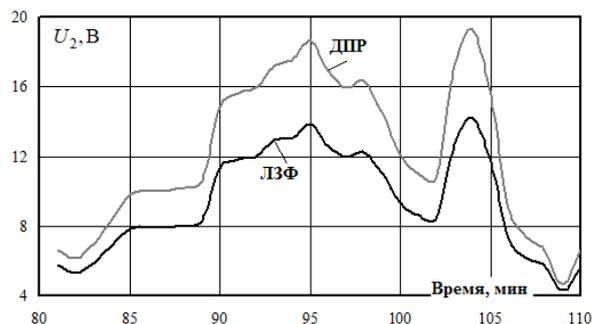


Рис. 16 Зависимости напряжений прямой последовательности от времени *Fig. 16 Dependences of positive sequence voltages on time*

Полученные результаты показывают, что применение линий ЛЗФ вместо ДПР позволяет улучшить качество электроэнергии на шинах 0,4 кВ подстанций СЦБ, при этом максимум коэффициента несимметрии по обратной последовательности снижается на 40 %. Аналогичный показатель по параметру k_{0U} уменьшается на 65 %.

Заключение

Разработана методика компьютерного моделирования, позволяющая определять эффективность применения отсасывающих трансформаторов и линий 25 кВ с заземленной фазой для улучшения качества электроэнергии в системах электроснабжения стационарных объектов железнодорожного транспорта.

Результаты моделирования показали, что применение отсасывающих трансформаторов в тяговой сети приводит к снижению несимметрии напряжений 0,4 кВ подстанций стационарных объектов. Использование отсасывающих трансформаторов, включенных в рассечку рельсов, обеспечивает уменьшение среднего значения коэффициента несимметрии по обратной последовательности k_{2U} на вторичной обмотке трансформатора ДПР примерно на 2,5 %. При наличии отсасывающих трансформаторов с обратным проводом коэффициент несимметрии по обратной последовательности снижается почти на 20 %.

Применение линий с заземленной фазой вместо ДПР позволяет улучшить качество электроэнергии на шинах 0,4 кВ подстанций СЦБ, при этом максимум коэффициента

несимметрии по обратной последовательности снижается на 40 %. Аналогичный показатель по параметру k_{0U} уменьшается на 65 %.

Разработанная методика моделирования может применяться для решения практических задач проектирования и эксплуатации систем электроснабжения стационарных объектов железнодорожного транспорта, в частности, для выбора рациональных мероприятий по улучшению качества электроэнергии. В условиях цифровизации транспортной электроэнергетики ее можно использовать при формировании программных модулей определения электрических режимов СЭС при разработке киберфизических систем электроснабжения нетяговых потребителей, основанных на использовании концепции цифровых двойников [26-28].

Литература

1. Крюков А. В., Закарюкин В. П. Электроснабжение и электропитание нетяговых потребителей железнодорожного транспорта. Москва. Берлин: Директ-Медиа, 2020. 293 с.
2. Аржанников Б.А., Сергеев Б.С., Набойченко И.О. Системы электроснабжения устройств СЦБ. Екатеринбург: УрГУПС, 2009. 101 с.
3. Steimel A. Electric traction motive power and energy supply. Basics and practical experience. Munchen: Oldenbourg Industrieverlag, 2008. 334 p.
4. Бондаренко К.А., Авдеева К.В. Энергоснабжение нетяговых железнодорожных потребителей. Омск, 2019. 36 с.
5. Каштанов А.Л., Ананьева Н.Г. Электрические распределительные сети железнодорожных узлов. Проблемы и пути их решения // Известия Транссиба. 2018. № 1 (33). С. 79-87.
6. Шеломенцев А.О., Косяков А.А. Совершенствование организации проектирования систем электроснабжения нетяговых потребителей железнодорожного транспорта и распределительных сетей общего пользования // Инновационный транспорт. № 5 (6). 2012. С. 15-19.
7. Мухарямов Р.И., Добрынин Е.В., Окладов С.А. Автоматизация контроля текущего состояния системы электроснабжения нетяговых потребителей железнодорожного транспорта // Наука и образование транспорту. № 1. 2015. С. 136-138.
8. Лабунский Л.С. Совершенствование технологии обслуживания устройств электроснабжения нетяговых потребителей железных дорог // Вестник Самарской государственной академии путей сообщения. № 3. 2005. С. 30-35.
9. Валияхметова В.К., Николаев В.Л., Власова В.А. Повышение надежности электроснабжения нетяговых потребителей железных дорог // Современные инновации в науке, образовании и технике. 2018. С. 27-29.
10. Tretyakov E. Advanced methods of transportation and distribution of electrical power in smart power grids of railways // MATEC Web of Conferences. V. 239, 01010.2018. 11. Cheremisin V., Tretyakov E. Implementation of the method of adaptive management of electric power transmission in distribution electric networks of railways // MATEC Web of Conferences. V. 239,01011. 2018.
12. Tretyakov E., Cheremisin V. and Golovnev G. Modeling of Multi-agent Voltage Control in Distribution Electric Networks of Railways // International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing.2018. V. 982. Springer, Cham.
13. Tretyakov E., Golovnev, G. Voltage control in distribution electric rail networks using reactive power sources based on agent-based approach // Proceedings - 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 2019.
14. Tretyakov E.A. Coordinated control of active and reactive capacity generation in electrical power distribution networks of railways // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. V. 643, 2019.
15. Tretyakov, E.A. Testing the software and hardware complex for managing the power supply system of stationary consumers of railways // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing.2020. V. 976(1).
16. Закарюкин В.П., Крюков. А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Изд-во Иркутского университета, 2005. 273 с.
17. Черемисин В.Т., Комяков А.А. Моделирование процессов электропотребления в системе нетягового электроснабжения железнодорожного транспорта. Омск, 2017. 161 с.
18. Авилов В.Д., Третьяков Е.А., Краузе А.В. Повышение качества электроэнергии в распределительных сетях нетяговых потребителей // Известия Транссиба. 2013. № 1 (13). С. 48-54.
19. Авилов В.Д., Третьяков Е.А., Краузе А. В. Управление качеством электроэнергии в распределительных сетях железнодорожного транспорта // Омский научный вестник.

2013. № 1 (117). С. 183-187.

20. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Любченко И.А. Улучшение качества электроэнергии в системах электроснабжения нетяговых потребителей железных дорог / М.; Берлин : Директ-Медиа, 2020. 183 с.

21. Карабанов М.А. Снижение влияния системы тягового электроснабжения на электропитание нетяговых потребителей в моменты подключения преобразовательных агрегатов // Известия Транссиба. № 3 (7). 2011. С. 58-67.

22. Куликова Е.А., Бебрис А.Н. Инновационное оборудование для повышения энергоэффективности систем электроснабжения нетяговых потребителей // Современные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации. Нефтекамск, 2017. С. 18-23.

23. Bernd M. Buchholz, Zbigniew A. Styczynski Smart Grids – Fundamentals and Technologies in Electricity Networks. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014. 396 p.

24. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Нгуен Ты. Моделирование систем тягового электроснабжения, оснащенных устройствами для уменьшения электромагнитных влияний на смежные линии электропередачи // Транспорт: наука, техника, управление. № 9. 2016. С. 12-18.

25. Бочев А.С., Финоченко Т.Э. Модернизация линий продольного электроснабжения два провода – рельсы // Вестник РГУПС. № 4. 2006. С. 87-90.

26. Воропай Н.И., Колосок И.Н., Коркина Е.С. Проблемы уязвимости и живучести киберфизических электроэнергетических систем // Энергетическая политика. № 5. 2018. С. 53-61.

27. Воропай Н.И., Массель Л.В., Колосок И.Н. ИТ - инфраструктура для построения интеллектуальных систем управления развитием и функционированием систем энергетики на основе цифровых двойников и цифровых образов // Известия РАН. Энергетика. № 1. 2021. С. 3-13.

28. Булатов Ю.Н., Крюков А.В. Алгоритмы построения цифрового двойника установки распределенной генерации // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2020. № 13(6). С. 677-689.

Авторы публикации

Крюков Андрей Васильевич – д-р техн. наук, профессор кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутского государственного университета путей сообщения; профессор кафедры электроснабжения и электротехники, Иркутский национальный исследовательский технический университет.

Любченко Ирина Алексеевна – аспирант кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения.

References

1. Kryukov AV, Zakaryukin VP. *Elektrosnabzhenie i `elektropitanie netyagovykh potrebitelej zheleznodorozhnogo transporta*. Moskva. Berlin: Direkt-Media, 2020. 293 P.

2. Arzhannikov BA, Sergeev BS, Nabojchenko IO. *Sistemy `elektrosnabzheniya ustrojstv SCB*. Ekaterinburg 2009. 101 P.

3. Steimel A. *Electric traction motive power and energy supply*. Basics and practical experience. Munchen: Oldenbourg Industrieverlag, 2008. 334 P.

4. Bondarenko KA, Avdeeva KV. *Energосnabzhenie netyagovykh zheleznodorozhnykh potrebitelej*. Omsk, 2019. 36 P.

5. Kashtanov AL, Anan'eva NG. `Elektricheskie raspredelitel'nye seti zheleznodorozhnykh uzlov. Problemy i puti ih resheniya. *Izvestiya Transsiba*. 2018; 1 (33): 79-87.

6. Shelomencev AO, Kosyakov AA. Sovershenstvovanie organizacii proektirovaniya sistem `elektrosnabzheniya netyagovykh potrebitelej zheleznodorozhnogo transporta i raspredelitel'nykh setej obshchego pol'zovaniya. *Innovacionnyj transport*. 2012; 5 (6): 15-19.

7. Muharyamov RI, Dobrynin EV, Okladov SA. Avtomatizatsiya kontrolya tekushego sostoyaniya sistemy `elektrosnabzheniya netyagovykh potrebitelej zheleznodorozhnogo transporta. *Nauka i obrazovanie transportu*. 2015; 1: 136-138.

8. Labunskij LS. Sovershenstvovanie tehnologii obsluzhivaniya ustrojstv `elektrosnabzheniya netyagovykh potrebitelej zheleznykh dorog. *Vestnik Samarskoj gosudarstvennoj akademii putej soobscheniya*. 2005; 3: 30-35.

9. Valiyahmetova VK, Nikolaev VL, Vlasova VA. Povyshenie nadezhnosti `elektrosnabzheniya netyagovykh potrebitelej zheleznykh dorog. *Sovremennye innovacii v nauke, obrazovanii i tehnikе*. 2018: 27-29.

10. Tretyakov E. Advanced methods of transportation and distribution of electrical power

in smart power grids of railways. *MATEC Web of Conferences*, V. 239, 01010.2018. doi:10.1051/mateconf/201823901010.

11. Cheremisin V, Tretyakov E. Implementation of the method of adaptive management of electric power transmission in distribution electric networks of railways. *MATEC Web of Conferences*. V. 239.01011. 2018. doi:10.1051/mateconf/201823901011.

12. Tretyakov E, Cheremisin V. and Golovnev G. Modeling of Multi-agent Voltage Control in Distribution Electric Networks of Railways. *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2018. V. 982. Springer, Cham.

13. Tretyakov E, Golovnev G. Voltage control in distribution electric rail networks using reactive power sources based on agent-based approach. *Proceedings - 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*, 2019.

14. Tretyakov EA. Coordinated control of active and reactive capacity generation in electrical power distribution networks of railways. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. V. 643.

15. Tretyakov EA. Testing the software and hardware complex for managing the power supply system of stationary consumers of railways. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing. 2020. V. 976(1).

16. Zakaryukin VP, Kryukov AV. *Slozhnonessesimmetrichnye rezhimy `elektricheskikh sistem*. Irkutsk, 2005.273 P.

17. Cheremisin VT, Komyakov AA. *Modelirovanie processov `elektropotrebleniya v sisteme netyagovogo `elektrosnabzheniya zhelezнодорожного транспорта*. Omsk, 2017.161 P.

18. Avilov VD, Tretyakov EA, Krauze AV. Povyshenie kachestva `elektro`energii v raspredelitel'nykh setyakh netyagovykh potrebitel'ey. *Izvestiya Transsiba*. 2013; 1 (13): 48-54.

19. Avilov VD, Tretyakov EA, Krauze AV. Upravlenie kachestvom `elektro`energii v raspredelitel'nykh setyakh zhelezнодорожного транспорта. *Omskij nauchnyy vestnik*. 2013; 1(117): 183-187.

20. Zakaryukin VP, Kryukov AV, Lyubchenko IA. *Uluchshenie kachestva `elektro`energii v sistemah `elektrosnabzheniya netyagovykh potrebitel'ey zheleznykh dorog*. M.; Berlin: Direkt-Media, 2020.183 P.

21. Karabanov MA. Snizhenie vliyaniya sistemy tyagovogo `elektrosnabzheniya na `elektropitanie netyagovykh potrebitel'ey v momenty podklyucheniya preobrazovatel'nykh agregatov. *Izvestiya Transsiba*. 2011; 3 (7): 58-67.

22. Kulikova EA, Bebris AN. Innovacionnoe oborudovanie dlya povysheniya `energo`effektivnosti sistem `elektrosnabzheniya netyagovykh potrebitel'ey. *Sovremennye nauchnye issledovaniya: aktual'nye voprosy, dostizheniya i innovacii*. Neftekamsk, 2017. pp.18-23.

23. Bernd M. Buchholz, Zbigniew A. Styczynski Smart Grids – Fundamentals and Technologies in Electricity Networks. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014.396 P.

24. Zakaryukin VP, Kryukov AV, Nguen Ty. Modelirovanie sistem tyagovogo `elektrosnabzheniya, osnashchennykh ustrojstvami dlya umen'sheniya `elektromagnitnykh vliyaniy na smezhnye linii `elektroperedachi. *Transport: nauka, tehnika, upravlenie*. 2016; 9: 12-18.

25. Bochev AS, Finochenko TE. Modernizaciya linij prodol'nogo `elektrosnabzheniya dva provoda - rel'sy. *Vestnik RGUPS*. 2006; 4: 87-90.

26. Voropaj NI, Kolosok IN, Korkina ES. Problemy uyazvimosti i zhivuchesti kiberfizicheskikh `elektro`energeticheskikh system. *Energeticheskaya politika*. 2018; 5: 53-61.

27. Voropaj NI, Massel' LV, Kolosok IN. IT – infrastruktura dlya postroeniya intellektual'nykh sistem upravleniya razvitiem i funkcionirovaniem sistem `energetiki na osnove cifrovyykh dvoynikov i cifrovyykh obrazov. *Izvestiya RAN. `Energetika*. 2021; 1:3-13.

28. Bulatov YuN, Kryukov AV. Algoritmy postroeniya cifrovogo dvoynika ustanovki raspredelennoj generacii. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2020;13(6): 677-689.

Authors of the publication

Andrey V. Kryukov – Irkutsk National Research Technical University, Russia.

Irina A. Lyubchenko – Irkutsk State Transport University, Russia.

Получено

17.09.2021 г.

Отредактировано

29.09.2021 г.

Принято

12.10.2021 г.