Столыпинский
вестник

Научная статья
Original article
УДК 62

УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СТАЦИОНАРНЫХ ОБЪЕКТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

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

Юй Ихань, магистр**,** Российский университет транспорта (МИИТ), г.Москва

Yu Han, Master's Degree, Russian University of Transport (MIIT), Moscow

Аннотация: ЦЕЛЬ. Разработка методики моделирования режимов систем электроснабжения железных дорог, оснащенных устройствами для улучшения качества электроэнергии в сетях, питающих стационарные объекты железнодорожного транспорта. Рассматривалось 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. Рассматривалось 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.

Abstract: THE GOAL. Development of a methodology for modeling modes of railway power supply systems equipped with devices to improve the quality of electricity in networks feeding stationary railway transport facilities. Two design solutions were considered to reduce the asymmetry and voltage deviations on the 0.4 kV busbars of substations feeding these facilities. The first of them was based on the use of suction transformers, and the second – on the use of lines with a grounded phase. Two ways of including these transformers were considered: in the insulating joints of the rails and in the return wire. METHODS. The research was carried out using the Fazonord software package, which provides complex modeling in phase coordinates of modes of power supply systems. To determine the influence of suction transformers and lines with a grounded phase on the quality of electricity, the inter-substation zone of the traction network of a 25 kV AC double-track section

with a length of 45 km is considered. results. The results obtained allowed us to draw the following conclusions: when using suction transformers that were included in the rail section, the average value of the asymmetry coefficient in the reverse sequence on the 0.4 kV tires of the substation of the object decreased by 2.5% compared with the absence of such devices; in the presence of transformers that were included in the return wire, this indicator decreased by 19%. The use of lines with a grounded phase instead of the "two wires – rail" line made it possible to improve the quality of electricity on 0.4 kV tires, while the maximum of the asymmetry coefficient in the reverse sequence decreased by 40%. CONCLUSION. Based on computer modeling, it is shown that the use of suction transformers with a return wire and 25 kV lines with a grounded phase allows improving the quality of electric power in power supply systems of stationary railway transport facilities.

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

Keywords: power supply systems for stationary railway facilities; suction transformers; power transmission lines with grounded phase and "two wires –rail".

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.

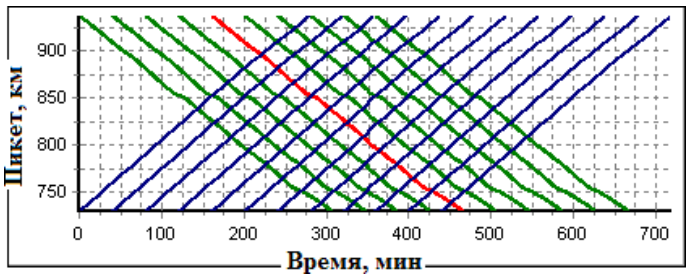


Рис. 1 График движения поездов

Способы адекватного моделирования элементов СЭЖД, учитывающие электромагнитные взаимовлияния, 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;

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;

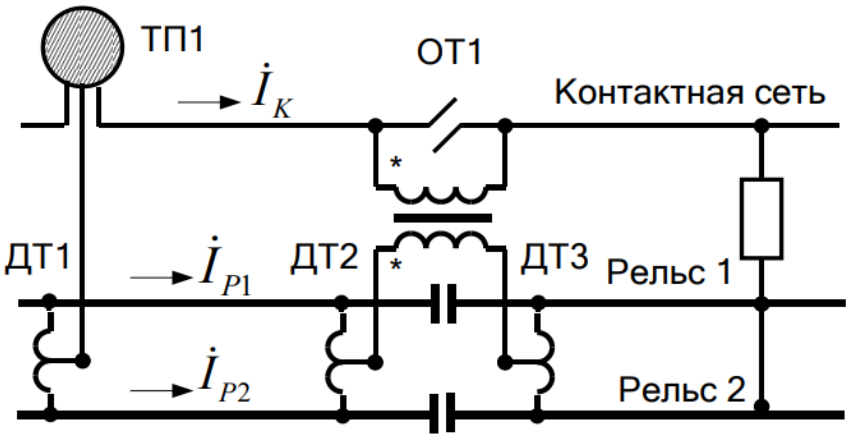
– для схемы, показанной на рис. 2 б, этот параметр лежит в диапазоне о 1…3 Ом.

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.



а)

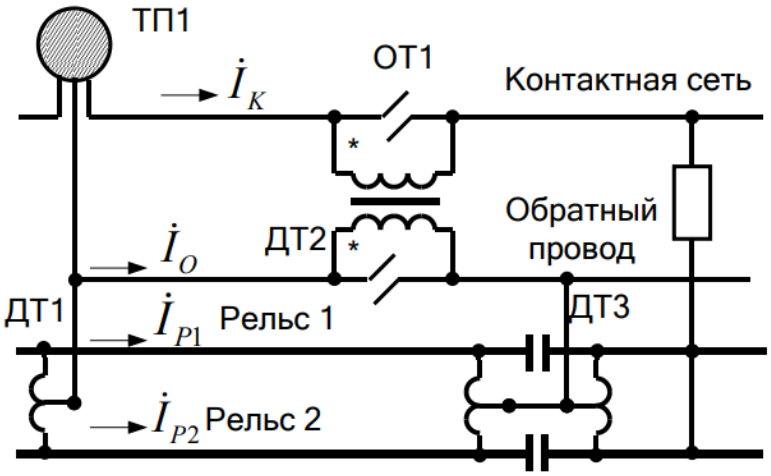


Рис. 2 Схемы включения ОТ: а – включение ОТ в изолирующие стыки рельсов; б – ОТ с обратным проводом;
ДТ1…ДТ3 – дроссель-трансформаторы

Моделирование осуществлялось в программном комплексе Fazonord. Рассматривалось движение пяти нечетных поездов массой 6300 т.

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.

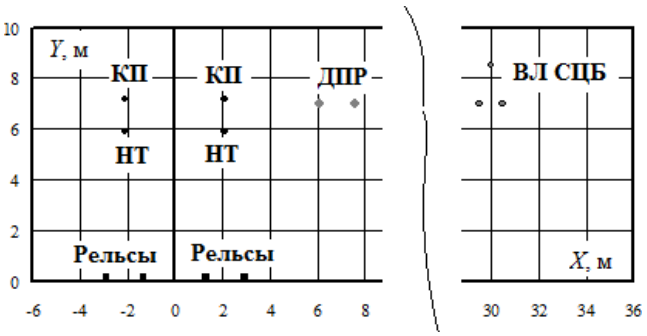


Рис. 3 Координаты токоведущих частей

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	2,11	2,14	1,60	–1,1	24,1

отклонение (СКО)					
Размах	7,08	7,23	5,66	–2,1	20,1

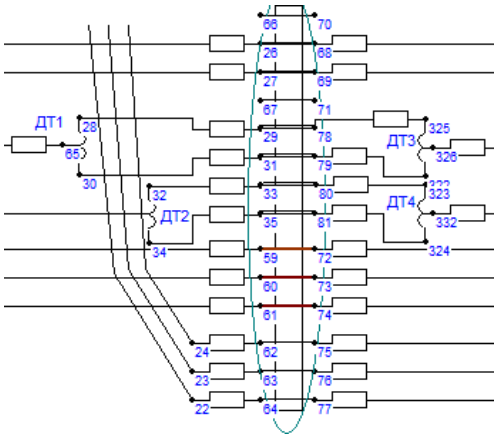


Рис. 4 Фрагмент расчетной схемы без отсасывающих трансформаторов

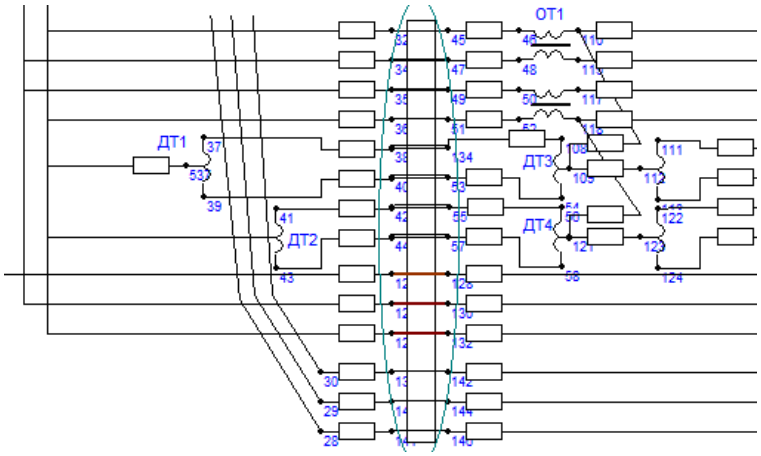


Рис. 5 Фрагмент расчетной схемы с отсасывающими трансформаторами и обратным проводом

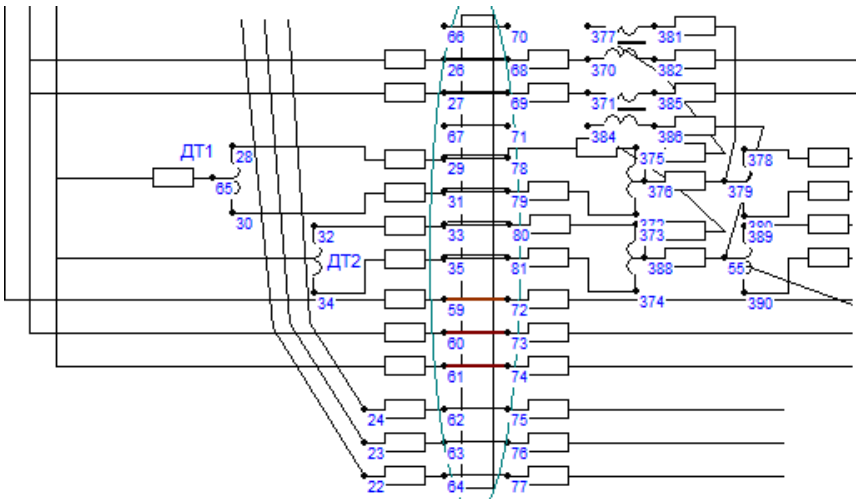


Рис. 6 Фрагмент расчетной схемы с ОТ, включенными в рассечку рельсов

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

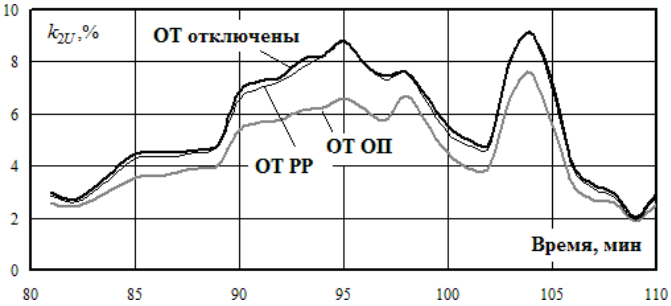


Рис. 7 Зависимость коэффициента несимметрии k_{2U} от времени

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

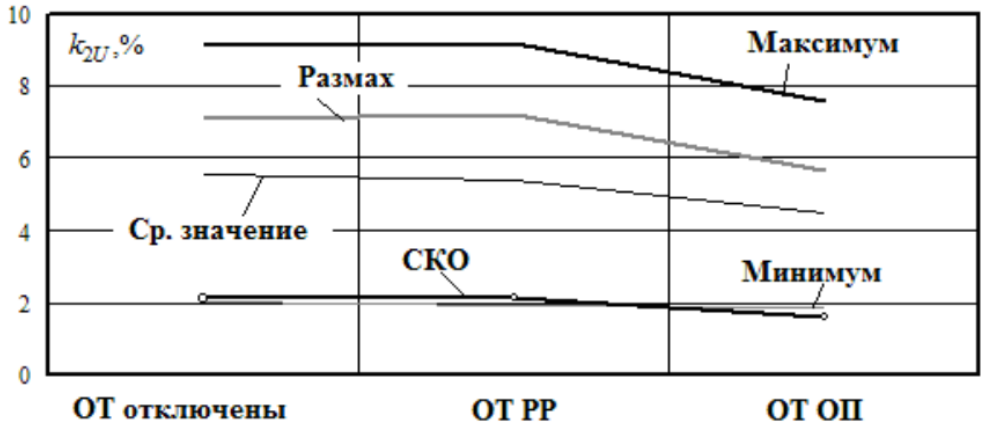


Рис. 8 Сводные показатели по коэффициенту несимметрии k2U, %

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.

Literature:

1. Kryukov A.V., Zakaryukin V. P. Power supply and power supply of non-traction consumers of railway transport. Moscow. Berlin: Direct-Media, 2020. 293 p.
2. Arzhannikov B.A., Sergeev B.S., Naboychenko I.O. Power supply systems of SCB devices. Yekaterinburg: UrGUPS, 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 K.A., Avdeeva K.V. Power supply of non-traction railway consumers. Omsk, 2019. 36 p.
5. Kashtanov A.L., Ananyeva N.G. Electric distribution networks of railway junctions. Problems and ways to solve them // News of the Transsib. 2018.
1. No. 1 (33). pp. 79-87.
6. Shelomentsev A.O., Kosyakov A.A. Improving the organization of the design of power supply systems for non-traction consumers of railway transport and public distribution networks // Innovative transport. No. 5 (6). 2012. pp. 15-19.
7. Mukharyamov R.I., Dobrynin E.V., Okladov S.A. Automation of control of the current state of the power supply system for non-traction consumers of railway transport // Science and Education for transport. No. 1. 2015. pp. 136-138.
8. Labunsky L.S. Improvement of the technology of maintenance of power supply devices for non-traction consumers of railways // Bulletin of the Samara State Academy of Railways. No. 3. 2005. pp. 30-35.
9. Valiyakhmetova V.K., Nikolaev V.L., Vlasova V.A. Improving the reliability of power supply to non-traction consumers of railways // Modern innovations in science, education and technology. 2018. pp. 27-29.

© Юй Ихань, Научный сетевой журнал «Столыпинский вестник», номер 6/2022.

Для цитирования: Юй Ихань УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СТАЦИОНАРНЫХ ОБЪЕКТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА // Научный сетевой журнал «Столыпинский вестник», номер 6/2022.