

МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 621.311, 621.331

DOI:10.18324/2077-5415-2022-2-29-36

Снижение несимметрии в электрических сетях 0,4 кВ, питающихся от тяговых подстанций

Ю.Н. Булатов^{1a}, А.В. Крюков^{2, 3b}, А.В. Черепанов^{2c}, И.А. Любченко^{2d}¹ Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия² Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского, 15, Иркутск, Россия³ Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, Иркутск, Россия^a bulatovyura@yandex.ru, ^b and_kryukov@mail.ru, ^c smart_grid@mail.ru, ^d lubchenco.i@yandex.ru^a <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>, ^b <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>^c <https://orcid.org/0000-0002-7712-9537>, ^d <https://orcid.org/0000-0002-2086-3212>

Статья поступила 24.02.2022, принята 31.03.2022

В регионах Сибири и Дальнего Востока от районных обмоток тяговых трансформаторов железных дорог осуществляется электроснабжение большого числа стационарных объектов. К ним относятся населенные пункты, промышленные предприятия и здания социально-культурного назначения. Вследствие влияния однофазной тяговой нагрузки в таких системах электроснабжения (СЭС) имеет место значительная несимметрия по обратной последовательности. Кроме того, из-за неравномерного распределения нагрузок по фазам может наблюдаться несимметрия по нулевой последовательности, часто превышающая допустимые нормы. Для снижения несимметрии по обратной последовательности могут применяться симметрирующие трансформаторы, управляемые источники реактивной мощности и другие устройства, например, выполненные по схеме Штейнмеца. Эффективное средство для уменьшения несимметрии по нулевой последовательности может быть реализовано на базе симметризатора (балансера) с зигзагообразной схемой соединений обмоток. Предварительный анализ показывает, что данный подход может быть применен в сетях, питающихся от тяговых подстанций. В современных условиях, характеризующихся масштабным использованием цифровых технологий, решения о практическом применении таких балансеров должны приниматься на основе детального компьютерного моделирования и адекватных цифровых моделей, учитывающих все влияющие факторы. Проведенный анализ литературы позволяет сделать вывод о том, что задачи моделирования СЭС, оснащенных трансформаторами с зигзагообразным соединением обмоток, при питании от тяговых подстанций остаются до настоящего времени нерешенными. Для их решения могут быть применены методы и программный продукт Fazonord, разработанные в Иркутском государственном университете путей сообщения. В статье представлены результаты исследований, направленных на разработку компьютерных моделей СЭС, оснащенных симметризаторами с зигзагообразной схемой соединений обмоток. Результаты моделирования показали, что при включении такого симметрирующего устройства максимум коэффициента несимметрии по обратной последовательности уменьшается на 5 %, а по нулевой — снижается в 16 раз. Аналогичные показатели для средних значений составляют 6 % и 16 раз. Рассмотренный балансера обладает высокой энергоэффективностью. При его включении потери активной мощности в главном трансформаторе 10/0,4 кВ снижаются в среднем на 11 %. Потребляемая из сети активная мощность увеличивается при включении симметризатора в среднем на 2 кВт, что составляет примерно 2 % от мощности симметрируемой нагрузки.

Ключевые слова: системы электроснабжения нетранспортных потребителей; несимметрия по обратной и нулевой последовательностям; симметризатор с зигзагообразной схемой соединений обмоток.

Reducing asymmetry in 0.4 kV electrical networks powered by traction substations

Yu.N. Bulatov^{1a}, A.V. Kryukov^{2, 3b}, A.V. Cherepanov^{2c}, I.A. Lyubchenko^{2d}¹ Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia² Irkutsk State Transport University; 15, Chernyshevsky St., Irkutsk, Russia³ Irkutsk National Research Technical University; 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia^a bulatovyura@yandex.ru, ^b and_kryukov@mail.ru, ^c smart_grid@mail.ru, ^d lubchenco.i@yandex.ru^a <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>, ^b <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>^c <https://orcid.org/0000-0002-7712-9537>, ^d <https://orcid.org/0000-0002-2086-3212>

Received 24.02.2022, accepted 31.03.2022

In the regions of Siberia and the Far East, a large number of stationary objects are supplied with electricity from the regional windings of railway traction transformers. These include settlements, industrial enterprises and buildings for social and cultural purposes.

Due to the influence of a single-phase traction load in such power supply systems (PSS), there is a significant asymmetry in the reverse sequence. In addition, due to the uneven distribution of loads over the phases, asymmetry in the zero sequence can be observed, often exceeding the permissible norms. Balancing transformers, controlled reactive power sources and other devices, for example, made according to the Steinmetz scheme, can be used to reduce unbalance in the reverse sequence. An effective tool for reducing zero sequence asymmetry can be implemented on the basis of a symmetrizer (a balancer) with a zigzag winding connection scheme. Preliminary analysis shows that this approach can be applied in networks powered by traction substations. In modern conditions, characterized by the large-scale use of digital technologies, decisions on the practical application of such balancers should be made on the basis of detailed computer modeling and adequate digital models that take into account all influencing factors. The analysis of the literature makes it possible to conclude that the problems of modeling solar PSS with transformers with a zigzag connection of windings when powered by traction substations remain unresolved to date. To solve them, the methods and software product Fazonord, developed at the Irkutsk State Transport University, can be applied. The article presents the results of research aimed at developing computer models of PSS with symmetrizers with a zigzag winding connection scheme. The simulation results showed that when such a balancing device is turned on, the maximum of the asymmetry coefficient in the reverse sequence decreases by 5%, and in the zero sequence it decreases by 16 times. Similar indicators for average values are 6% and 16 times. The considered balancer has high energy efficiency. When it is turned on, active power losses in the main transformer 10/0.4 kV are reduced by an average of 11%. The active power consumed from the network increases when the symmetrizer is turned on by an average of 2 kW, which is approximately two percent of the power of the balanced load.

Keywords: power supply systems for non-transport consumers; asymmetry in reverse and zero sequences; a symmetrizer with a zigzag winding connection scheme.

Введение. Системы электроснабжения (СЭС) магистральных железных дорог России обеспечивают электроэнергией не только тягу поездов, но и большое число нетяговых и нетранспортных потребителей. К последним относятся населенные пункты, промышленные предприятия и объекты социально-культурного назначения. Вследствие влияния однофазной тяговой нагрузки в таких СЭС имеет место значительная несимметрия по обратной последовательности. Кроме того, из-за неравномерного распределения нагрузок по фазам может наблюдаться несимметрия по нулевой последовательности, часто превышающая допустимые нормы.

Для снижения несимметрии по обратной последовательности могут применяться симметрирующие трансформаторы, управляемые источники реактивной мощности и другие устройства, описанные в работе [1]. В работах [2; 3] показано, что эффективное средство для уменьшения несимметрии по нулевой последовательности может быть реализовано на базе симметризатора (балансера) с зигзагообразной схемой соединений обмоток (рис. 1).

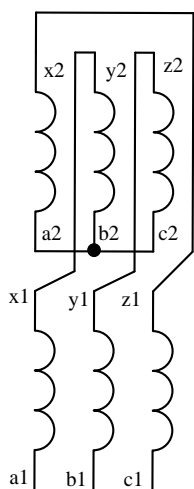


Рис. 1. Схема симметрирующего устройства

Предварительный анализ показал, что данный подход может быть применен в сетях, питающихся от тяговых подстанций. Однако в современных условиях,

характеризующихся масштабным использованием цифровых технологий [4; 5], решения о практическом применении балансеров со схемой соединения «зигзаг» должны приниматься на основе детального компьютерного моделирования и адекватных цифровых моделей, учитывающих все влияющие факторы. Использованию трансформаторов со схемами соединения обмоток в зигзаг посвящено большое число работ. Так, например, в статье [6] рассмотрены вопросы применения таких трансформаторов в электрических сетях агропромышленного комплекса. В работе [7] показана эффективность использования таких устройств для питания потребителей с нелинейными вольтамперными характеристиками. В статье [8] представлены результаты исследований несимметричных режимов трехфазных трехстержневых трансформаторов со схемой соединения обмоток в зигзаг. Компьютерные модели таких трансформаторов описаны в работе [9]. Результаты математического моделирования работы системы автоматического управления устройством регулирования напряжения под нагрузкой силового трансформатора со схемой соединения обмоток «треугольник/зигзаг с нулем» приведены в статье [10]. В работе [11] показана эффективность использования устройств с зигзагообразной схемой соединений обмоток для снижения потерь от несимметрии токов в сельских электрических сетях 0,4 кВ. Методика расчета само- и взаимных индуктивностей в трехфазном трансформаторе со схемой соединения обмоток «звезда – зигзаг» представлена в статье [12]. Особенности трансформаторов с вторичной обмоткой, соединенной в зигзаг, описаны в работе [13]. Результаты решения задачи определения эффективности использования зигзагообразных обмоток для согласования и симметрирования электрических нагрузок приведены в статье [14]. Возможности применения таких трансформаторов для подавления гармоник, кратных трем, рассмотрены в работах [15; 16]. Эффективность использования данных устройств для снижения тока в нейтрали проанализирована в статье [17]. Вопросы применения трансформаторов со схемой Y/Z для уменьшения провалов и скачков напряжения рассмотрены в работе [18]. Комплекс вопросов, связанных с подавлением гармоник в нейтральном проводе, рас-

смотрен в статье [19]. Результаты экспериментальных исследований однофазного режима трехфазного асинхронного двигателя, подключенного через зигзагообразный трансформатор, приведены в работе [20]. Вопросы мониторинга состояния зигзагообразных трансформаторов рассмотрены в статье [21].

Анализ представленных публикаций позволяет сделать вывод о том, что задачи моделирования СЭС, оснащенных трансформаторами с зигзагообразным соединением обмоток при питании от тяговых подстанций, остаются до настоящего времени нерешенными. Для их решения могут быть применены методы и программный продукт *Fazonord*, разработанные в ИргУПС [22].

Результаты моделирования. Методы моделирования несимметричных режимов СЭС, разработанные в ИргУПС и основанные на использовании фазных координат, подробно описаны в работах [22; 23]. Компью-

терные исследования проводились для схемы СЭС, показанной на рис. 2. В ее состав входили следующие элементы: подстанция питающей электроэнергетической системы; линия электропередачи 220 кВ протяженностью 10 км, выполненная проводами АС-300; тяговый трансформатор ТДТНЖ-40000/220/27,5; участок контактной сети (КС) длиной 20 км, включающий подвески двух путей, рельсовые нити и линию 10 кВ с проводами АС-70, смонтированную на опорах КС; трансформатор потребительской подстанции ТМ-1000/10/0,4 и симметрирующее устройство (СУ) с соединением обмоток в зигзаг [2; 3]. При создании модели СУ использовались следующие параметры: ток холостого хода 2,3 %; потери в меди 3,7 кВт, в стали — 0,74 кВт; напряжение короткого замыкания 5 %. Фрагмент внешнего вида расчетной модели показан на рис. 3.

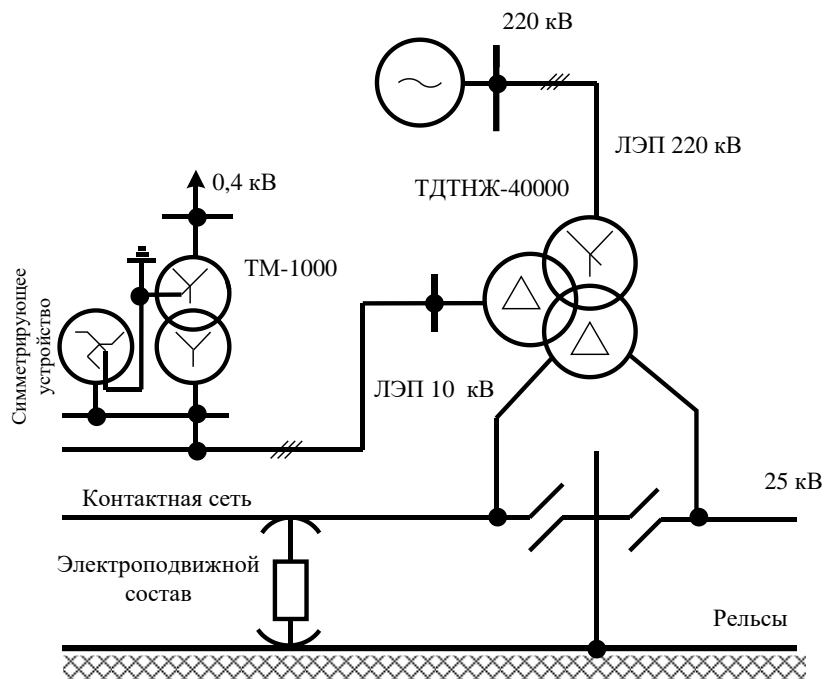


Рис. 2. Схема исследуемой СЭС (для упрощения показана контактная сеть одного пути)

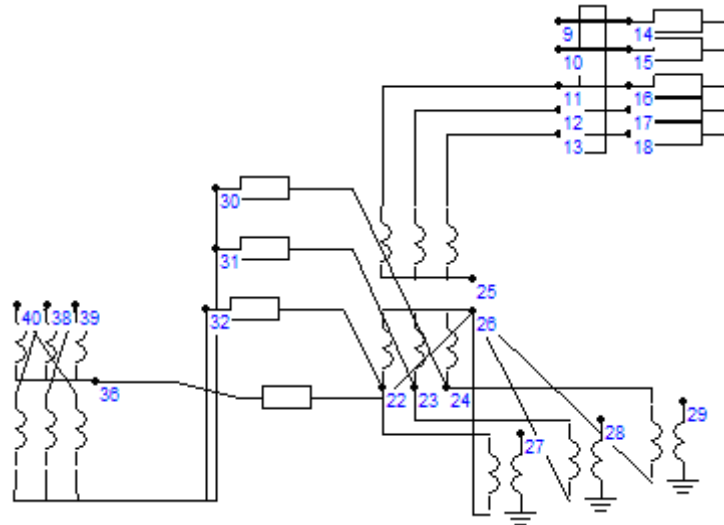


Рис. 3. Фрагмент схемы расчетной модели, реализованной в программном комплексе *Fazonord*

Моделирование проводилось на основе программного комплекса *Fazonord* [23] для двух вариантов. В первом рассматривался отдельный режим СЭС, определяемый следующими нагрузками: на концах консолей тяговой сети (ТС) $1000 + j1000$ кВ·А по каждой контактной подвеске; однофазная нагрузка $200 + j100$ кВ·А на выводах 0,4 кВ трансформатора ТМ-1000. Результаты моделирования представлены на рис. 4–6. Для обеспечения больших нагрузок трансформатора длины ЛЭП 220 и 10 кВ были сокращены до 1 км.

На рис. 5 приведены векторные диаграммы напряжений на шинах 0,4 кВ потребительской подстанции при включенном и отключенном симметрирующем устройстве. Из них видно, что при отключении СУ уровни напряжений далеко выходят за допустимые пределы: одно из фазных напряжений снижается до 170 В, а другое повышается до 330 В. При включении СУ уровни напряжений не выходят из диапазона 230...240 В.

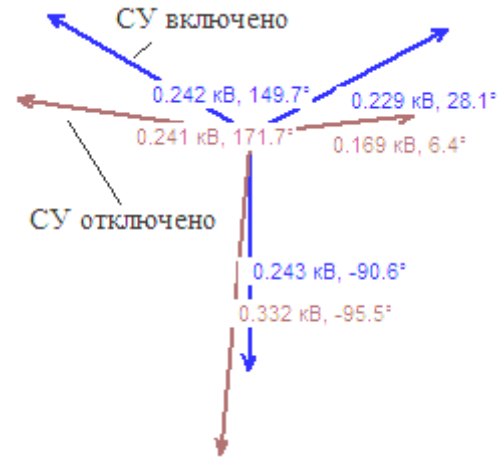


Рис. 5. Векторные диаграммы напряжений при включенном и отключенном симметрирующем устройстве

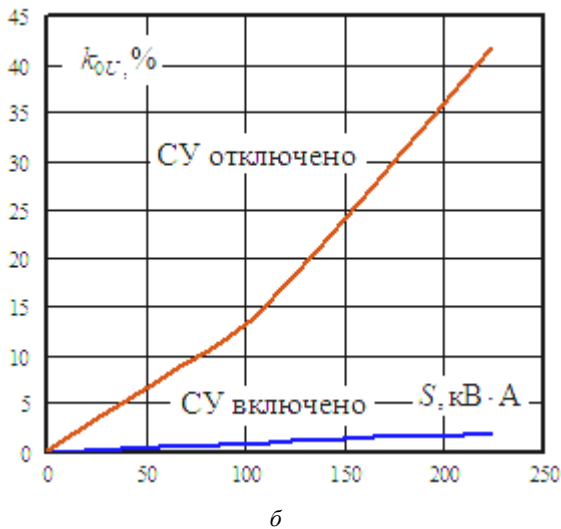
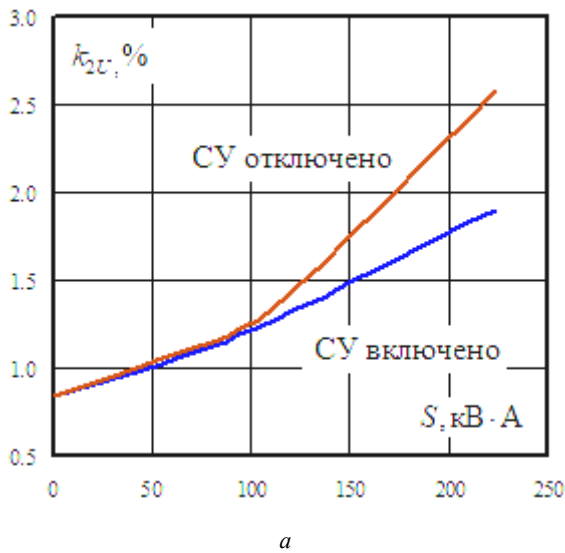


Рис. 4. Зависимости коэффициентов несимметрии по обратной (а) и нулевой (б) последовательностям от величины однофазной нагрузки

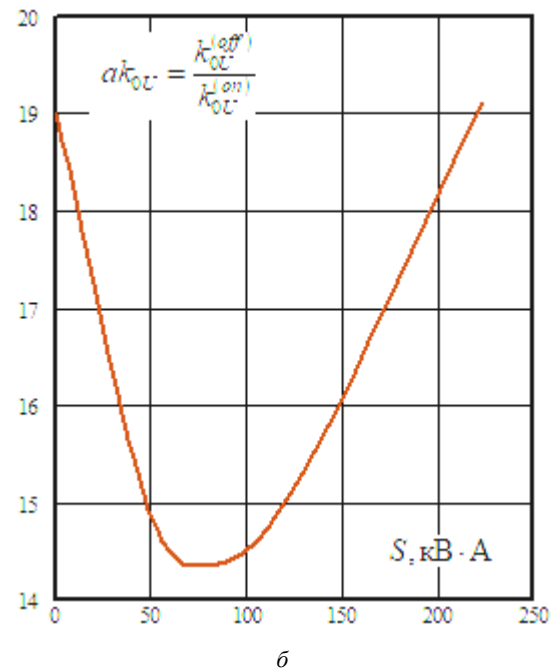
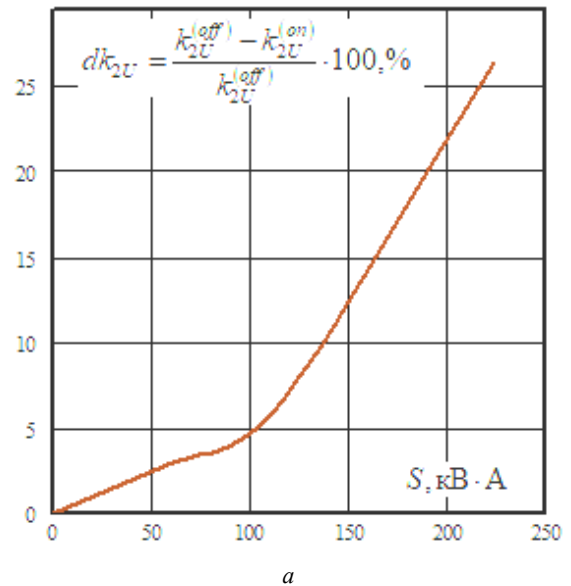


Рис. 6. Различия (а) и отношение (б) величин k_{2U} и k_{0U} при включенном и отключенном симметрирующем устройстве

На рис. 4 приведены графики изменения коэффициентов несимметрии при вариации величины однофазной нагрузки от 0 до 223 кВ·А. Из рассмотрения этих рисунков видно, что при наличии симметрирующего устройства уровни несимметрии по обратной и нулевой последовательностям заметно снижаются. Величины уменьшения несимметрии иллюстрируются на рис. 6. Максимальное снижение коэффициента k_{2U} достигает 25 %, а коэффициент k_{2U} уменьшается в 19 раз.

На втором этапе проведено моделирование серии режимов при движении шести поездов (рис. 7).

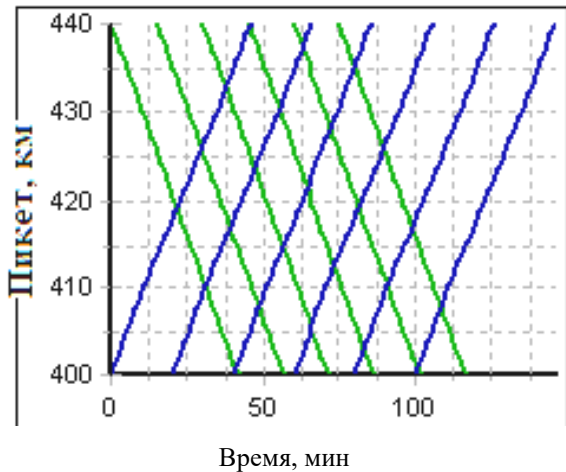


Рис. 7. График движения с интервалом 30 мин

Мощность однофазной нагрузки на шинах 0,4 кВ принималась равной $100 + j50$ кВ·А. Зависимости потребляемых составом токов от пикета показаны на рис. 8. Расположение токоведущих частей ТС представлено на рис. 9. Результаты моделирования проиллюстрированы на рис. 10–15 и в таблице.

На рис. 10 приведена динамика изменения показателей, характеризующих уровни несимметрии по обратной и нулевой последовательностям на шинах 0,4 кВ подстанции потребителя. Из этого рисунка и таблицы видно, что при включении симметрирующего устройства максимум коэффициента несимметрии по обратной последовательности уменьшается на 5 %, а по нулевой — снижается в 16 раз. Аналогичные показатели для средних значений составляют 6 % и 16 раз. Таким образом, наибольшая эффективность данного типа симметрирующего устройства наблюдается по коэффициенту k_{0U} .

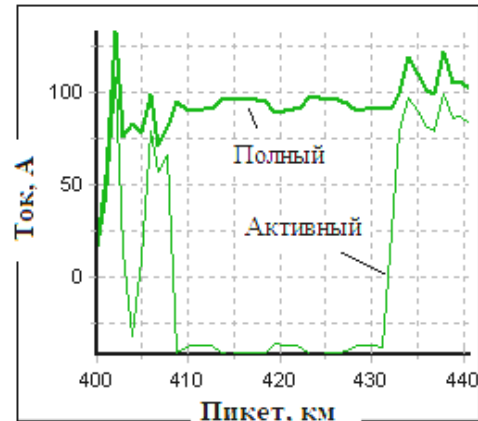
Динамика изменений во времени величин dk_{2U}, ak_{0U} показана на рис. 11. Эти показатели рассчитывались по формулам:

$$dk_{2U} = \frac{k_{2U}^{(off)} - k_{2U}^{(on)}}{k_{2U}^{(off)}} \cdot 100;$$

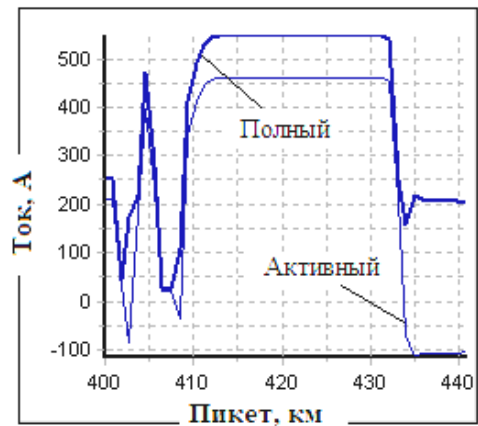
$$ak_{0U} = \frac{k_{0U}^{(off)}}{k_{0U}^{(on)}},$$

где $k_{2U}^{(off)}, k_{0U}^{(off)}$ — коэффициенты, рассчитанные для режимов при отключенном симметрирующем устрой-

стве; $k_{2U}^{(on)}, k_{0U}^{(on)}$ — коэффициенты, полученные для режимов при включенном симметрирующем устройстве.



а



б

Рис. 8. Зависимости потребляемых составом токов от пикета: а — нечетный состав массой 1 600 т; б — четный состав массой 7 100 т

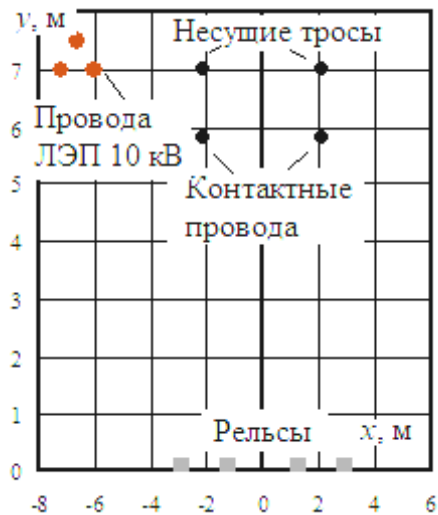


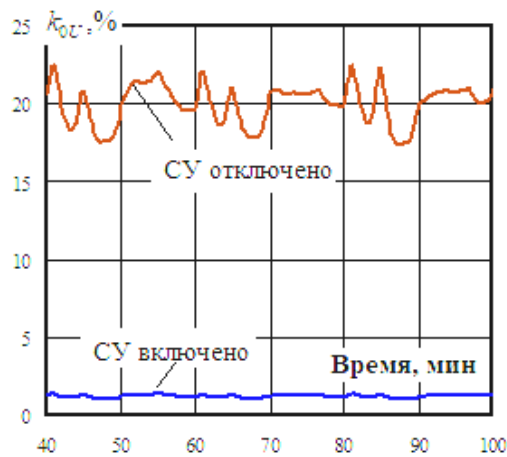
Рис. 9. Расположение токоведущих частей

Таблица. Сводные данные по несимметрии

Показатель	$k_{2U}, \%$			$k_{0U}, \%$		
	СУ включено	СУ отключено	Различие, %	СУ включено	СУ отключено	Отношение
Максимум	4,75	5,02	5,48	1,19	19,13	16,08
Среднее значение	8,83	9,37	5,76	1,37	22,46	16,36



а



б

Рис. 10. Зависимости коэффициентов несимметрии по обратной (а) и нулевой (б) последовательностям от времени

На рис. 12 показаны графики, характеризующие динамику изменений фазных напряжений на шинах 0,4 кВ подстанции потребителя. Из них видно, что при отключенном симметрирующем устройстве уровни напряжений далеко выходят из диапазона $\pm 10\%$ от номинального значения. При включенном симметрирующем устройстве таких явлений не наблюдается.

На рис. 13 показана динамика изменений токов, потребляемых балансером, а на рис. 14 и 15 представлены графики, характеризующие энергоэффективность симметрирующего устройства. Из их анализа можно сделать вывод о том, что при включенном СУ потери активной мощности в трансформаторе ТМ-1000 снижаются в среднем на 11 %. Потребляемая из сети активная мощность увеличивается при включении симметризатора в среднем на 2 кВт, что составляет примерно 2 % от мощности симметризуемой нагрузки.

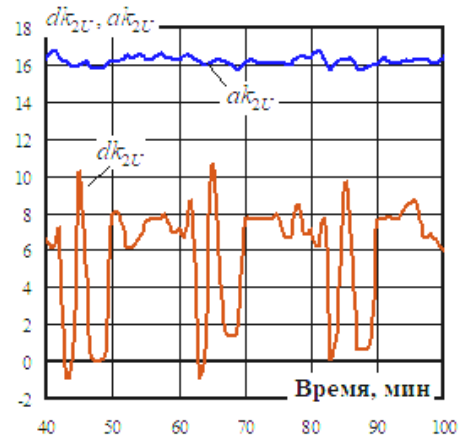
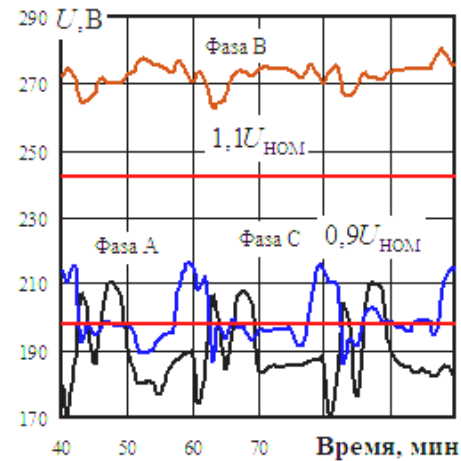
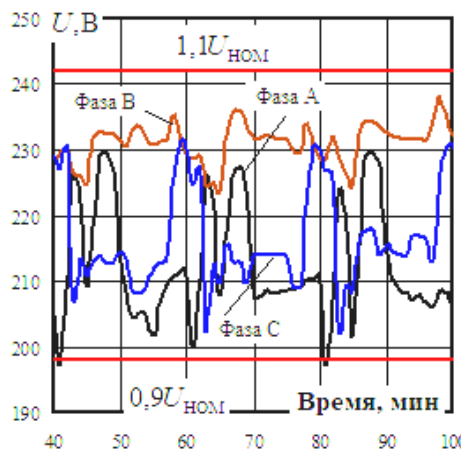


Рис. 11. Различия dk_{2U} и отношения ak_{2U} величин k_{2U} и k_{0U} при включенном и отключенном симметрирующем устройстве



а



б

Рис. 12. Зависимости напряжений на шинах 0,4 кВ подстанции потребителя от времени: а — СУ отключено; б — СУ включено

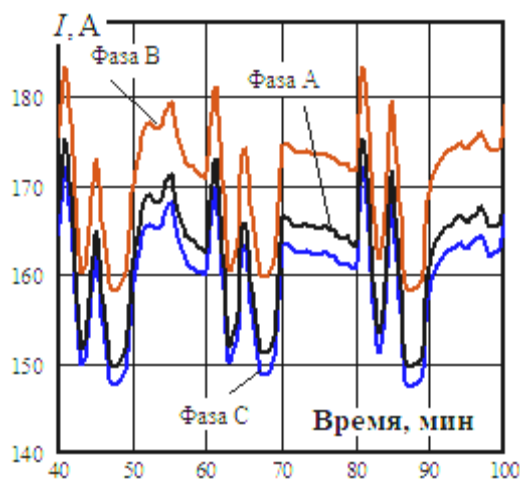


Рис. 13. Зависимости токов, потребляемых СУ, от времени

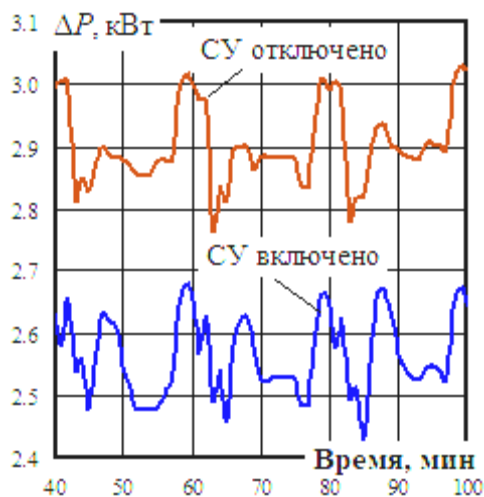


Рис. 14. Зависимости потерь в трансформаторе ТМ-1000 от времени

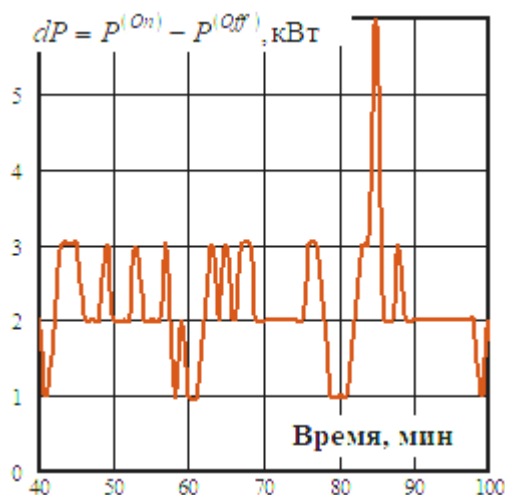


Рис. 15. Снижение потребляемой активной мощности при включении симметрирующего устройства

Заключение. Разработаны компьютерные модели, обеспечивающие определение режимов и анализ качества электроэнергии в системах электроснабжения, оснащенных симметрирующими устройствами с зигзагообразным соединением обмоток и питающихся от подстанций железных дорог с тяговыми сетями 25 кВ. Модели балансировщиков могут использоваться для определения режимов СЭС любой сложности, а результаты моделирования — применяться на практике при разработке методов улучшения качества электроэнергии.

Исследования выполнены в рамках государственного задания «Проведение прикладных научных исследований» по теме «Повышение качества электрической энергии и электромагнитной безопасности в системах электроснабжения железнодорожного транспорта, оснащенных устройствами Smart Grid, путем применения методов и средств математического моделирования на основе фазных координат», проект № АААА-А20-120111690029-4 от 16.11.2020 г.

Литература

1. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Авдиенко И.М. Моделирование систем тягового электроснабжения, оснащенных симметрирующими трансформаторами. М.; Берлин: Директ-Медиа, 2017. 168 с.
2. Топольски Л., Важны К., Ганзелка З. Компенсация асимметрии токов и напряжений. Симметризатор в сетях 0,4 кВ // Новости электротехники. 2021. № 2 (128)-3 (129). С. 46-48.
3. Topolski L., Woźny K., Hanzelka Z. Kompensacja asymetrii prądów i napięć powodowanej odbiornikami i odnawialnymi źródłami energii za pomocą transformatora symetryzującego w sieciach niskich napięć. URL: <http://pe.org.pl/articles/2019/9/39.pdf> (дата обращения: 28.04.2022).
4. Василенко Я.В. Цифровизация российской электроэнергетики: современное состояние и перспективы развития // Проблемы рос. экономики на современном этапе: материалы всерос. науч.-практической конф. (12 апр. 2019 г.). М., 2020. С. 105-111.
5. Воротничкий В.Э. Цифровизация в экономике и электроэнергетике // Энергетик. 2019. № 12. С. 6-14.
6. Янукович Г.И., Збродыга В.М., Королевич Н.Г. Трансформатор со схемой соединения обмоток Y/Δ с зигзагом // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве. 2012. Т. 1. С. 141-145.
7. Янукович Г.И., Збродыга В.М., Сердешнов А.П. Трансформатор Y/Δ с зигзагом как источник питания нелинейных электроприемников // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве. 2006. Т. 1. С. 274-277.
8. Бошняга В.А., Суслов В.М. Исследование несимметричных режимов трехфазных трехстержневых трансформаторов со схемой соединения обмоток «в зигзаг» // Проблемы региональной энергетики. 2013. № 3 (23). С. 39-46.
9. Пустоветов М.Ю. Расширение компьютерной модели трёхфазного двухобмоточного трансформатора до возможности моделирования схемы «зигзаг» // Вестн. науки Сибири. 2014. № 4 (14). С. 1-8.
10. Плешков П.Г., Зинзура В.В., Некрасов А.В. Математическое моделирование работы системы автоматического управления устройством регулирования напряжения под нагрузкой силового трансформатора со схемой соединения обмоток «треугольник/зигзаг с нулем» // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. 2014. № 1 (25). С. 102-110.
11. Косоухов Ф.Д., Васильев Н.В., Криштопа Н.Ю. Применение трансформатора «звезда-зигзаг с нулем» для снижения потерь от несимметрии токов в сельских сетях 0, 38 кВ // Изв. С.-Петерб. гос. аграрного ун-та. 2015. № 40. С. 244-249.
12. Шкуропаг И.А. Расчёт само- и взаимной индуктивности в трёхфазном трансформаторе со схемой соединения обмоток «звезда-зигзаг» // Синтез, анализ и диагностика электронных цепей: сб. тр. конф. (10-13 окт. 2018 г.). Ульяновск, 2018. С. 101-111.
13. Габитов Д.А., Ахметшин Р.С. Особенности трансформаторов со вторичной обмоткой соединением зигзаг // Теорети-

- ческие и практические аспекты развития науч. мысли в современном мире: сб. ст. Междунар. науч.-практической конф. (5 дек. 2018 г.). Уфа, 2018. Ч. 2. С. 9-11.
14. Вертинский П.А. Использование зигзагообразных обмоток для согласования и симметрирования электрических и механических нагрузок // Механизация строительства. 2007. № 8. С. 18-22.
 15. Azhar Ahmad, Rosli Omar, Marizan Sulaiman. Application of ZigZag Transformers to Mitigate Triplen Harmonics in 3 Phase 4 Wire Electrical Distribution System. 2006 4th Student Conference on Research and Development, 2006. Publisher: IEEE.
 16. Suhel Kaisar Shaikh, Anwar Mubarak Mulla, Sameer Usman Bagwan, Yakub Anwar Makandar. Analysis and Application of Zigzag Transformer in Distribution System for Mitigation of Triplen Harmonics. 2020 5th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES), 2020. Publisher: IEEE.
 17. Karthi K., Radhakrishnan R., Baskaran J.M., Louis Sam Titus. Role of ZigZag transformer on neutral current reduction in three phase four wire power distribution system. 2017 International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICT), 2017. Publisher: IEEE.
 18. Basu K.P., Hafidz S.A. Mitigation of single-phase voltage sag and swell with zigzag transformer. 2008 Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2008. Publisher: IEEE.
 19. Khera P.P. Application of zigzag transformers for reducing harmonics in the neutral conductor of low voltage distribution system. Conference Record of the 1990 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 1990. Publisher: IEEE.
 20. Basu K.P., Mukerji S.K. Experimental investigation into operation under single-phasing condition of a three-phase induction motor connected across a zigzag transformer. IEEE Transactions on Education. 2004. V. 47, iss. 3. Publisher: IEEE.
 21. Vishnu T.P., Gopakumar P., Sunitha R. Condition Monitoring of Zigzag Transformers in Composite Transmission Lines for Enhanced Transfer of Combined AC and DC Power. 2020 IEEE International Conference on Power Systems Technology (POWERCON). Publisher: IEEE.
 22. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем: моногр. Иркутск: Изд-во ИРГУПС, 2005. 273 с.
 23. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Любченко И.А., Черепанов А.В. Улучшение качества электроэнергии в системах электроснабжения нетяговых потребителей железных дорог. М.; Берлин: Директ-Медиа, 2020. 183 с.
 - electrical receivers // *Energoobespechenie i energosberezhenie v sel'skom hozyajstve*. 2006. V. 1. P. 274-277.
 8. Boshnyaga V.A., Suslov V.M. Study of asymmetric modes of three-phase three-rod transformers with a zigzag winding connection // *Problems of the Regional Energetics*. 2013. № 3 (23). P. 39-46.
 9. Pustovetov M.YU. Expansion of the computer model of a three-phase two-winding transformer to the possibility of modeling the "zigzag" circuit // *Bulletin of Siberian Science*. 2014. № 4 (14). P. 1-8.
 10. Pleshkov P.G., Zinzura V.V., Nekrasov A.V. Mathematical modeling of the operation of the automatic control system for a voltage regulation device under load of a power transformer with a "triangle / zigzag with zero" winding connection scheme // *Elektromekhanichni I energozberigayuchi sistemi*. 2014. № 1 (25). P. 102-110.
 11. Kosouhov F.D., Vasil'ev N.V., Krishtopa N.YU. Application of a star-zigzag transformer with zero to reduce losses from current unbalance in rural networks 0.38 kV // *Izvestiya Saint-Petersburg State Agrarian University*. 2015. № 40. P. 244-249.
 12. SHkuropat I.A. Calculation of self- and mutual inductance in a three-phase transformer with a star-zigzag winding connection // *Sintez, analiz i diagnostika elektronnykh cepej: sb. tr. konf. (10-13 okt. 2018 g.)*. Ulyanovsk, 2018. P. 101-111.
 13. Gabitov D.A., Ahmetshin R.S. Features of transformers with a secondary winding with a zigzag connection // *Teoreticheskie i prakticheskie aspekty razvitiya nauch. mysli v sovremennom mire: sb. st. Mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. (5 dek. 2018 g.)*. Ufa, 2018. CH. 2. P. 9-11.
 14. Vertinskij P.A. The use of zigzag windings for matching and balancing electrical and mechanical loads // *Mechanization of construction*. 2007. № 8. P. 18-22.
 15. Azhar Ahmad, Rosli Omar, Marizan Sulaiman. Application of ZigZag Transformers to Mitigate Triplen Harmonics in 3 Phase 4 Wire Electrical Distribution System. 2006 4th Student Conference on Research and Development, 2006. Publisher: IEEE.
 16. Suhel Kaisar Shaikh, Anwar Mubarak Mulla, Sameer Usman Bagwan, Yakub Anwar Makandar. Analysis and Application of Zigzag Transformer in Distribution System for Mitigation of Triplen Harmonics. 2020 5th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES), 2020. Publisher: IEEE.
 17. Karthi K., Radhakrishnan R., Baskaran J.M., Louis Sam Titus. Role of ZigZag transformer on neutral current reduction in three phase four wire power distribution system. 2017 International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICT), 2017. Publisher: IEEE.
 18. Basu K.P., Hafidz S.A. Mitigation of single-phase voltage sag and swell with zigzag transformer. 2008 Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2008. Publisher: IEEE.
 19. Khera P.P. Application of zigzag transformers for reducing harmonics in the neutral conductor of low voltage distribution system. Conference Record of the 1990 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 1990. Publisher: IEEE.
 20. Basu K.P., Mukerji S.K. Experimental investigation into operation under single-phasing condition of a three-phase induction motor connected across a zigzag transformer. IEEE Transactions on Education. 2004. V. 47, iss. 3. Publisher: IEEE.
 21. Vishnu T.P., Gopakumar P., Sunitha R. Condition Monitoring of Zigzag Transformers in Composite Transmission Lines for Enhanced Transfer of Combined AC and DC Power. 2020 IEEE International Conference on Power Systems Technology (POWERCON). Publisher: IEEE.
 22. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Complicated asymmetrical modes of electrical systems: monogr. Irkutsk: Izd-vo IRGUPS, 2005. 273 p.
 23. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Lyubchenko I.A., Cherepanov A.V. Improving the quality of electricity in power supply systems for non-traction consumers of railways. M.; Berlin: Direkt-Media, 2020. 183 p.

References

1. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Avdienko I.M. Modeling of traction power supply systems equipped with balancing transformers. M.; Berlin: Direkt-Media, 2017. 168 p.
2. Topol'ski L., Vazhny K., Ganzelka Z. Compensation for the asymmetry of currents and voltages. Symmetrizer in 0.4 kV networks // *The News of Electrical Engineering*. 2021. № 2 (128)-3 (129). P. 46-48.
3. Topolski L., Woźny K., Hanzelka Z. Kompensacja asymetrii prądów i napięć powodowanej odbiornikami i odnawialnymi źródłami energii za pomocą transformatora symetryzującego w sieciach niskich napięć. URL: <http://pe.org.pl/articles/2019/9/39.pdf> (data obrashcheniya: 28.04.2022).
4. Vasilenko YA.V. Digitalization of the Russian electric power industry: current state and development prospects // *Problemy ros. ekonomiki na sovremennom etape: materialy vseros. nauch.-prakticheskoy konf. (12 apr. 2019 g.)*. M., 2020. P. 105-111.
5. Vorotnickij V.E. Digitalization in the economy and the electric power industry // *Energetik*. 2019. № 12. P. 6-14.
6. YAnukovich G.I., Zbrodyga V.M., Korolevich N.G. Transformer with Y/Δ windings connection scheme with zigzag // *Energoobespechenie i energosberezhenie v sel'skom hozyajstve*. 2012. V. 1. P. 141-145.
7. YAnukovich G.I., Zbrodygo V.M., Serdeshnov A.P. Transformer Y/Δ with a zigzag as a power source for non-linear