

Моделирование режимов систем электроснабжения стационарных объектов железных дорог

А.В. Крюков^{1,2}✉, И.А. Любченко¹

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

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

✉ and_kryukov@mail.ru

Резюме

Для обеспечения железнодорожных перевозок необходима развитая инфраструктура, включающая предприятия по обслуживанию и ремонту подвижного состава, путевого хозяйства, а также объекты сигнализации, централизации, автоблокировки и связи. Функционирование этой инфраструктуры невозможно без надежного электрообеспечения, поэтому на многих тяговых подстанциях железных дорог сооружаются распределительные устройства 6-10-35 кВ, осуществляющие электроснабжение стационарных потребителей. Из-за влияния однофазной тяговой нагрузки в системах электроснабжения этих потребителей может возникать значительная несимметрия, уровни которой часто превышают допустимые нормы, что приводит к негативным эффектам, заключающимся в росте потерь и сокращении сроков службы электрооборудования. Необходима разработка и внедрение средств для улучшения качества электроэнергии, выбор которых в условиях проводимой в настоящее время цифровизации электроэнергетики должен осуществляться на основе компьютерных технологий. Для использования такого подхода нужны цифровые модели системы электроснабжения, корректно учитывающие все их важные аспекты. Такие модели могут быть реализованы на базе методов и средств, разработанных в Иркутском государственном университете путей сообщения. В основу этих методов положен подход, использующий фазные координаты, позволяющие получить наиболее близкое к физике процессов формализованное описание режимов трехфазно-однофазных электрических сетей. В статье представлены результаты исследований, направленных на разработку моделей систем электроснабжения стационарных объектов железнодорожного транспорта; при этом наибольшее внимание уделялось объектам сигнализации, централизации, автоблокировки и связи. Для моделирования применялся программный комплекс «Fazonord». С целью детального исследования режимов моделирование проведено для следующих вариантов: нагрузки на шинах 0,4 кВ подключались на фазные или линейные напряжения; выполнялась вариация протяженности питающих линий электропередачи 10 кВ; имитировались однофазные замыкания на землю; варьировались нагрузки трансформатора собственных нужд и потребителей, подключенных к шинам 0,4 кВ подстанций стационарных объектов; осуществлялось изменение тяговой нагрузки в целях определения ее влияния на систему электроснабжения; рассматривалось три вида нагрузок – трехфазная симметричная, двухфазная и однофазная; проводилось варьирование протяженности питающих линий электропередачи.

Ключевые слова

железнодорожный транспорт, линия электропередачи, системы электроснабжения стационарных потребителей, моделирование

Для цитирования

Крюков А. В. Моделирование режимов систем электроснабжения стационарных объектов железных дорог / А. В. Крюков, И. А. Любченко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 4 (72). – С. 195–210. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).195-210

Информация о статье

поступила в редакцию: 21.10.2021, поступила после рецензирования: 29.10.2021, принята к публикации: 10.11.2021

Благодарности

Исследования выполнены при финансовой поддержке по гранту государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FZZS-2020-0039).

Modeling of power supply systems of stationary railway objects

A. V. Kryukov^{1,2}✉, I. A. Lyubchenko¹

¹Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

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

✉ and_kryukov@mail.ru

Abstract

To ensure rail transportation, a developed infrastructure is needed, including enterprises for the maintenance and repair of rolling stock, track facilities, as well as signaling, centralization, automatic blocking and communication facilities. The functioning of

this infrastructure is impossible without a reliable electricity supply. Therefore, at many traction substations of alternating current railways, switchgears of 6-10-35 kV are being built, supplying power to stationary consumers, which include the facilities listed above. Due to the influence of a single-phase traction load in the power supply systems (PSS) of these consumers, significant unbalance may occur, the levels of which often exceed the permissible rating values, resulting in such negative effects as loss increase and a reduction in the operation life of electrical equipment. Therefore means to improve the quality of electricity have to be developed and introduced, the choice of which in the current digitalization of the electric power industry should be based of computer technologies. To use this approach, digital models of PSS are required correctly taking into account all the important aspects. Such models can be implemented on the basis of methods and tools developed in the Irkutsk State University of Railways. These are based on an approach using phase coordinates, which make it possible to obtain a formalized description of the modes of three-phase - single-phase electrical networks closest to the physics of the processes in question. The article presents the results of studies aimed at developing models of PSS for stationary objects of railway transport; with the primary attention paid to the objects of signaling, centralization, automatic blocking and communication. The Fazonord software package was used for modeling. For a detailed study of the modes, simulation was carried out for the following options: loads on 0.4 kV buses were connected to phase or line voltages; variation of the length of 10 kV power transmission lines was performed; simulated single-phase-to-earth faults; the transformer loads for auxiliary needs and consumers connected to the 0.4 kV buses of substations of stationary objects varied; the traction load was changed in order to determine its effect on the PSS; three types of loads were considered: three-phase symmetrical, two-phase and single-phase; the length of the power transmission lines was varied.

Keywords

railway transport, power transmission line, power supply systems for stationary consumers, modeling

For citation

Kryukov A. V., Lyubchenko I. A. Modelirovanie rezhimov sistem elektrosnabzheniya stacionarnykh ob"ektov zheleznykh dorog [Modeling of power supply systems of stationary railway objects]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 4 (72), pp. 195–210. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).195-210

Article Info

Received: 21.10.2021, Revised: 29.10.2021, Accepted: 10.11.2021

Acknowledgements

The research was carried out with financial support under a state assignment grant from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FZZS-2020-0039).

Введение

Функционирование стационарных объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта невозможно без надежного обеспечения электроэнергией. Поэтому на тяговых подстанциях железных дорог переменного тока сооружаются распределительные устройства 6-10-35 кВ, осуществляющие электроснабжение стационарных потребителей, к которым относятся предприятия по обслуживанию и ремонту подвижного состава, путевого хозяйства, а также объекты сигнализации, централизации, автоблокировки (СЦБ) и связи.

Вопросам изучения и совершенствования систем электроснабжения стационарных объектов железнодорожного транспорта посвящено значительное число работ, часть из которых приведена в библиографическом списке [1–35]. Публикации [1–13] посвящены исследованию качества электроэнергии в системах электроснабжения (СЭС) нетяговых потребителей и разработке методов и средств по его улучшению. В статьях [14–20] и книге [21] предлагаются методы моделирования таких систем. Резуль-

таты комплексных исследований СЭС нетяговых потребителей приведены в монографиях [22–24]. Решению задач повышения надежности электроснабжения нетяговых потребителей посвящены работы [25, 26]. Актуальные вопросы использования нетрадиционных источников энергии рассматриваются в статьях [27, 28]. Задачи обеспечения электромагнитной совместимости в СЭС стационарных объектов транспорта рассмотрены в [29, 30], а вопросы повышения энергетической эффективности сетей нетяговых потребителей – в работах [31–35].

Из-за влияния однофазной тяговой нагрузки в СЭС стационарных потребителей может возникать значительная несимметрия, уровни которой часто превышают допустимые нормы, что приводит к негативным эффектам, заключающимся в росте потерь и сокращении сроков службы электрооборудования. Необходимо разработка и внедрение средств для улучшения качества электроэнергии, выбор которых в условиях проводимой в настоящее время цифровизации электроэнергетики должен осуществляться на основе компьютерных

технологий. Для использования такого подхода нужны цифровые модели СЭС, корректно учитывающие все их важные аспекты. Такие модели могут быть реализованы на базе методов и средств, разработанных в Иркутском государственном университете путей сообщения [36, 37]. В основу этих методов положен подход, использующий фазные координаты, позволяющие получить наиболее близкое к физике описание процессов формализованное описание режимов трехфазно-однофазных электрических сетей.

Обобщенная схема электроснабжения стационарных (нетяговых) потребителей, включающая наиболее распространенные варианты конструктивного исполнения питающих линий электропередачи, показана на рис. 1. На этой схеме представлены следующие варианты линий электропередачи (ЛЭП):

- ЛЭП 10 кВ, подключенная к тяговой подстанции (ТП) через трансформатор собственных нужд (ТСН);
- ЛЭП 10 кВ, присоединенная к районной обмотке тягового трансформатора (ТТ);
- ЛЭП 10 кВ продольного электроснабжения, размещенная на опорах контактной сети (КС);
- линия 27,5 кВ «два провода – рельс» (ДПР).

Подключение через ТСН используется в СЭС объектов СЦБ для гальванической развязки с рельсовыми цепями. ЛЭП, смонтированные на опорах КС, подвержены значительному электрическому и магнитному влиянию элек-

тромагнитно неуравновешенной тяговой сети (ТС). В отличие от ЛЭП 10 кВ, имеющих пофазно однородную структуру, линии ДПР отличаются значительной неоднородностью. Кроме того, в этих ЛЭП часть тока протекает через землю.

Все представленные варианты СЭС характеризуются подключением питающих линий 6-10-25 кВ к ТТ. В результате влияния резко переменной тяговой нагрузки создаются значительные отклонения напряжений, несимметрия и гармонические искажения. Ниже представлены результаты исследований СЭС стационарных объектов железнодорожного транспорта, направленных на создание их компьютерных моделей с целью определения режимов и разработки мероприятий по улучшению качества электроэнергии.

Методика моделирования

В наиболее общей постановке задачу определения режимов СЭС можно представить как функциональное преобразование следующего вида:

$$\mathbf{A} : \mathbf{D} \Rightarrow \mathbf{X}, \quad (1)$$

где \mathbf{A} – нелинейный оператор; $\mathbf{D} = \mathbf{S} \cup \mathbf{Y}$ – входные данные; \mathbf{X} – вектор параметров, характеризующих режим СЭС; \mathbf{S} – параметры, описывающие структуру и характеристики элементов СЭС; \mathbf{Y} – параметры, которые характеризуют генераторы и нагрузки.

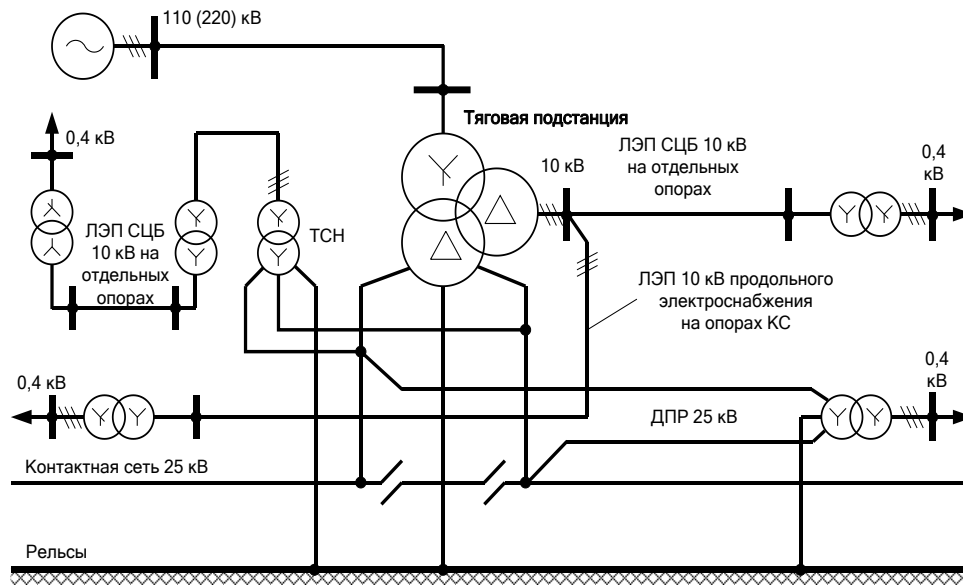


Рис. 1. Электроснабжение стационарных объектов железнодорожного транспорта

Fig. 1. Power supply of railway stationary objects

Параметры X , отвечающие преобразованию (1), могут быть определены из решения следующей нелинейной системы уравнений:

$$F(X, Y) = 0, \quad (2)$$

где X – вектор узловых напряжений в декартовых (U_k', U_k'') или полярных (U_k, δ_k) координатах; Y – вектор, компонентами которого являются активные P_k и реактивные Q_k мощности генераторов и нагрузок.

Для решения задач моделирования режимов СЭС стационарных объектов транспорта для формирования уравнений (2) целесообразно использовать подход, который базируется на применении фазных координат [36]; при этом используются полносвязанные решетчатые схемы замещения (РСЗ):

$$TEC: hub \cup con, \forall i, j \in hub \rightarrow con_{i,j} \subset con,$$

где TEC – обозначение РСЗ; hub – множество узлов РСЗ; con – множество ветвей РСЗ.

Множество силовых элементов СЭС, определяющих энергетические потоки в сетях, можно представить как объединение двух подмножеств:

$$PSS = Power \cup Conv.$$

В первое из них входят воздушные и кабельные ЛЭП, а также ТС. Второе – образуют трансформаторы различных конструкций.

Любые из перечисленных компонентов PSS можно обобщенно рассматривать как статические многопроводные элементы, состоящие из набора проводов или обмоток с электромагнитными связями [36]. Описанный подход к моделированию режимов СЭС реализован в программном комплексе «Fazonord». Цифровые модели СЭС, реализованные в фазных координатах, могут эффективно использоваться при разработке киберфизических систем электроснабжения стационарных объектов [38].

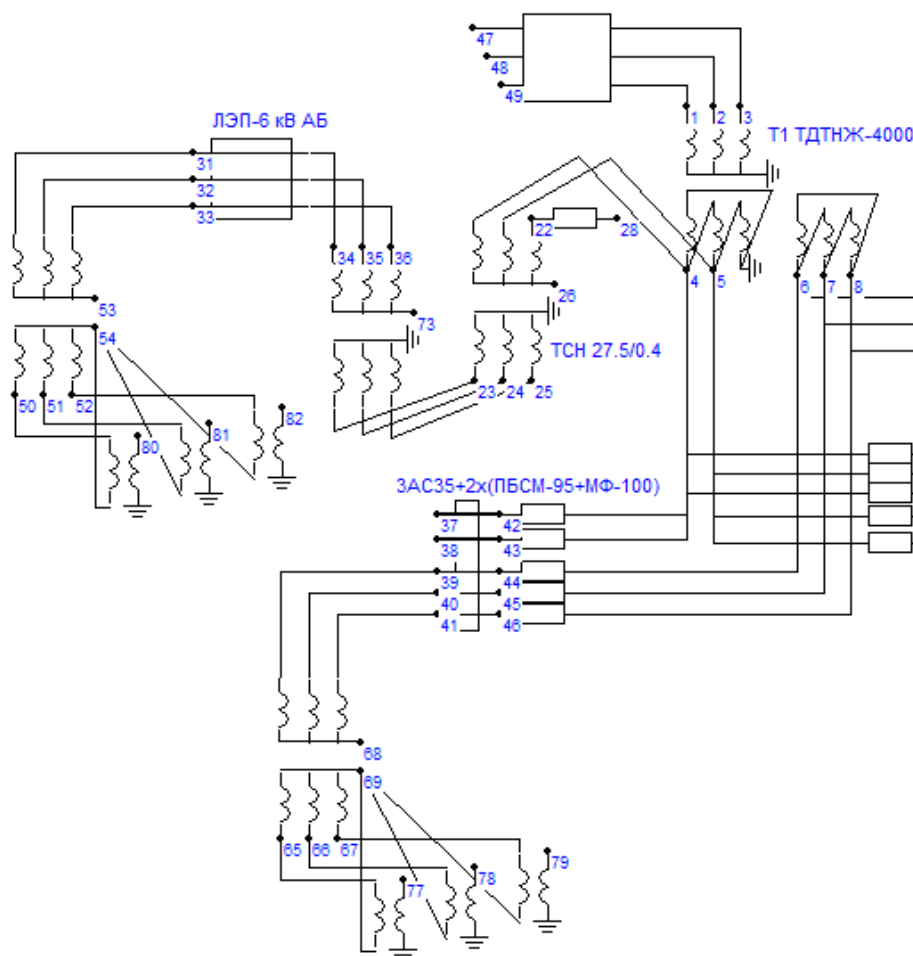


Рис. 2. Фрагмент изображения расчетной модели в программном комплексе «Fazonord»

Fig. 2. Partial picture of a design model in the “Fazonord” software complex

Результаты моделирования

Моделирование режимов СЭС стационарных объектов (см. рис. 1) осуществлялось в программном комплексе «Fazonord» на основе модели, фрагмент которой показан на рис. 2.

На этой схеме представлены модели следующих элементов СЭС:

- ТТ ТДТНЖ-40000/230/27,5/11;
- ЛЭП 10 кВ, смонтированная на отдельных опорах и подключенная к ТП через ТСН;
- ЛЭП 10 кВ, присоединенная к районной обмотке ТТ и также расположена на отдельных опорах;
- ЛЭП 10 кВ продольного электроснабжения, размещенная на опорах КС и подключенной к районной обмотке ТТ;
- линии ДПР 27,5 кВ.

На рис. 3 показаны координаты расположения проводов рассматриваемых ЛЭП.

Для детального исследования режимов

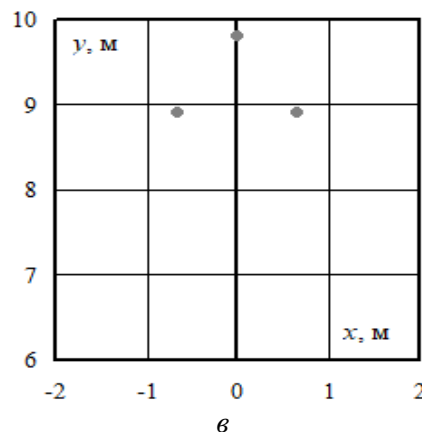
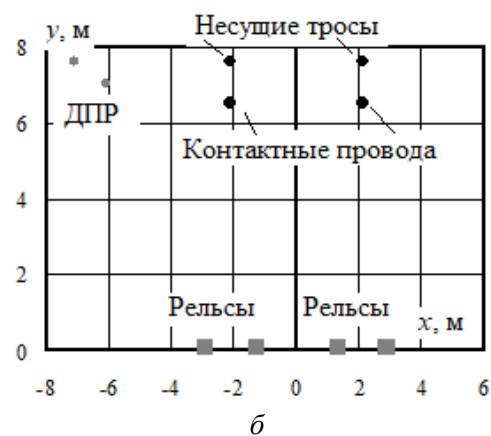


Рис. 3. Координаты расположения проводов:

- a* – линия электропередачи продольного электроснабжения; *б* – линия «два провода – рельс»;
в – линия электропередачи 10 кВ на отдельных опорах

Fig. 3. Wiring coordinates:

- a* – transmission line for longitudinal power supply; *б* – “two wires-rail” line;
в – 10kv power line on separate poles

в табл. 1 и на рис. 4–21. На рис. 4 – результаты определения коэффициентов несимметрии по обратной и нулевой последовательностям на шинах 0,4 кВ подстанций, питающих стационарные объекты.

Наибольшей несимметрией по нулевой последовательности характеризуется схема с ЛЭП, подключенной через ТСН. Это связано со значительным суммарным сопротивлением передачи (табл. 1), вызванным тройной трансформацией 27,5/0,4 кВ, 0,4/10(6) кВ и 10(6)/0,4 кВ. Наименьшая величина k_{0U} имеет место в схеме с ЛЭП ДПР, что связано с электромагнитным влиянием КС.

На рис. 5, 6 приведены результаты расчета коэффициентов несимметрии на шинах 0,4 кВ

при изменении расстояний до тяговой подстанции. На этих шинах задавались симметричные нагрузки $40 + j20$ кВ·А на фазу.

Вследствие повышения электромагнитного влияния ТС при возрастании длины сближения наибольший рост коэффициента несимметрии k_{2U} с увеличением расстояния x наблюдается в ЛЭП продольного электроснабжения и ДПР. Наименьшая интенсивность увеличения этого параметра имеет место в ЛЭП, которая подключена через ТСН. Это связано с тем, что сопротивление X_C (табл. 1) в данной сети определяется в основном сопротивлениями трансформаторов.

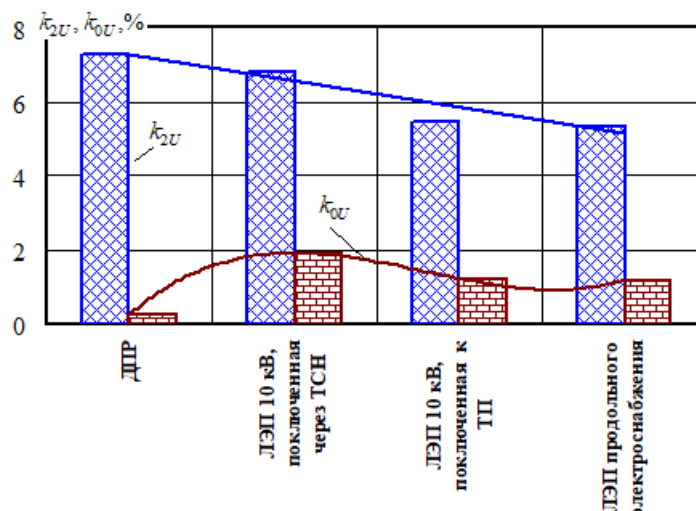


Рис. 4. Коэффициенты несимметрии на шинах 0,4 кВ подстанций сигнализации, централизации, автоблокировки (длина линии электропередачи – 10 км)

Fig. 4. Unbalance factors on 0,4 kv buses of signaling, centralization and automatic blocking substations (length of power line 10 km)

Таблица 1. Токи I и реактансы X_C короткого замыкания контактной сети на шинах 0,4 кВ подстанций стационарных объектов, %

Table 1. Currents I and reactances X_C of an overhead short circuit on 0,4 kV substations of stationary objects, %

Параметр	Точка контроля параметра	Вариант линии электропередачи			
		10 кВ, подключенная через трансформатор собственных нужд	Продольного электроснабжения	10 кВ, подключенная к районной обмотке	Линия «два провода – рельс»
I, A	Фаза А	1 774	4 335	4 322	4 236
	Фаза В	1 929	4 662	4 708	4 655
	Фаза С	1 760	4 384	4 348	4 080
$X_C, \text{ Ом}$	Фаза А	0,21	0,09	0,09	0,09
	Фаза В	0,20	0,08	0,08	0,08
	Фаза С	0,22	0,09	0,09	0,09
Среднее значение $X_C, \text{ Ом}$	–	0,21	0,09	0,09	0,09
$S_{КЗ}, \text{ МВ} \cdot \text{ А}$	–	0,69	1,69	1,69	1,64

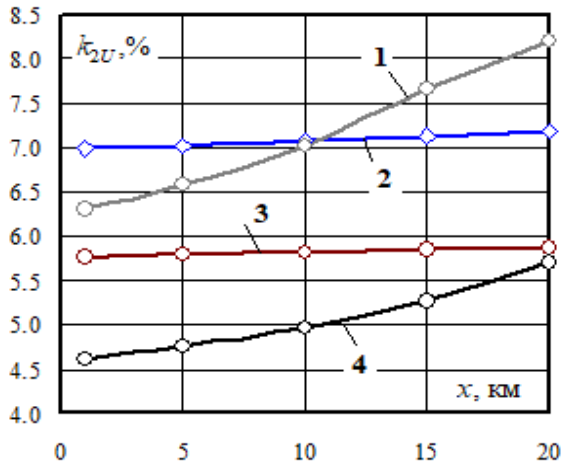


Рис. 5. Зависимость коэффициента несимметрии по обратной последовательности k_{2U} от расстояния x до питающей подстанции: 1 – линия «два провода – рельс»; 2 – ЛЭП 10 кВ, подключенная через трансформатор собственных нужд; 3 – ЛЭП 10 кВ, подключенная к районной обмотке тягового трансформатора; 4 – ЛЭП 10 кВ продольного электроснабжения

Fig. 5. Dependence of unbalance factor by reverse sequence k_{2U} on distance x to the feeding substation; 1 – “two wires-rail” line; 2 – 10 kV power line connected through the house transformer; 3 – 10 kV power line connected to the regional winding of the traction transformer; 4 – 10 kV power line of the longitudinal power supply

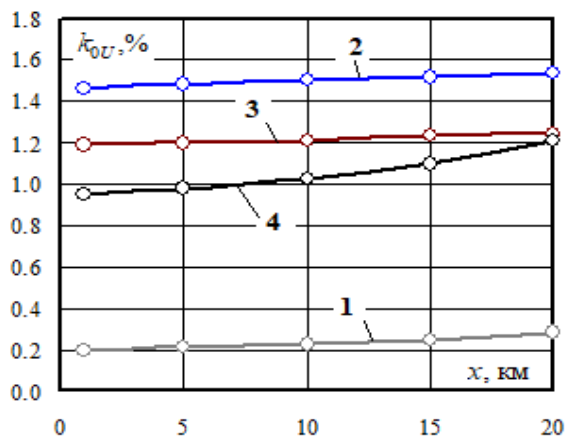


Рис. 6. Зависимость коэффициента несимметрии по нулевой последовательности k_{0U} от расстояния до питающей подстанции (обозначения аналогичны рис. 5)

Fig. 6. Dependence of unbalance factor by zero sequence k_{0U} on the distance to the feeding substation (designation same as on fig. 5)

Уровни несимметрии по нулевой последовательности в линиях, смонтированных на отдельных опорах, мало зависят от x . Увеличение k_{0U} в ЛЭП ДПР и продольного электроснабжения (ПЭ) объясняется электромагнитным влиянием ТС.

На рис. 7–10 приведены результаты моделирования режимов однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) в линиях 10 кВ. Такие ЛЭП, как правило, работают с изолированной нейтралью, поэтому изучение влияния ОЗЗ на показатели качества электроэнергии имеет практическую значимость. Результаты моделирования ОЗЗ в ЛЭП, подключенной к районной обмотке ТТ, приведены на рис. 7, 8. Представленные результаты свидетельствуют о том, что однофазные замыкания на землю мало влияют на уровни несимметрии.

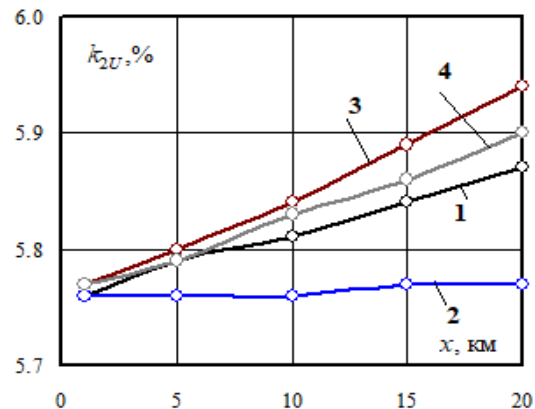


Рис. 7. Зависимость коэффициента несимметрии k_{2U} от координаты x для линии электропередачи, подключенной к районной обмотке тягового трансформатора:

1 – замыканий нет; 2 – замыкание фазы А; 3 – замыкание фазы В; 4 – замыкание фазы С

Fig. 7. Dependence of unbalance factor k_{2U} on coordinate x for the power supply line connected to the regional winding of the traction transformer: 1 – no short circuits; 2 – phase A short circuit; 3 – phase B short circuit; 4 – phase C short circuit

Исключение составляет режим замыкания фазы В, при котором коэффициент k_{2U} не меняется с ростом координаты x , зависимость $k_{0U} = k_{0U}(x)$ приобретает выраженный нелинейный характер с двумя экстремумами.

При консольном подключении данной ЛЭП расстояние x может значительно увеличи-

ваться и влияние замыканий на землю будет более заметным.

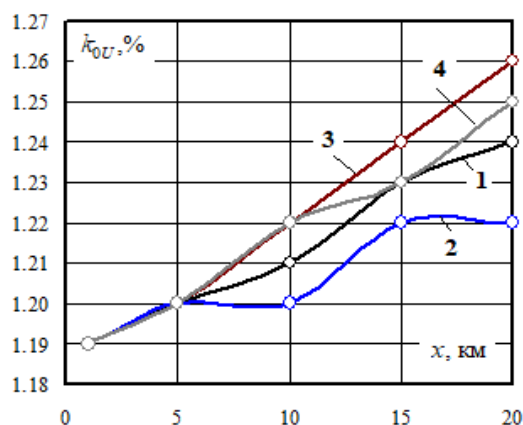


Рис. 8. Зависимость коэффициента несимметрии k_{0U} от координаты x для линии электропередачи, подключенной к районной обмотке тягового трансформатора (обозначения аналогичны рис. 7)

Fig. 8. Dependence of unbalance factor k_{0U} on coordinate x for the power supply line connected to the regional winding of the traction transformer: (designation same as on fig. 7)

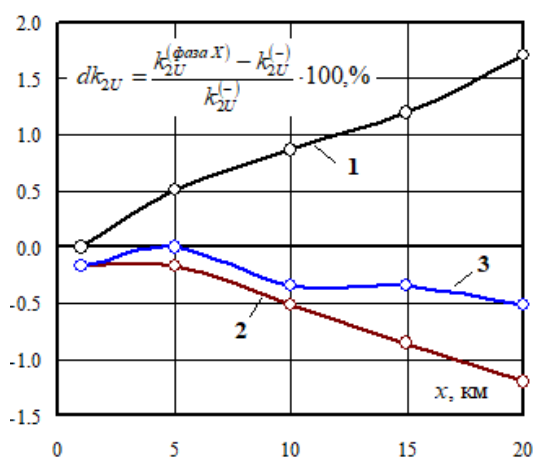


Рис. 9. Отличия в коэффициентах k_{2U} при однофазных замыканиях на землю:

$k_{2U}^{(фаза X)}$ – коэффициенты несимметрии при замыкании на землю фазы X , $X = \overline{A, B, C}$; $k_{2U}^{(-)}$ – коэффициент несимметрии при отсутствии замыканий (обозначения аналогичны рис. 7)

Fig. 9. Difference in the k_{2U} factors under single-phase ground short circuits: $k_{2U}^{(фаза X)}$ – unbalance factors under ground short circuit of phase X $X = \overline{A, B, C}$; $k_{2U}^{(-)}$ – unbalance factor with no short circuits (designations same as on fig. 7)

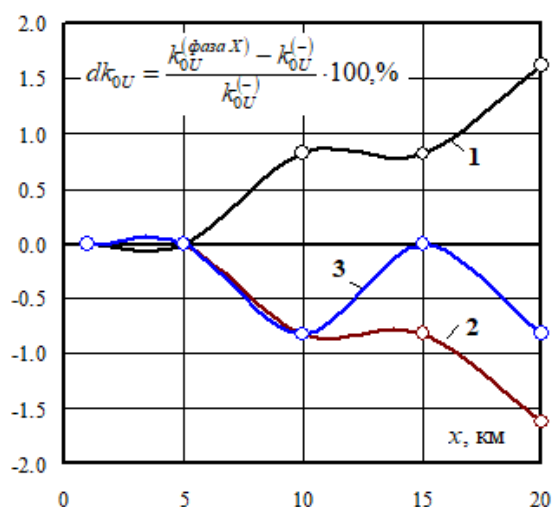


Рис. 10. Отличия в коэффициентах k_{0U} при однофазных замыканиях на землю:

$k_{0U}^{(фаза X)}$ – коэффициенты несимметрии при замыкании на землю фазы X , $X = \overline{A, B, C}$; $k_{0U}^{(-)}$ – коэффициент несимметрии при отсутствии замыканий (обозначения аналогичны рис. 7)

Fig. 10. Difference in factors k_{0U} under single phase ground short circuit: $k_{0U}^{(фаза X)}$ – unbalance factors under phase X ground short circuit. $X = \overline{A, B, C}$; $k_{0U}^{(-)}$ – unbalance factor with no short circuits (designation same as on fig. 7)

Транспозиция проводов в ЛЭП, питающих стационарные объекты, применяется в основном для снижения электромагнитного влияния между смежными ЛЭП и уменьшения наведенных напряжений на линиях связи. Однако вопрос о влиянии транспозиции на несимметрию в СЭС объектов СЦБ остается недостаточно изученным. Результаты моделирования для ЛЭП 10 кВ, подключенной к районной обмотке ТТ, показаны на рис. 11. Из него можно сделать вывод, что транспозиция этой ЛЭП незначительно влияет на коэффициент несимметрии по обратной последовательности.

Результаты моделирования несимметричных режимов при вариации нагрузки ТСН приведены на рис. 12, 13. Нагрузка ТСН варьировалась в диапазоне от холостого хода до величины 335 кВ·А, что соответствовало коэффициенту загрузке, равному 84 %.

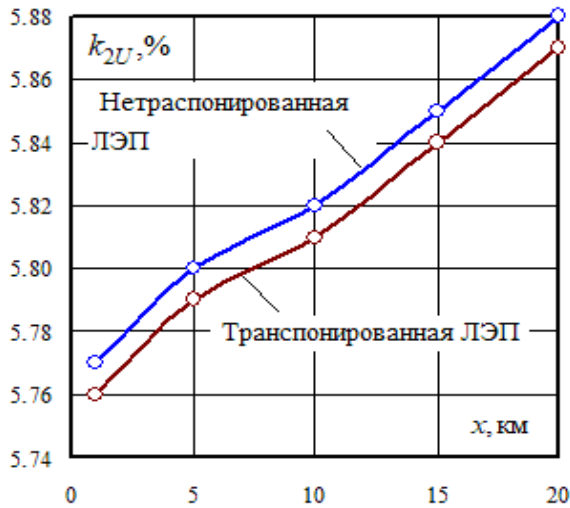


Рис. 11. Зависимость коэффициента несимметрии k_{2U} от расстояния до питающей тяговой подстанции

Fig. 11. Dependence of the unbalance factor k_{2U} on the distance to the feeding traction substation

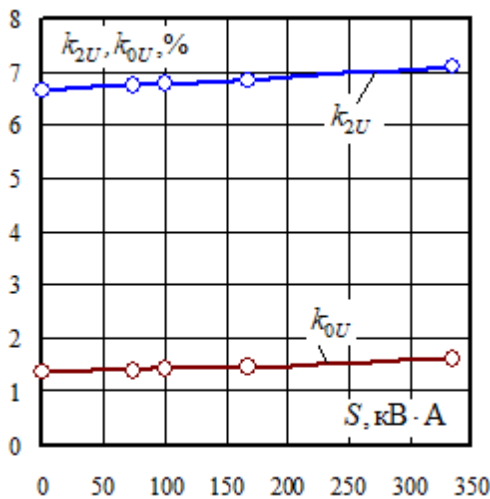


Рис. 12. Зависимость коэффициентов несимметрии от нагрузки трансформатора собственных нужд

Fig. 12. Dependence of the unbalance factors on the house transformer load

Полученные результаты показывают, что нагрузка ТСН заметно влияет на величину коэффициента несимметрии по нулевой последовательности на шинах 0,4 кВ; отличие этого коэффициента при нагрузке 335 кВ·А от режима холостого хода достигает 18 %; влияние рассматриваемого фактора на коэффициент k_{2U} значительно меньше и составляет при обозначенной нагрузке примерно 7 %.

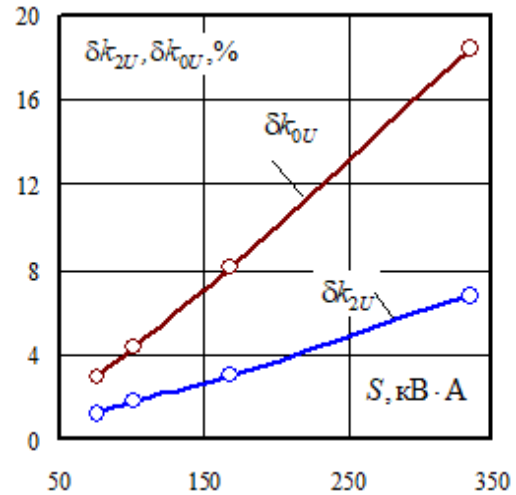


Рис. 13. Зависимость параметров $\delta k_{2U}, \delta k_{0U}$ от нагрузки трансформатора собственных нужд:

$$\delta k_{2U} = \frac{k_{2U} - k_{2U}^{(0)}}{k_{2U}^{(0)}} \cdot 100; \delta k_{0U} = \frac{k_{0U} - k_{0U}^{(0)}}{k_{0U}^{(0)}} \cdot 100;$$

k_{2U}, k_{0U} – коэффициенты несимметрии при нагрузке S ; $k_{2U}^{(0)}, k_{0U}^{(0)}$ – коэффициенты несимметрии при нагрузке $S = 0$

Fig. 13. Dependence of the parameters $\delta k_{2U}, \delta k_{0U}$ on the house transformer load:

$$\delta k_{2U} = \frac{k_{2U} - k_{2U}^{(0)}}{k_{2U}^{(0)}} \cdot 100; \delta k_{0U} = \frac{k_{0U} - k_{0U}^{(0)}}{k_{0U}^{(0)}} \cdot 100; k_{2U},$$

k_{0U} – unbalance factors under the load S ;

$k_{2U}^{(0)}, k_{0U}^{(0)}$ – unbalance factors under the load $S=0$

Для оценки влияния нагрузок стационарных объектов на параметры несимметрии выполнено моделирование при изменении их величин в диапазоне от холостого хода до значения 90 кВ·А, что соответствует допустимой перегрузке трансформатора на 7 % от номинала. Длины ЛЭП приняты равными 10 км (рис. 14, 15).

Приведенные результаты дают возможность сделать вывод о заметном влиянии нагрузок 0,4 кВ на уровни несимметрии по обратной и нулевой последовательностям. Например, для подстанции, питающейся через ТСН, коэффициент несимметрии k_{2U} увеличивается с 6,4 до 11 %; величина k_{0U} повышается от нуля до 10 %.

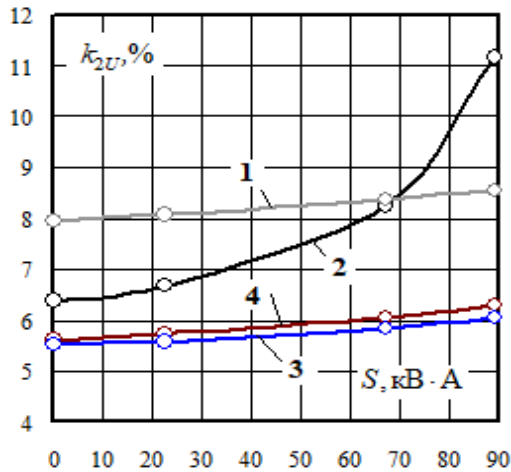


Рис. 14. Зависимость коэффициента несимметрии k_{2U} от нагрузки объектов сигнализации, централизации, автоблокировки (обозначения аналогичны рис. 5)

Fig. 14. Dependence of the unbalance factor k_{2U} on signaling, centralization and automatic blocking objects' loading (designation same as on fig. 5)

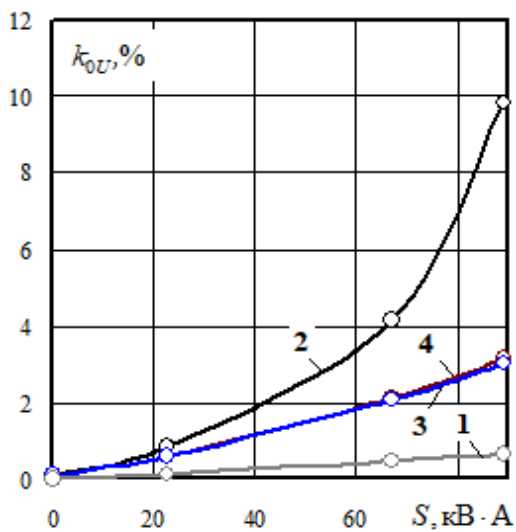


Рис. 15. Зависимость коэффициента несимметрии k_{0U} от нагрузки объектов сигнализации, централизации, автоблокировки (обозначения аналогичны рис. 5)

Fig. 15. Dependence of the unbalance factor k_{0U} on signaling, centralization and automatic blocking objects' loading (designation same as on fig. 5)

Для изучения влияния тяговой нагрузки на несимметрию напряжений шин 0,4 кВ выполнена серия расчетов при вариации суммарной тяговой нагрузки при коэффициенте реактивной мощности $\text{tg}\varphi = 1$ (рис. 16, 17).

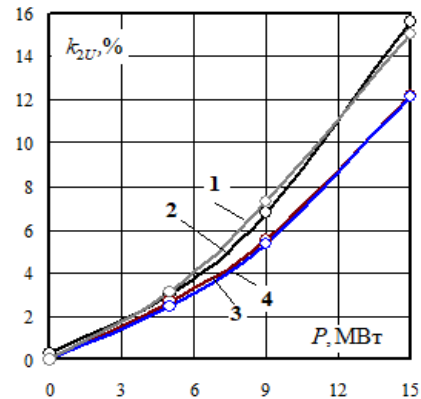


Рис. 16. Зависимость коэффициента несимметрии k_{2U} от тяговой нагрузки (обозначения аналогичны рис. 5)

Fig. 16. Dependence of the unbalance factor k_{2U} on traction load (designation same as on fig. 5)

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что имеет место существенный рост (до 15 % для ЛЭП ДПР и линии, подключенной через ТСН) коэффициента k_{2U} при увеличении суммарной тяговой нагрузки от 0 до 15 МВт при коэффициенте реактивной мощности, равном единице. Рост величины k_{0U} значительно меньше и достигает для ЛЭП, подключенной через ТСН, 6 %.

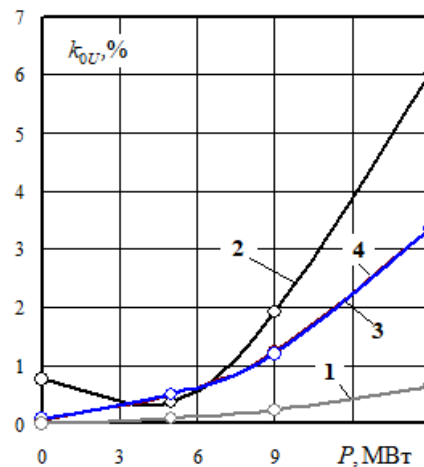


Рис. 17. Зависимость коэффициента несимметрии k_{0U} от тяговой нагрузки (обозначения аналогичны рис. 5)

Fig. 17. Dependence of the unbalance factor k_{0U} on traction load (designation same as on fig. 5)

Для изучения влияния характера нагрузки стационарных объектов выполнены расчеты при симметричных и несимметричных нагрузках. При этом кроме трехфазных нагрузок рас-

сматривались двухфазные и однофазные. Длины ЛЭП приняты равными 10 км. Результаты моделирования показаны на рис. 18 и 19.

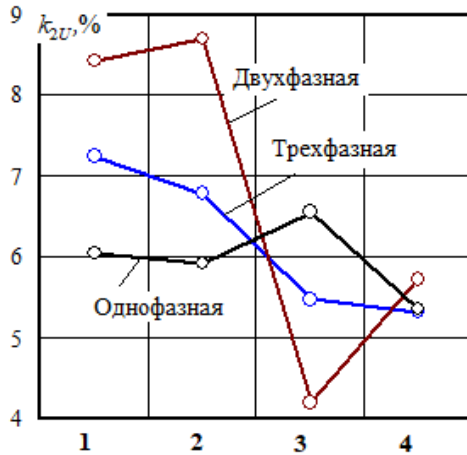


Рис. 18. Коэффициенты несимметрии напряжений по обратной последовательности на шинах 0,4 кВ подстанций сигнализации, централизации, автоблокировки

Fig. 18. Voltage unbalance factors by reverse sequence 0,4kV buses of signaling, centralization and automatic blocking substations

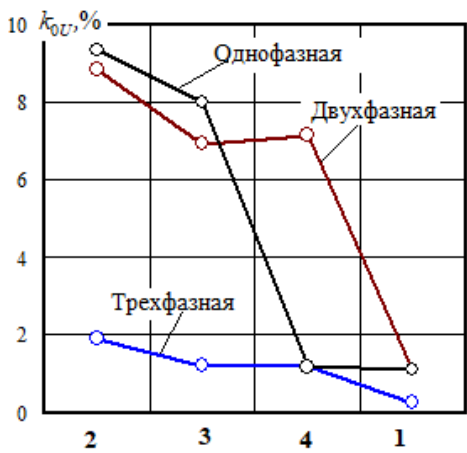


Рис. 19. Коэффициенты несимметрии по нулевой последовательности на шинах 0,4 кВ подстанций сигнализации, централизации, автоблокировки

Fig. 19. Voltage unbalance factors by zero sequence 0,4kV buses of signaling, centralization and automatic blocking substations

Представленные графики построены при следующих соотношениях суммарной нагрузки:

$$S_2 = \frac{2}{3} S_3;$$

$$S_1 = \frac{1}{3} S_3,$$

где S_3 , S_2 , S_1 – соответственно трехфазная симметричная, двухфазная и однофазная нагрузки; $S_3 = 40 + j20$ кВ·А.

Полученные результаты показывают, что имеет место существенный рост уровней несимметрии при включении несимметричной нагрузки. Наибольший рост несимметрии по обратной последовательности наблюдается при двухфазной нагрузке для ЛЭП ДПР, а по нулевой последовательности – при однофазной нагрузке для ЛЭП, подключенной через ТСН.

Результаты расчетов при нагрузках СЦБ, подключенных на линейные напряжения, приведены на рис. 20 и 21. Из их анализа следует вывод, что при подключении нагрузок стационарных объектов на линейные напряжения исчезает несимметрия по нулевой последовательности и незначительно снижается несимметрия по обратной последовательности. Следовательно, путем переключения нагрузок 0,4 кВ на линейные напряжения можно полностью устранить несимметрию по нулевой последовательности и снизить коэффициент k_{2U} (рис. 22).

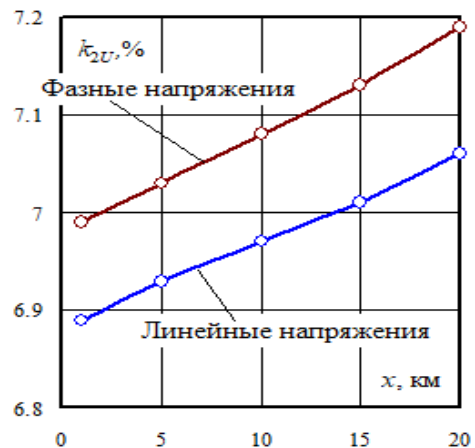


Рис. 20. Зависимости коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности от расстояния до питающей подстанции для линии электропередачи, подключенной через трансформатор собственных нужд

Fig. 20. Dependence of voltage unbalance factors by reverse sequence on the distance to the feeding substation for the power line connected through the house transformer

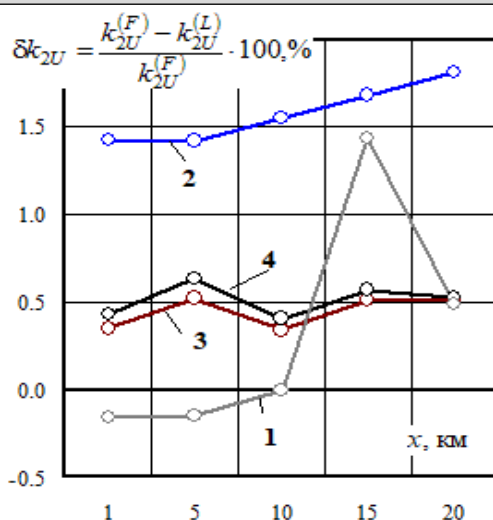


Рис. 21. Зависимости параметров δk_{2U} от длины линии электропередачи
Fig. 21. Dependence of parameters δk_{2U} on the length of a power line

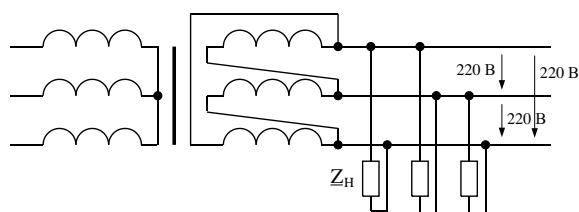


Рис. 22. Переключение нагрузок на линейные напряжения
Fig. 22. Shifting the loads to the linear voltages

Заключение

Результаты проведенных компьютерных исследований позволяют сформулировать следующие выводы:

1. При симметричных нагрузках на шинах 0,4 кВ подстанций стационарных объектов имеет место небольшая несимметрия по нулевой последовательности, возникающая из-за особенностей распределения магнитного поля рассеяния разных стержней трансформатора. Наибольшей несимметрией по нулевой последовательности характеризуется схема с ЛЭП 10 кВ, подключенной через ТСН, что связано с тройной трансформацией 27,5/0,4 кВ, 0,4/10(6) кВ и 10(6)/0,4 кВ.

2. Несимметрия напряжений по обратной последовательности на стороне 0,4 кВ зависит от длины ЛЭП. Наиболее интенсивный рост коэффициента k_{2U} имеет место в ЛЭП ПЭ и ДПР. В

наименьшей степени этот параметр зависит от величины x для ЛЭП, подключенной через ТСН. Это связано тем, что сопротивление данной сети определяется в основном сопротивлениями трансформаторов.

3. Однофазные замыкания на землю, возникающие в линиях 10(6) кВ с изолированной нейтралью, незначительно влияют на несимметрию по обратной и нулевой последовательностям напряжений на шинах 0,4 кВ подстанций.

4. Транспозиция проводов ЛЭП 6(10) кВ практически не влияет на коэффициент несимметрии по обратной последовательности напряжений 0,4 кВ.

5. Нагрузки ТСН заметно изменяют коэффициенты несимметрии по нулевой последовательности на шинах 0,4 кВ подстанций, которые получают питание через ТСН. Величины симметричных нагрузок подстанций стационарных объектов заметно влияют на уровни несимметрии по обратной и нулевой последовательностям.

6. При увеличении тяговой нагрузки наблюдается значительный рост коэффициента несимметрии по обратной последовательности на шинах 0,4 кВ подстанций. Повышение коэффициента k_{0U} значительно меньше.

7. Несимметричная нагрузка на шинах 0,4 кВ подстанций приводит к увеличению несимметрии напряжений на шинах 0,4 кВ. Наибольший рост коэффициента k_{2U} наблюдается при двухфазной нагрузке для ЛЭП ДПР, а по нулевой последовательности – при однофазной нагрузке для ЛЭП, подключенной через ТСН.

8. Переключение нагрузок СЦБ на линейные напряжения позволяет полностью устранить несимметрию по нулевой последовательности и уменьшить коэффициент k_{2U} .

9. Разработанные цифровые модели могут использоваться на практике при разработке мероприятий по улучшению качества электроэнергии в системах электроснабжения стационарных объектов железнодорожного транспорта. Цифровые модели СЭС, реализованные в фазных координатах, могут эффективно применяться при разработке киберфизических систем электроснабжения стационарных объектов [38].

Список литературы

1. Авилов В.Д. Повышение качества электроэнергии в распределительных сетях нетяговых потребителей // Изв. Транссиба. 2013. № 1 (13). С. 48–54.
2. 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.
3. Бобун А.А., Пинчуков П.С. Мониторинг качества электрической энергии в линиях автоблокировки железных дорог // Актуальные вопросы и перспективы развития науки и образования. Нефтекамск, 2018. С. 23–26.
4. Карабанов М.А. Снижение влияния системы тягового электроснабжения на электропитание нетяговых потребителей в моменты подключения преобразовательных агрегатов // Известия Транссиба. 2011. № 3 (7). С. 58–67.
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. Ожиганов Н.В., Попов А.А., Ожиганов С.Н. О повышении качества и надежности электроснабжения средств ЖАТ // Автоматика, связь, информатика. 2017. № 10. С. 27–30.
7. Ожиганов Н.В. Повышение качества электроэнергии для ЖАТ // Автоматика, связь, информатика. 2012. № 1. С. 22–26.
8. Орешков Е.В. Управление качеством электроэнергии в распределительных сетях железнодорожного транспорта // Качество в производственных и социально-экономических системах. Курск, 2018. С. 106–109.
9. Соколов С.Е., Соколова И.С. Регулирование напряжения в системах электроснабжения нетяговых потребителей железнодорожного транспорта // Вестн. Казах. акад. транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. 2014. № 6 (91). С. 154–157.
10. Shinzo Tamai. Novel power electronics application in traction power supply system in Japan. 2014 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition. 2014 Publisher: IEEE. DOI: 10.1109/EPEPEMC.2014.6980579.
11. Improving the Quality of Electrical Energy in the Railway Power Supply System / Ye. Sokol, V. Zamaruev, V. Ivakhno et al. // 2018 IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). 2018 Publisher: IEEE. DOI:10.1109/ELNANO.2018.8477533.
12. Kneschke T. Voltage flicker calculations for single-phase AC railroad electrification systems. Proceedings of the 2003 IEEE/ASME Joint Railroad Conference. 2003 Publisher: IEEE. DOI: 10.1109/RRCON.2003.1204662.
13. Optimal Design for Power Quality of Electric Railway / H. Lee, G. Kim, S. Oh et al. // SICE-ICASE International Joint Conference. 2006 Publisher: IEEE. DOI:10.1109/SICE.2006.314842.
14. Анализ результатов моделирования системы электроснабжения нетяговых потребителей железнодорожного транспорта / И.С. Евдасев, А.В. Дробов, В.Н. Галушко и др. // Проблемы безопасности на транспорте. – Гомель, 2017. С. 219–221.
15. Дробов А.В. Статистическая проверка адекватности математической модели системы электроснабжения нетяговых железнодорожных потребителей // Информационно-телекоммуникационные системы и технологии. Кемерово, 2017. С. 65–67.
16. Евдасев И.С., Галушко В.Н., Дробов А.В. Моделирование системы электроснабжения нетяговых потребителей железнодорожного транспорта // Вестн. Белорус. гос. ун-та трансп. Сер.: наука и транспорт. 2017. № 2 (35). С. 33–36.
17. Третьяков Е.А., Малышева Н.Н. Моделирование установившихся режимов системы электроснабжения нетяговых потребителей // Совершенствование электромеханических преобразователей энергии. Омск, 2010. С. 54–61.
18. Zaytseva L.A., Zaytsev V.V. Methods and Tools for Predicting Working Modes of Railroad Power-Supply Systems // IET International Conference On Railway Condition Monitoring. 2006 Publisher: IET.
19. Funabiki S., Nakano H., Tanaka T. A fuzzy-based control strategy for leveling electric power fluctuations in railroad substations. 4th IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems. IEEE PEDS 2001. Indonesia. Pro.
20. Hill R.J., Cevik I.H. On-line simulation of voltage regulation in autotransformer-fed AC electric railroad traction networks. IEEE Transactions on Vehicular Technology. 1993. Vol.: 42. Iss. 3. Publisher: IEEE.
21. Черемисин В.Т., Комяков А.А. Моделирование процессов электропотребления в системе нетягового электроснабжения железнодорожного транспорта. Омск, 2017. 161 с.
22. Аржаников Б.А., Сергеев Б.С., Набойченко И.О. Системы электроснабжения устройств СЦБ. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2009. 101 с.
23. Герман Л.А., Векслер М.И., Шелом И.А. Устройства и линии электроснабжения автоблокировки. М. : Транспорт, 1987. 192 с.
24. Герман Л.А., Калинин А.Л. Электроснабжение автоблокировки и электрической централизации. М.: Транспорт, 1974. 168 с.
25. Валяхметова 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.
26. Дорошук Д.В., Евдасев И.С. О параметрической надежности систем нетягового электроснабжения железнодорожного транспорта // Проблемы безопасности на транспорте. Гомель, 2005. С. 185–187.
27. Дынькин Б.Е., Лохманов В.В. Электроснабжение нетяговых потребителей железных дорог с использованием альтернативных источников энергии // Транспорт: наука, образование, производство. Ростов на Дону, 2017. С. 92–96.
28. Use of Renewable Energy Sources to Power Railroad Traffic Safety Installations / E. Spunei, B. Protea, I. Piroi et al // 11th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE). 2019 Publisher: IEEE.
29. Косарев А.Б., Сербиненко Д.В. Система обеспечения электромагнитной совместимости устройств автоблокировки и связи с тяговым электроснабжением переменного тока // Вестн. Науч.-исслед. ин-та ж.-д. трансп. 2011. № 6. С. 17–22.
30. Косарев А.Б., Сербиненко Д.В., Юрков А.Ю. Электрическое влияние системы тягового электроснабжения с высоковольтным питающим проводом на воздушные линии электропередач // Транспорт: наука, техника, управление. 2013. № 9. С. 21–24.

31. Головнёв Г.Е. Повышение энергетической эффективности работы системы электроснабжения нетяговых потребителей // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте. Омск, 2016. С. 80–84.
32. 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.
33. Митрофанов А.Н., Гаранин М.А., Добрынин Е.В. Управление технологиями электропотребления и энергосбережения. Самара : Изд-во СамГУПС, 2009. 150 с.
34. Никифоров М.М., Норкин И.Ю. Повышение технико-экономических показателей системы нетягового электроснабжения при внедрении АСКУЭ розничных рынков электроэнергии // Транспорт Урала. 2009. № 2 (21). С. 97–99.
35. Еркебаев А.Ж. Анализ методов оценки эффективности использования электроэнергии на нетяговые нужды железнодорожного транспорта // Разработка и эксплуатация электротехнических комплексов и систем энергетики и наземного транспорта. Омск, 2018. С. 59–66.
36. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск : Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2005. 273 с.
37. Улучшение качества электроэнергии в системах электроснабжения нетяговых потребителей железных дорог / В.П. Закарюкин и др. ; под ред. А.В. Крюкова. М. ; Берлин : Директ-Медиа, 2020. 183 с.
38. Воропай Н.И. От плана ГОЭЛРО к глобальному электроэнергетическому интернету // Электричество. 2020. № 12. С. 10–13.

References

1. Avilov V.D. Povysheniye kachestva elektroenergii v raspredelitel'nykh setyakh netyagovykh potrebiteley [Improving the quality of electricity in distribution networks of non-traction consumers]. *Izvestiya Transsiba [Journal of Transsib Railway Studies]*, 2013, No. 1 (13), pp. 48–54.
2. Avilov V.D., Tretyakov E.A., Krause A.V. Upravleniye kachestvom elektroenergii v raspredelitel'nykh setyakh zheleznodorozhnogo transporta [Power quality management in distribution networks of railway transport]. *Omskiy nauchnyy vestnik [Omsk Scientific Bulletin]*, 2013, No. 1 (117), pp. 183–187.
3. Bobun A.A., Pinchukov P.S. Monitoring kachestva elektricheskoy energii v liniyakh avtoblokirovki zheleznykh dorog [Monitoring of the quality of electrical energy in auto-blocking lines of railways]. *Aktual'nyye voprosy i perspektivy razvitiya nauki i obrazovaniya [Actual problems and prospects for the development of science and education]*, 2018, pp. 23–26.
4. Karabanov M.A. Snizheniye vliyaniya sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya na elektropitaniye netyagovykh potrebiteley v momenty podklyucheniya preobrazovatel'nykh agregatov [Reducing the influence of the traction power supply system on the power supply of non-traction consumers at the moments of connecting the converting units]. *Izvestiya Transsiba [Journal of Transsib Railway Studies]*, 2011, No. 3 (7), pp. 58–67.
5. Kashtanov A.L., Ananyeva N.G. Elektricheskiye raspredelitel'nyye seti zheleznodorozhnykh uzlov: problemy i puti ikh resheniya [Electric distribution networks of railway junctions. problems and ways of their solution]. *Izvestiya Transsiba [Journal of Transsib Railway Studies]*, 2018, No. 1 (33), pp. 79–87.
6. Ozhiganov N.V., Popov A.A., Ozhiganov S.N. O povyshenii kachestva i nadezhnosti elektrosnabzheniya sredstv ZHAT [On improving the quality and reliability of power supply for railway automation and telemechanics]. *Avtomatika, svyaz', informatika [Automation, communication, informatics]*, 2017, No. 10, pp. 27–30.
7. Ozhiganov N.V. Povysheniye kachestva elektroenergii dlya ZHAT [Improving the quality of electricity for railway automation and telemechanics]. *Avtomatika, svyaz', informatika [Automation, communication, informatics]*, 2012, No. 1, pp. 22–26.
8. Oreshkov E.V. Upravleniye kachestvom elektroenergii v raspredelitel'nykh setyakh zheleznodorozhnogo transporta [Power quality management in distribution networks of railway transport]. *Kachestvo v proizvodstvennykh i sotsial'no-ekonomicheskikh sistemakh [Quality in industrial and socio-economic systems]*. Kursk, 2018. pp. 106–109.
9. Sokolov S.E., Sokolova I.S. Regulirovaniye napryazheniya v sistemakh elektrosnabzheniya netyagovykh potrebiteley zheleznodorozhnogo transporta [Voltage regulation in power supply systems of non-traction consumers of railway transport]. *Vestn. Kazakh. akad. transporta i kommunikatsiy im. M. Tynyshpayeva [Bulletin of the Kazakh Academy of Transport and Communications]*, 2014, No. 6 (91), pp. 154–157.
10. Shinzo Tamai. Novel power electronics application in traction power supply system in Japan. 2014 *16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition*. 2014 Publisher: IEEE.
11. Sokol Ye., Zamaruev V., Ivakhno V., Styslo B. Improving the Quality of Electrical Energy in the Railway Power Supply System. 2018 *IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. 2018 Publisher: IEEE.
12. Kneschke T. Voltage flicker calculations for single-phase AC railroad electrification systems. *Proceedings of the 2003 IEEE/ASME Joint Railroad Conference*. 2003 Publisher: IEEE.
13. Lee H., Kim G., Oh S., Lee Ch. Optimal Design for Power Quality of Electric Railway. 2006 *SICE-ICASE International Joint Conference*. 2006 Publisher: IEEE.
14. Evdasev I.S., Drobov A.V., Galushko V.N. et al. Analiz rezul'tatov modelirovaniya sistemy elektrosnabzheniya netyagovykh potrebiteley zheleznodorozhnogo transporta [Analysis of the results of modeling the power supply system for non-traction consumers of railway transport]. *Problemy bezopasnosti na transporte [Problems of safety in transport]*. Gomel, 2017, pp. 219–221.
15. Drobov A.V. Statisticheskaya proverka adekvatnosti matematicheskoy modeli sistemy elektrosnabzheniya netyagovykh zheleznodorozhnykh potrebiteley [Statistical verification of the adequacy of the mathematical model of the power supply system

for non-traction railway consumers]. *Informatsionno-telekommunikatsionnyye sistemy i tekhnologii [Information and telecommunication systems and technologies]*. Kemerovo, 2017, pp. 65–67.

16. Evdasev I.S., Galushko V.N., Drobov A.V. Modelirovaniye sistemy elektrosnabzheniya netyagovykh potrebiteley zheleznodorozhnogo transporta [Modeling of the power supply system for non-traction consumers of railway transport]. *Vestn. Belorus. gos. un-ta transp. Ser.: nauka i transport [Bulletin of the Belarussian State University of Transport: Science and Transport]*, 2017, No. 2 (35), pp. 33–36.

17. Tretyakov E.A., Malysheva N.N. Modelirovaniye ustanovivshikhsya rezhimov sistemy elektrosnabzheniya netyagovykh potrebiteley [Modeling of steady-state modes of the power supply system for non-traction consumers]. *Sovershenstvovaniye elektromekhanicheskikh preobrazovateley energii [Improvement of electromechanical energy converters]*. Omsk, 2010, pp. 54–61.

18. Zaytseva L.A., Zaytsev V.V. Methods and Tools for Predicting Working Modes of Railroad Power-Supply Systems. 2006 IET International Conference On Railway Condition Monitoring. 2006 Publisher: IET.

19. Funabiki S., Nakano H., Tanaka T. A fuzzy-based control strategy for leveling electric power fluctuations in railroad substations. *4th IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems. IEEE PEDS 2001*. Indonesia. Pro.

20. Hill R.J., Cevik I.H. On-line simulation of voltage regulation in autotransformer-fed AC electric railroad traction networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 1993. Vol.: 42. Iss. 3. Publisher: IEEE.

21. Cheremisin V.T., Komyakov A.A. Modelirovaniye protsessov elektropotrebleniya v sisteme netyagovogo elektrosnabzheniya zheleznodorozhnogo transporta [Modeling the processes of power consumption in the non-traction power supply system of railway transport]. Omsk, 2017. 161 p.

22. Arzhannikov B.A., Sergeev B.S., Naboychenko I.O. Sistemy elektrosnabzheniya ustroystv STSB [Power supply systems for signaling devices]. Yekaterinburg: UrGUPS Publ., 2009. 101 p.

23. Herman L.A., Veksler M.I., Shelom I.A. Ustroystva i linii elektrosnabzheniya avtoblokirovki [Devices and power supply lines for automatic blocking]. Moscow: Transport Publ., 1987. 192 p.

24. German L.A., Kalinin A.L. Elektrosnabzheniye avtoblokirovki i elektricheskoy tsentralizatsii [Power supply of automatic blocking and electrical centralization]. Moscow: Transport Publ., 1974. 168 p.

25. Valiyakhmetova V.K., Nikolaev V.L., Vlasova V.A. Povysheniye nadezhnosti elektrosnabzheniya netyagovykh potrebiteley zheleznykh dorog [Improving the reliability of power supply to non-traction consumers of railways]. *Sovremennyye innovatsii v nauke, obrazovanii i tekhnike [Modern innovations in science, education and technology]*, 2018, pp. 27–29.

26. Doroshchuk D.V., Evdasev I.S. O parametricheskoy nadezhnosti sistem netyagovogo elektrosnabzheniya zheleznodorozhnogo transporta [On the parametric reliability of non-traction power supply systems for railway transport]. *Problemy bezopasnosti na transporte [Problems of safety in transport]*. Gomel, 2005, pp. 185–187.

27. Dyn'kin B.E., Lokhmanov V.V. Elektrosnabzheniye netyagovykh potrebiteley zheleznykh dorog s ispol'zovaniyem al'ternativnykh istochnikov energii [Power supply of non-traction consumers of railways using alternative energy sources]. *Transport: nauka, obrazovaniye, proizvodstvo [Transport: science, education, production]*, 2017, pp. 92–96.

28. Spunei E., Protea B., Piroi I., Navrapescu V., Piroi F. Use of Renewable Energy Sources to Power Railroad Traffic Safety Installations. 2019 11th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE). 2019 Publisher: IEEE.

29. Kosarev A.B., Serbinenko D.V. Sistema obespecheniya elektromagnitnoy sovместimosti ustroystv avtoblokirovki i svyazi s tyagovym elektrosnabzheniyem peremennogo toka [System for ensuring electromagnetic compatibility of self-locking devices and communication with AC traction power supply]. *Vestn. Nauch.-issled. in-ta zh.-d. transp. [Bulletin of the Scientific Research Institute of Railway Transport]*, 2011, No. 6, pp. 17–22.

30. Kosarev A.B., Serbinenko D.V., Yurkov A.Yu. Elektricheskoye vliyaniye sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya s vysokovol'tnym pitayushchim provodom na vozdushnyye linii elektropperedach [Electrical influence of a traction power supply system with a high-voltage supply wire on overhead power lines]. *Transport: nauka, tekhnika, upravleniye [Transport: science, technology, management]*, 2013, No. 9, pp. 21–24.

31. Golovnev G.E. Povysheniye energeticheskoy effektivnosti raboty sistemy elektrosnabzheniya netyagovykh potrebiteley [Increasing the energy efficiency of the power supply system for non-traction consumers]. *Innovatsionnyye proyekty i tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte [Innovative projects and technologies in education, industry and transport]*. Omsk, 2016, pp. 80–84.

32. Kulikova E.A., Bebris A.N. Innovatsionnoye oborudovaniye dlya povysheniya energoeffektivnosti sistem elektrosnabzheniya netyagovykh potrebiteley [Innovative equipment for improving the energy efficiency of power supply systems for non-traction consumers]. *Sovremennyye nauchnyye issledovaniya: aktual'nyye voprosy, dostizheniya i innovatsii [Modern scientific research: topical issues, achievements and innovations]*, 2017, pp. 18–23.

33. Mitrofanov A.N., Garanin M.A., Dobrynin E.V. Upravleniye tekhnologiyami elektropotrebleniya i energosberezheniya [Management of technologies of power consumption and energy saving]. Samara, 2009, 150 p.

34. Nikiforov M.M., Norkin I.Yu. Povysheniye tekhniko-ekonomicheskikh pokazateley sistemy netyagovogo elektrosnabzheniya pri vnedrenii ASKUE roznichnykh rynkov elektroenergii [Improving the technical and economic indicators of the non-traction power supply system with the introduction of an automated system for monitoring and metering electricity in retail energy markets]. *Transport Urala [Transport of the Urals]*, 2009, No. 2 (21), pp. 97–99.

35. Erkebaev A.Zh. Analiz metodov otsenki effektivnosti ispol'zovaniya elektroenergii na netyagovykh nuzhdy zheleznodorozhnogo transporta [Analysis of methods for assessing the efficiency of electricity use for non-traction needs of railway transport]. *Razrabotka i ekspluatatsiya elektrotekhnicheskikh kompleksov i sistem energetiki i nazemnogo transporta [Development and operation of electrical complexes and systems of energy and land transport]*. Omsk, 2018, pp. 59–66.

36. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Slozhno Nesimmetrichnyye rezhimy elektricheskikh sistem [Complexly asymmetric modes of electrical systems]. Irkutsk, 2005, 273 p.

37. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Lyubchenko I.A., Cherepanov A.V. Uluchsheniye kachestva elektroenergii v sistemakh elektrosnabzheniya netyagovykh potrebiteley zheleznykh dorog [Improving the quality of electricity in power supply systems for non-traction consumers of railways]. Moscow; Berlin: Direct-Media, 2020. 183 p.

38. Voropa N.I. Ot plana GOELRO k global'nomu elektroenergeticheskomu internetu [From the Russian state electrification plan to the global electric power Internet]. *Elektrichestvo* [Electricity], 2020, No. 12, pp. 10–13.

Информация об авторах

Крюков Андрей Васильевич – д-р техн. наук, профессор, Иркутский государственный университет путей сообщения; Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, e-mail: and_kryukov@mail.ru.

Любченко Ирина Алексеевна – аспирант, Иркутский государственный университет путей сообщения, e-mail: lubchenco.i@yandex.ru.

Information about the authors

Andrei V. Kryukov – Doctor of Engineering Science, Prof., Irkutsk State Transport University; Irkutsk National Research Technical University, e-mail: and_kryukov@mail.ru.

Irina A. Lyubchenko – postgraduate student, Irkutsk State Transport University, e-mail: lubchenco.i@yandex.ru.