

## Применение энергоустройств для повышения надежности электроснабжения нетяговых потребителей

Ю.Н. Булатов<sup>1а</sup>, А.В. Крюков<sup>2,3б</sup>, А.Е. Крюков<sup>2с</sup>

<sup>1</sup> Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия

<sup>2</sup> Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского, 15, Иркутск, Россия

<sup>3</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, Иркутск, Россия

<sup>а</sup> bulatovyura@yandex.ru, <sup>б</sup> and\_kryukov@mail.ru, <sup>с</sup> appleforevor@gmail.com

<sup>а</sup> <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>, <sup>б</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>, <sup>с</sup> <https://orcid.org/0000-0003-3272-5738>

Статья поступила 30.10.2020, принята 11.11.2020

*Цель представленных в статье исследований состоит в определении эффективности применения энергетических устройств в системах электроснабжения железных дорог для повышения бесперебойности электроснабжения нетяговых потребителей, уменьшения несимметрии и несинусоидальности, а также снижения провалов напряжений в аварийных режимах. Исследования проводились путем компьютерного моделирования с помощью программной системы Matlab на основе разработанных моделей систем электроснабжения, оснащенных энергоустройством с накопителями энергии. Полученные результаты показали, что в типовых схемах систем электроснабжения линейных потребителей при коротких замыканиях в питающей сети возникают провалы напряжения, глубина которых достигает 100 %. Использование в таких схемах накопителей электроэнергии, подключаемых через инвертор на стороне 0,4 кВ, позволяет уменьшить провал напряжения в среднем до 60 %. Однако при этом наблюдается подпитка места повреждения током от накопителя. Энергоустройство позволяет уменьшить провал напряжения до 20 % при коротких замыканиях в питающей линии 10 кВ и контактной сети 25 кВ за счет выпрямителей, инверторов и LC-фильтров. Применение энергоустройства и подключаемого на шины постоянного тока накопителя энергии позволяет поддерживать напряжение на зажимах потребителей вблизи номинального значения в обозначенных выше аварийных режимах; при этом заметно ограничивается подпитка места замыкания от накопителя. Кроме того, на основе энергоустройства обеспечивается нормативное качество электроэнергии по отклонениям напряжений, несимметрии и гармоническим искажениям на шинах 0,4 кВ подстанции, питающей нетяговый потребитель. Таким образом, энергоустройство, выполненный на базе твердотельного трансформатора с двойным активным мостом и оборудованный накопителем энергии, может использоваться для формирования систем электроснабжения, обеспечивающих бесперебойное электроснабжение нетяговых потребителей. На этой основе возможно устранить несимметрию, гармонические искажения и провалы напряжения.*

**Ключевые слова:** системы электроснабжения железных дорог; нетяговые потребители; энергоустройства; надежность электроснабжения.

## The use of energy routers to improve the reliability of power supply to non-traction consumers

Yu.N. Bulatov<sup>1а</sup>, A.V. Kryukov<sup>2,3б</sup>, A.E. Kryukov<sup>2с</sup>

<sup>1</sup> Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

<sup>2</sup> Irkutsk State Transport University; 15, Chernyshevsky St., Irkutsk, Russia

<sup>3</sup> Irkutsk National Research Technical University; 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia

<sup>а</sup> bulatovyura@yandex.ru, <sup>б</sup> and\_kryukov@mail.ru, <sup>с</sup> appleforevor@gmail.com

<sup>а</sup> <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>, <sup>б</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>, <sup>с</sup> <https://orcid.org/0000-0003-3272-5738>

Received 30.10.2020, accepted, 11.11.2020

*The purpose of the studies presented in the article is to determine the effectiveness of the use of energy routers in power supply systems for railways to increase the uninterrupted power supply of non-traction consumers, reduce asymmetry and nonsinusoidality, and reduce voltage dips in emergency modes. The research is carried out by means of computer modeling using the Matlab software system based on the developed models of power supply systems equipped with energy routers with energy storage. The results obtained show that in typical circuits of power supply systems for linear consumers during short circuits in the supply network, voltage dips occur, the depth of which reaches 100%. The use of energy storage devices in such circuits, connected through an inverter on the 0.4 kV side, makes it possible to reduce the voltage drop by an average of 60%. However, in this case, the place of damage is fed with current from the drive. The energy router allows to reduce the voltage drop up to 20% during short circuits in the 10 kV supply line and 25 kV overhead line due to rectifiers, inverters and LC filters. The use of a power router and an energy storage device connected to the DC buses allows maintaining the voltage at the terminals of consumers close to the nominal value in the above emergency modes; in this case, the supply of the short circuit from the drive is noticeably limited. In addition, on the basis of the energy router, the standard power quality is ensured for voltage deviations, unbalance and harmonic distortions on the 0.4 kV buses of the substation supplying the non-traction consumer. Thus, an energy router based on a solid-state transformer with a double active bridge and equipped with an energy storage*

device can be used to form power supply systems that provide uninterrupted power supply to non-traction consumers. On this basis, it is possible to eliminate unbalance, harmonic distortion and voltage dips.

**Keywords:** railroad power supply systems; non-traction consumers; power routers; power supply reliability.

**Введение.** В современных условиях к системам электроснабжения (СЭС) предъявляются повышенные требования по эффективности, качеству электроэнергии и надежности энергообеспечения потребителей. Выполнить эти требования возможно на основе модернизации СЭС с использованием технологий интеллектуальных электросетей *smart grid* [1–5]. Сети *smart grid* позволяют реализовать СЭС нового поколения, отличающиеся от существующих следующими особенностями:

- 1) бесперебойное и гарантированное обеспечение потребителей электроэнергией (ЭЭ) высокого качества;
- 2) гибкое взаимодействие сегментов СЭС за счет применения активных устройств и интеллектуальных средств управления;
- 3) наличие интерфейсов, обеспечивающих подключение накопителей ЭЭ и установок распределенной генерации (РГ), использующих, в частности, возобновляемые источники.

Перспективное направление, позволяющее реализовать перечисленные свойства, состоит в применении энергетических роутеров (ЭР) [6–24], центральной частью которых являются твердотельные трансформаторы [7; 8]. Энергорouter можно отнести к классу киберфизических систем, обеспечивающих управление энергопотоками, обмен информацией между активными устройствами и электроприемниками, интеграцию в СЭС накопителей энергии (НЭ) и установок РГ. Наиболее значимый эффект от внедрения ЭР, оснащенных НЭ, состоит в существенном повышении надежности электроснабжения в аварийных и послеаварийных режимах СЭС. Кроме того, необходимо отметить возможности ЭР по улучшению качества электроэнергии, что особенно актуально для СЭС железнодорожного транспорта.

На трассах железных дорог располагаются транспортные объекты, которые по степени бесперебойности

электроснабжения относятся к особой группе и предъявляют повышенные требования к бесперебойности электроснабжения и качеству поставляемой электроэнергии [25]. К таким потребителям относятся объекты телекоммуникации, а также сигнализации, централизации и автоблокировки (СЦБ). От надежного функционирования таких объектов зависит безопасность движения поездов.

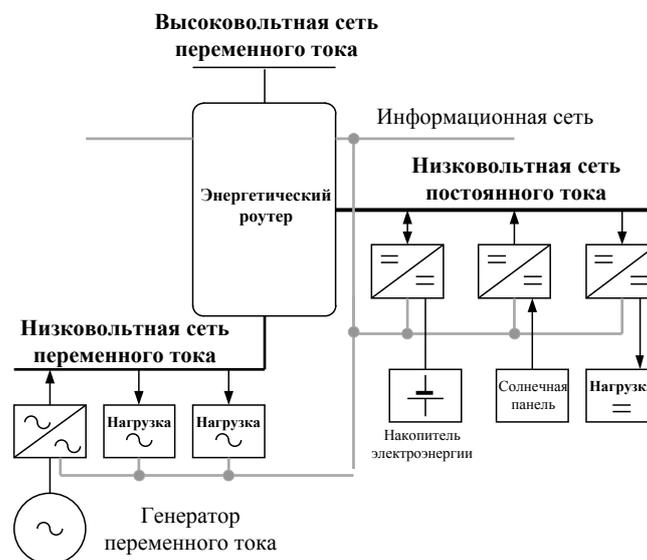
Ниже представлены результаты моделирования режимов СЭС, предназначенной для электроснабжения перечисленных объектов и подключенной к сети энергоснабжающей организации (ЭСО) через ЭР.

**Структура энергорouterа.** Центральным звеном энергорouterа, который подключается к сетям среднего напряжения 6–10 кВ и может использоваться в СЭС объектов телекоммуникаций или СЦБ, является твердотельный трансформатор (SST) (рис. 1). Данное устройство обычно изготавливается в моноблочном исполнении и включает в свой состав следующие сегменты:

- высокочастотный силовой трансформатор;
- два активных моста, выполненных на элементах силовой электроники.

За счет наличия шин постоянного тока и преобразования напряжений на высокой частоте достигаются следующие положительные результаты:

- значительно уменьшаются размеры и вес силового трансформатора;
- появляется возможность подключения электроприемников постоянного и переменного тока, а также накопителей в виде аккумуляторных батарей;
- формируется интерфейс для присоединения установок РГ, реализованных на базе синхронных и асинхронных машин, генераторов постоянного тока, фотоэлектрических панелей, топливных ячеек.



a)

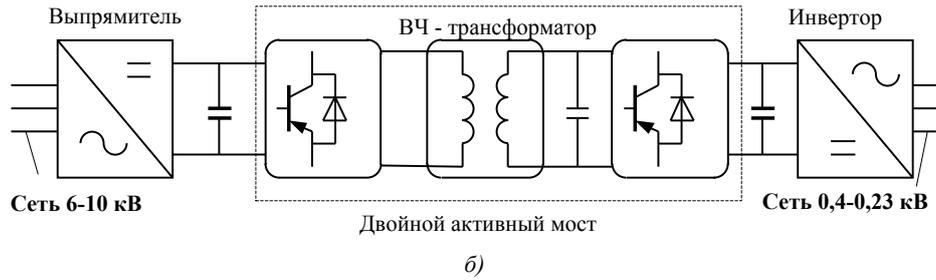


Рис. 1. Энергетический роутер: а — схема СЭС с энергетическим роутером; б — схема роутера, построенного на основе твердотельного трансформатора

**Результаты моделирования.** Для оценки эффективности применения энергорутеров для организации высоконадежного электроснабжения линейных потребителей особой группы, к которым относятся объекты телекоммуникаций, а также СЦБ, было выполнено моделирование нормальных и аварийных режимов. Изучаемая система электроснабжения (рис. 2) включала тяговую подстанцию, фрагменты контактной сети, ли-

нию электропередачи 10 кВ, смонтированную на отдельных опорах, к которой через трансформатор 10/0,4 кВ был подключен линейный потребитель, относящийся по надежности электроснабжения к особой группе первой категории. Моделирование выполнялось с помощью пакетов Simulink и SimPowerSystems системы Matlab. Схемы разработанных компьютерных моделей представлены на рис. 3 и 4.

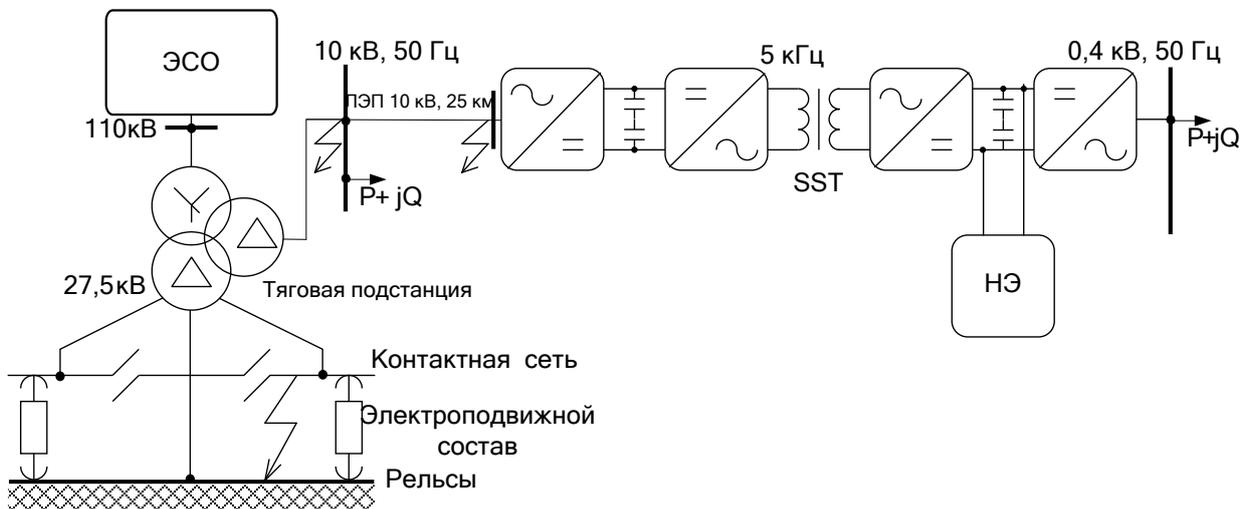


Рис. 2. Схема электроснабжения линейного потребителя через энергорутер

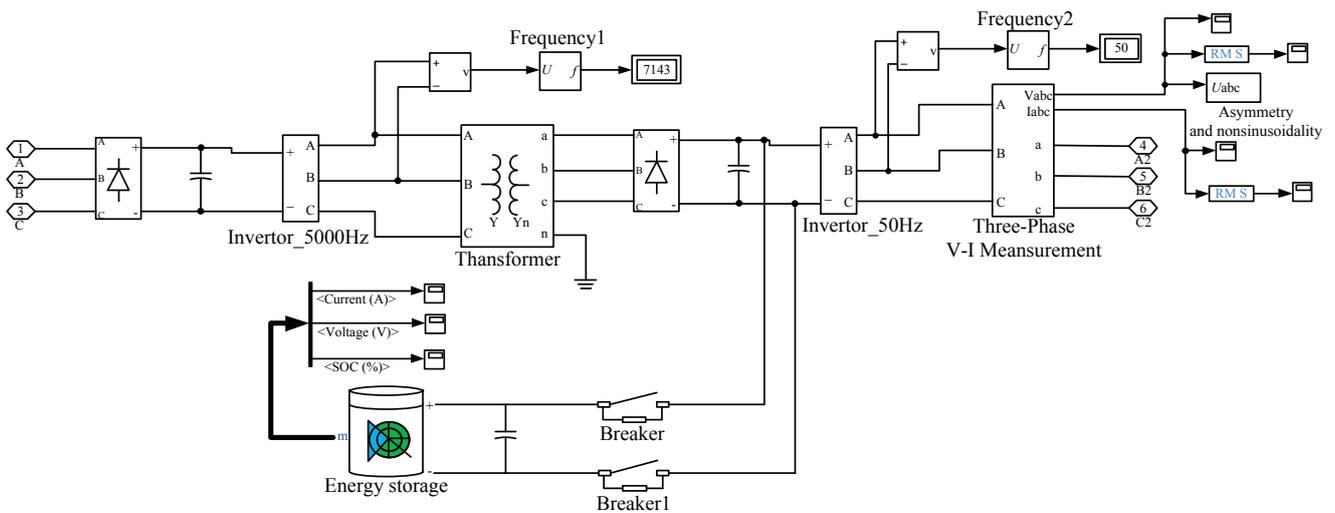


Рис. 3. Схема модели ЭР, оснащенного накопителем энергии

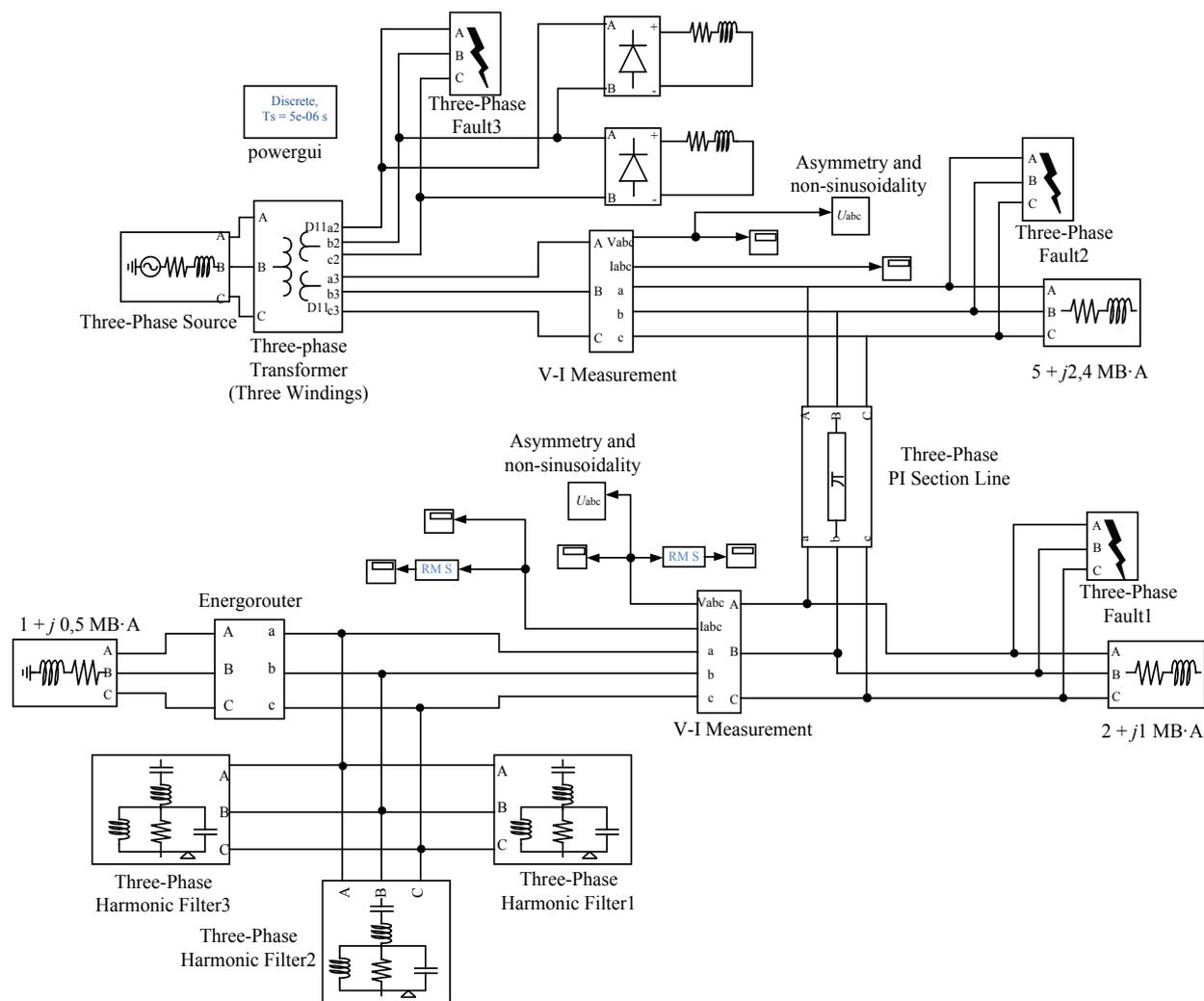


Рис. 4. Схема модели СЭС с ЭР

При моделировании энергорouterа использовался высокочастотный трансформатор 10/0,4 кВ мощностью 3 000 кВ·А. Нагрузка потребителей на шинах 0,4 кВ составляла  $1 + j0,5$  МВА. При моделировании сравнивались показатели качества электроэнергии в СЭС при использовании энергорouterа и типового силового трансформатора одинаковой мощности.

В результате моделирования было выявлено, что при включении энергорouterа без фильтра высших гармоник со стороны высокого напряжения наблюдаются значительные гармонические искажения в сети 10 кВ по сравнению с ситуацией, в которой рассматривал-

ся типовой трансформатор: коэффициенты гармоник напряжения увеличиваются примерно в 3...4 раза. Это объясняется тем, что энергорouter, оснащенный сложной силовой электроникой, генерирует в сеть дополнительные нечетные гармоники. Применение пассивного фильтра (блоки Three Phase Harmonic Filter на рис. 4) на стороне 10 кВ позволяет не пропускать эти гармоники в сеть. Результаты измерения показателей качества электроэнергии (ПКЭ) на шинах 10 кВ ТП, приемном конце линии 10 кВ и на шинах 0,4 кВ потребителя представлены в табл. 1, а соответствующие временные зависимости напряжений — на рис. 5 и 6.

Таблица 1.

Способ подключения потребителей СЦБ	Место измерения ПКЭ	Коэффициенты гармоник напряжения, %			Коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности, %
		$k_{Ua}$	$k_{Ub}$	$k_{Uc}$	
Через обычный силовой трансформатор	Шины 10 кВ ТП	6,9	7,2	5,2	5,2
	После ЛЭП 25 км 10 кВ	5,9	6,1	4,3	5,2
	На шинах 0,4 кВ	5,4	5,5	4,01	5,2
Через ЭР с фильтром гармоник	Шины 10 кВ ТП	6,6	6,6	4,5	5,3
	После ЛЭП 25 км 10 кВ	3,3	6,8	5,4	5,5
	На шинах 0,4 кВ	0,2	0,2	0,2	0,03

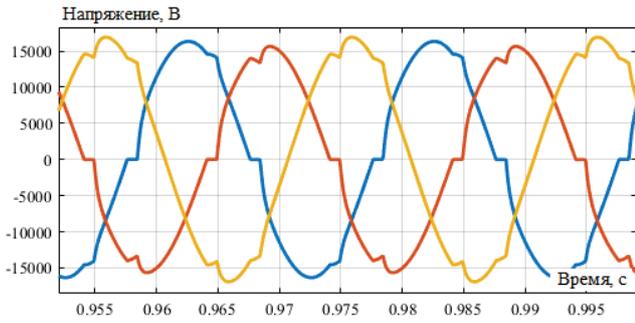
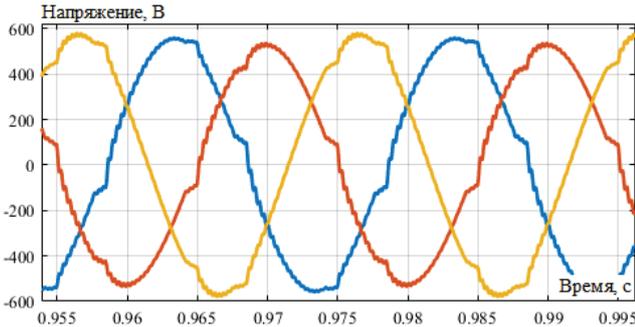
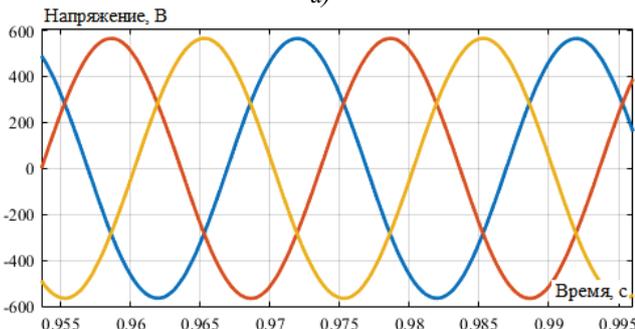


Рис. 5. Временные зависимости напряжений на шинах 10 кВ ТП



а)



б)

Рис. 6. Временные зависимости напряжений на шинах 0,4 кВ: а — типовой трансформатор; б — энергоустройство

Результаты компьютерного моделирования позволили сделать следующие выводы:

- для исключения понижения качества электроэнергии в питающей сети по критерию синусоидальности кривых напряжения и тока при использовании энергоустройства необходимо применять фильтры гармоник;
- применение энергоустройства позволяет решить проблему низкого качества электроэнергии в сети потребителей 0,4 кВ, полностью устраняя несимметрию напряжений и гармонические искажения.

С помощью энергоустройства можно подключать в сеть постоянного тока накопители электроэнергии без использования дополнительного оборудования. В экспериментах применялась модель НЭ, работающего на базе литий-ионных аккумуляторов, с системой управления, отслеживающей напряжение у потребителей с целью подключения НЭ при его снижении и отключения в случае превышения установленного значения.

Ниже представлены результаты моделирования аварийных режимов, вызванных трехфазными короткими замыканиями (КЗ) на шинах 10 кВ ТП, приемном конце

линии 10 кВ и замыканием контактного провода на рельс в сети 25 кВ. Исследовались провалы напряжения у потребителей 0,4 кВ для следующих ситуаций:

- 1) типовая СЭС без накопителя энергии;
- 2) типовая СЭС с НЭ;
- 3) СЭС с энергоустройством без НЭ;
- 4) СЭС с энергоустройством и НЭ.

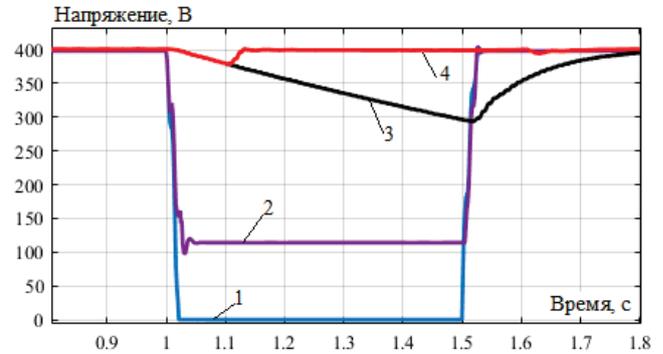


Рис. 7. Временные зависимости действующих значений напряжений на шинах 0,4 кВ при трехфазном КЗ на приемном конце линии 10 кВ длиной 25 км: 1 — типовой трансформатор без НЭ; 2 — типовой трансформатор с НЭ; 3 — энергоустройство без НЭ; 4 — энергоустройство с НЭ

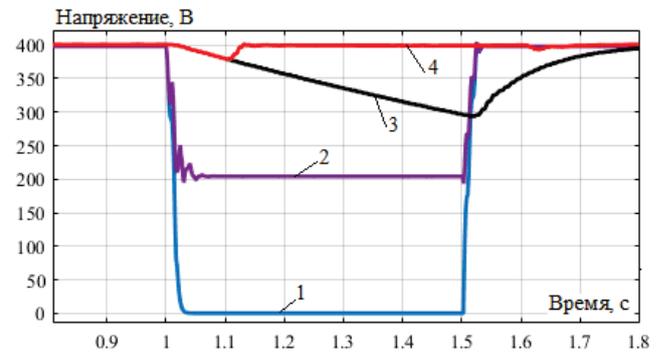


Рис. 8. Временные зависимости действующих значений напряжений на шинах 0,4 кВ при трехфазном КЗ на шинах 10 кВ ТП (цифровые обозначения аналогичны рис. 7)

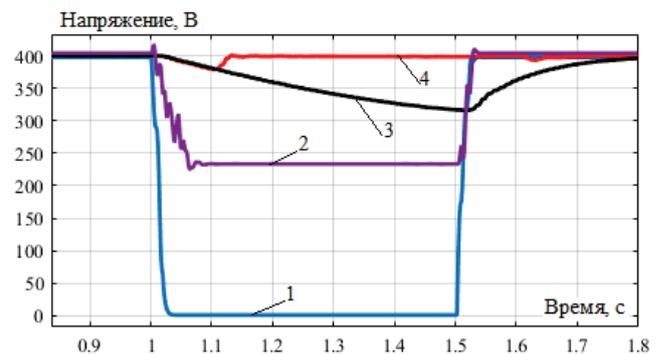


Рис. 9. Временные зависимости действующих значений напряжений на шинах 0,4 кВ при КЗ в контактной сети 25 кВ (цифровые обозначения аналогичны рис. 7)

Для ситуации 2 накопитель энергии подключался через инвертор на шины 0,4 кВ. Результаты моделирования представлены на рис. 7–9 в виде временных зависимостей напряжений на шинах 0,4 кВ нетягового потребителя (объекта телекоммуникаций или СЦБ).

Результаты моделирования аварийных режимов позволили сформулировать следующие выводы:

- в типовой СЭС, предназначенной для питания объектов телекоммуникаций или СЦБ, в рассмотренных аварийных режимах наблюдаются значительные провалы напряжений (рис. 7–9), глубина которых достигает 100 % от номинала;

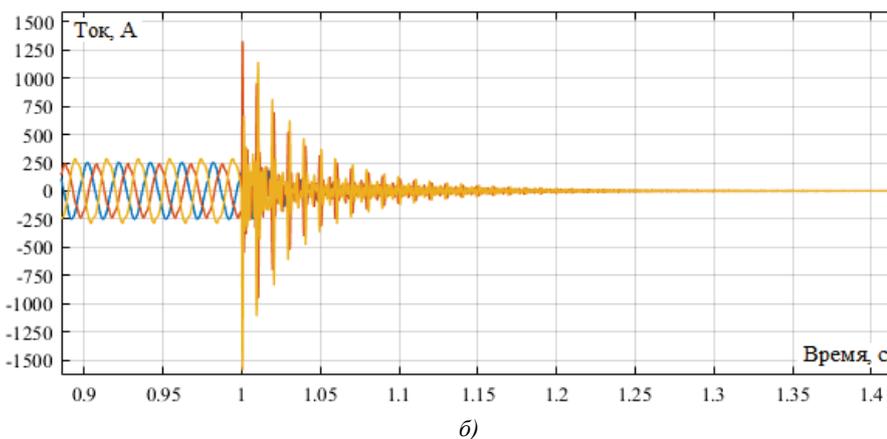
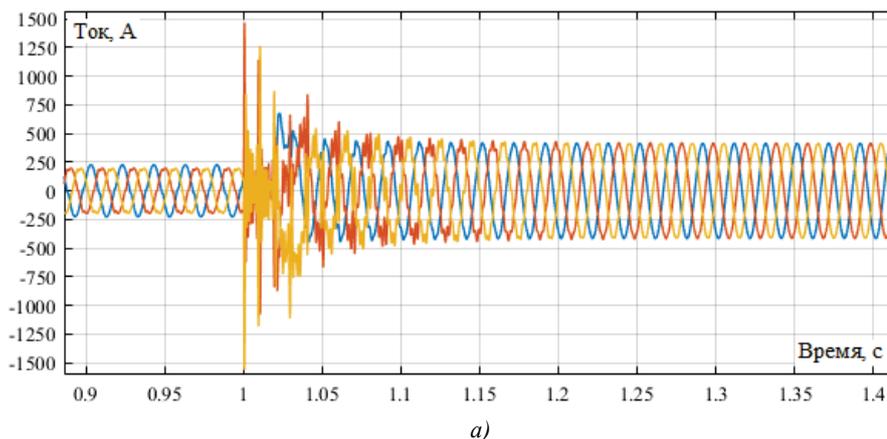
- использование накопителей электроэнергии, подключаемых через инвертор на стороне 0,4 кВ типовой СЭС, позволяет уменьшить провал напряжения в среднем до 60 % (рис. 7–9). Однако при этом наблюдается большая подпитка места повреждения током от НЭ. Соответствующие временные зависимости токов, протекающих на стороне 10 кВ питающего трансформатора, показаны на рис. 10, а.

- энергорутер позволяет уменьшить провал напряжения до 20 % от номинального значения из-за наличия выпрямителей, инверторов и LC-фильтров. Применение энергорутера и подключаемого на шины постоянного тока управляемого НЭ позволяет поддерживать напряжение вблизи номинального значения у потребителей во всех рассмотренных аварийных режимах; при этом существенно ограничивается подпитка места повреждения током от НЭ. Соответствующие временные зависимости токов, протекающих на стороне 10 кВ энергорутера, показаны на рис. 10, б.

**Заключение.** Энергорутер, построенный на основе SST с двойным активным мостом, может использоваться для формирования надежных систем электроснабжения ответственных нетяговых потребителей, к которым относятся объекты телекоммуникаций и СЦБ. Такой подход позволяет получить высокий ПКЭ на

#### Литература

1. Buchholz B.M., Styczynski Z. Smart Grids – Fundamentals and Technologies in Electricity Networks. Springer Heidelberg New York Dordrecht London, 2014. 396 p.
2. Wang J., Huang A.Q., Sung W., Liu Y., Baliga B.J. Smart Grid Technologies // IEEE Industrial Electronics Magazine. 2009. V. 3. № 2. P. 16–23.
3. Morzhin Yu.I., Shakaryan Yu.G., Kucherov Yu.N. Smart Grid Concept for Unified National Electrical Network of Russia // CD. Preprints of proceedings of IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe 2011, Manchester Dec. 5–7 2011. Manchester, GB: IEEE, The University of Manchester, 2011. Panel session 5D. P. 1–5.
4. Mohsen F.N., Amin M.S., Hashim H. Application of smart power grid in developing countries, IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), 2013. URL: 10.1109/PEOCO.2013.6564586.



**Рис. 10.** Токи, протекающие на стороне 10 кВ трансформатора при КЗ на приемном конце линии 10 кВ: а — использовался типовой трансформатор 10/0,4 кВ; б — использовался энергорутер

шинах 0,4 кВ подстанции потребителя по отклонениям напряжений, несимметрии ( $k_{2U} = 0,03 \%$ ) и гармоническим искажениям ( $k_U = 0,2 \%$ ). В аварийных режимах, вызванных короткими замыканиями на питающей ЛЭП или в контактной сети, система электроснабжения, оснащенная энергетическим роутером с накопителем энергии, позволяет обеспечить ликвидацию провалов напряжений на шинах 0,4 кВ.

Исследования выполнены при финансовой поддержке по гранту государственного задания Министерства науки и высшего образования России (проект № 0667-2020-0039).

5. Torriti J. Demand Side Management for the European Supergrid: Occupancy variances of European single-person households // Energy Policy. 2012. V. 44. P. 199–206.
6. Juneja A., Bhattacharya S. Energy router: Architectures and functionalities toward Energy Internet // 2011 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm). 2011. P. 31–36.
7. Shilpakala G., Bansode, Prasad M., Joshi. Solid state transformers: new approach and new opportunity // Proceedings of 11th IRF International Conference, 15th June-2014, Pune. India. P. 15–21.
8. Tiefu Zhao, Liyu Yang, Jun Wang, Huang A.Q. 270 kVA Solid State Transformer Based on 10 kV SiC Power Devices // Electric Ship Technologies Symposium, 2007. ESTS '07. IEEE. P. 145–149.
9. Xiaolin Mao, Sixifo Falcones, Ayyanar Raja. Energy-Based Control Design for a Solid State Transformer // Proc.

- FREEDM Annual Conference 2009, North Carolina State University, Raleigh, NC, 2009. P. 217–220.
10. Rathod D.K. Solid State Transformer (SST) «Review of Recent Developments» // *Advance in Electronic and Electric Engineering*. 2014. V. 4. № 1. P. 45–50.
  11. Alzola R.P., Gohil G.V., Mathe L., Liserre M., Blaabjerg F. Review of modular power converters solutions for smart transformer in distribution system. In *Proceedings of the IEEE Energy Conversion Congress and Exposition: ECCE 2013*. P. 380–387. IEEE Press. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. URL: 10.1109/ECCE.2013.6646726
  12. Kaixuan Wang, Xiaosheng Liu, Liang Zhao, Yan Zhou, Dianguo Xu. Research on Structure and Energy Management Strategy of Household Energy Router Based on Hybrid Energy Storage. 2019 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT). 2019. Publisher: IEEE. URL: 10.1109/ISGT.2019.8791644.
  13. Sarah Hambridge, Alex Q. Huang, Ruiyang Yu. Solid State Transformer (SST) as an energy router: Economic dispatch based energy routing strategy. 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). 2015. Publisher: IEEE. URL: 10.1109/ECCE.2015.7309991.
  14. Jianhua Zhang, Wenye Wang, Subhashish Bhattacharya. Architecture of solid state transformer-based energy router and models of energy traffic. 2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT). 2012. Publisher: IEEE. URL: 10.1109/ISGT.2012.6175637
  15. Yuchao Qin, Haochen Hua, Junwei Cao. Short-Term Energy Cache Regulation for Energy Router: A Robust H-Infinity Approach. 2019 IEEE International Conference on Energy Internet (ICEI). 2019. Publisher: IEEE. URL: 10.1109/ICEI.2019.00035.
  16. Youjie Ma, Xuyan Wang, Xuesong Zhou, Zhiqiang Gao. An overview of energy routers. 2017 29th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). 2017. Publisher: IEEE. URL: 10.1109/CCDC.2017.7979219.
  17. Bin Liu, Weihai Wu, Chunxiao Zhou, Chengxiong Mao, Dan Wang, Qing Duan, Guanglin Sha. An AC-DC Hybrid Multi-Port Energy Router With Coordinated Control and Energy Management Strategies. IEEE Access. 2019. V. 7. Publisher: IEEE. URL: 10.1109/ACCESS.2019.2933469.
  18. Runze Wu, Bixiao Wang, Yingjie Zou, Bing Fan, Li Li, Zhengjia Zhu. Energy router interface model based on bidirectional flow control for intelligent park. IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. 2017. Publisher: IEEE. URL: 10.1109/IECON.2017.8217362.
  19. Xinyang Han, Fang Yang, Cuifen Bai, Guanglong Xie, Guang Ren, Haochen Hua, Junwei Cao. An Open Energy Routing Network for Low-Voltage Distribution Power Grid. 2017 IEEE International Conference on Energy Internet (ICEI). 2017. Publisher: IEEE. URL: 10.1109/ICEI.2017.63.
  20. Соснина Е.Н., Шалухо А.В., Шумский Н.В., Ковтун С.А. Разработка энергоустройства – базового элемента «энергетического интернета» // *Наука. Мысль*. 2017. Т. 7. № 5. С. 22–27.
  21. Соснина Е.Н., Шумский Н.В., Шрамко П.А. Обучение распределенной системы управления энергоустройства на базе нейронной сети // *Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы XII Всерос. науч.-технической конф.* (5 июня 2020 г.). Чебоксары, 2020. С. 328–330.
  22. Малышева Н.Н., Третьяков Е.А. Моделирование группового управления напряжением с источниками активной и реактивной мощности в электрических сетях // *Вестн. Пермского нац. исследовательского политехнического ун-та. Электротехника, информационные технологии, системы управления*. 2019. № 31. С. 22–34.
  23. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Арсентьев Г.О. Распределенная генерация и энергетические роутеры в системах электроснабжения железных дорог. М.; Берлин: Директ-Медиа, 2020. 171 с.
  24. Bulatov Yuri N., Kryukov Andrey V., Arsentiev Grigory O. Use of Power Routers and Renewable Energy Resources in Smart Power Supply Systems // *2018 International Ural Conference on Green Energy (UralCon)*. P. 143–148.
  25. Крюков А.В., Закарюкин В.П. Электроснабжение и электропитание нетяговых потребителей железнодорожного транспорта. М.; Берлин: Директ-Медиа, 2020. 293 с.

#### References

1. Buchholz B.M., Styczynski Z. *Smart Grids – Fundamentals and Technologies in Electricity Networks*. Springer Heidelberg New York Dordrecht London, 2014. 396 p.
2. Wang J., Huang A.Q., Sung W., Liu Y., Baliga B.J. *Smart Grid Technologies* // *IEEE Industrial Electronics Magazine*. 2009. V. 3. № 2. P. 16–23.
3. Morzhin Yu.I., Shakaryan Yu.G., Kucherov Yu.N. Smart Grid Concept for Unified National Electrical Network of Russia // *CD. Preprints of proceedings of IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe 2011, Manchester Dec. 5–7 2011*. Manchester, GB: IEEE, The University of Manchester, 2011. Panel session 5D. P. 1–5.
4. Mohsen F.N., Amin M.S., Hashim H. Application of smart power grid in developing countries, IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), 2013. URL: 10.1109/PEOCO.2013.6564586.
5. Torriti J. Demand Side Management for the European Supergrid: Occupancy variances of European single-person households // *Energy Policy*. 2012. V. 44. P. 199–206.
6. Juneja A., Bhattacharya S. Energy router: Architectures and functionalities toward Energy Internet // *2011 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (Smart-GridComm)*. 2011. P. 31–36.
7. Shilpakala G. Bansode, Prasad M. Joshi. Solid state transformers: new approach and new opportunity // *Proceedings of 11th IRF International Conference, 15th June-2014, Pune, India*. P. 15–21.
8. Tiefert Zhao, Liyu Yang, Jun Wang, Huang A.Q. 270 kVA Solid State Transformer Based on 10 kV SiC Power Devices // *Electric Ship Technologies Symposium, 2007. ESTS '07*. IEEE. P. 145–149.
9. Xiaolin Mao, Sixifo Falcones, Ayyanar Raja. Energy-Based Control Design for a Solid State Transformer // *Proc. FREEDM Annual Conference 2009, North Carolina State University, Raleigh, NC, 2009*. P. 217–220.
10. Rathod D.K. Solid State Transformer (SST) «Review of Recent Developments» // *Advance in Electronic and Electric Engineering*. 2014. V. 4. № 1. P. 45–50.
11. Alzola R.P., Gohil G.V., Mathe L., Liserre M., Blaabjerg F. Review of modular power converters solutions for smart transformer in distribution system. In *Proceedings of the IEEE Energy Conversion Congress and Exposition: ECCE 2013*. P. 380–387. IEEE Press. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. URL: 10.1109/ECCE.2013.6646726
12. Kaixuan Wang, Xiaosheng Liu, Liang Zhao, Yan Zhou, Dianguo Xu. Research on Structure and Energy Management Strategy of Household Energy Router Based on Hybrid Energy Storage. 2019 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT). 2019. Publisher: IEEE. URL: 10.1109/ISGT.2019.8791644.
13. Sarah Hambridge, Alex Q. Huang, Ruiyang Yu. Solid State Transformer (SST) as an energy router: Economic dispatch based energy routing strategy. 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). 2015. Publisher: IEEE. URL: 10.1109/ECCE.2015.7309991.

14. Jianhua Zhang, Wenye Wang, Subhashish Bhattacharya. Architecture of solid state transformer-based energy router and models of energy traffic. 2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT). 2012. Publisher: IEEE. URL: 10.1109/ISGT.2012.6175637
15. Yuchao Qin, Haochen Hua, Junwei Cao. Short-Term Energy Cache Regulation for Energy Router: A Robust H-Infinity Approach. 2019 IEEE International Conference on Energy Internet (ICEI). 2019. Publisher: IEEE. URL: 10.1109/ICEI.2019.00035.
16. Youjie Ma, Xuyan Wang, Xuesong Zhou, Zhiqiang Gao. An overview of energy routers. 2017 29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC). 2017. Publisher: IEEE. URL: 10.1109/CCDC.2017.7979219.
17. Bin Liu, Weihang Wu, Chunxiao Zhou, Chengxiong Mao, Dan Wang, Qing Duan, Guanglin Sha. An AC-DC Hybrid Multi-Port Energy Router With Coordinated Control and Energy Management Strategies. IEEE Access. 2019. V. 7. Publisher: IEEE. URL: 10.1109/ACCESS.2019.2933469.
18. Runze Wu, Bixiao Wang, Yingjie Zou, Bing Fan, Li Li, Zhengjia Zhu. Energy router interface model based on bidirectional flow control for intelligent park. IECON 2017 – 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. 2017. Publisher: IEEE. URL: 10.1109/IECON.2017.8217362.
19. Xinyang Han, Fang Yang, Cuifen Bai, Guanglong Xie, Guang Ren, Haochen Hua, Junwei Cao. An Open Energy Routing Network for Low-Voltage Distribution Power Grid. 2017 IEEE International Conference on Energy Internet (ICEI). 2017. Publisher: IEEE. URL: 10.1109/ICEI.2017.63.
20. Sosnina E.N., SHaluhu A.V., SHumskij N.V., Kovtun S.A. Development of an energy router – the basic element of the "Energy Internet" // Nauka. Mysl' (Scientific e-journal) . 2017. V .7. № 5. P. 22–27.
21. Sosnina E.N., SHumskij N.V., SHramko P.A. Teaching a distributed control system of an energy router based on a neural network // Informacionnye tekhnologii v elektrotekhnike i elektroenergetike: materialy XII Vseros. nauch.-tehnicheskoy konf. (5 iyunya 2020 g.). Cheboksary, 2020. P. 328–330.
22. Malysheva N.N., Tret'yakov E.A. Modeling of group voltage control with sources of active and reactive power in electrical networks // PNRPU Bulletin. Electrotechnics, Informational Technologies, Control Systems. 2019. № 31. P. 22–34.
23. Bulatov YU.N., Kryukov A.V., Arsent'ev G.O. Distributed generation and energy routers in railway power supply systems. M.; Berlin: Direkt-Media, 2020. 171 p.
24. Bulatov Yuri N., Kryukov Andrey V., Arsentiev Grigory O. Use of Power Routers and Renewable Energy Resources in Smart Power Supply Systems // 2018 International Ural Conference on Green Energy (UralCon). P. 143–148.
25. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P. Power supply and power supply to non-traction consumers of railway transport. M.; Berlin: Direkt-Media, 2020. 293 p.