

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 621.311, 621.331

DOI:10.18324/2077-5415-2020-3-43-49

## Распределенная генерация в системах электроснабжения железнодорожного транспорта

Ю.Н. Булатов<sup>1a</sup>, А.В. Крюков<sup>2,3b</sup>, А.В. Черепанов<sup>2c</sup>, Нгуен Ван Хуан<sup>3d</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>a</sup> bulatovyura@yandex.ru, <sup>b</sup> and\_kryukov@mail.ru, <sup>c</sup> smart\_grid@mail.ru, <sup>d</sup> huanco.k7a@gmail.com<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>,<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0002-7712-9537>, <sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0002-7321-3969>

Статья поступила 25.05.2020, принята 08.09.2020

Цель представленных в статье исследований состоит в определении энергетической эффективности применения генерирующих установок в системах электроснабжения железнодорожного транспорта (СЭЖТ). Исследования проводились на основе моделирования режимов СЭЖТ в программном комплексе Fazonord. Расчетная модель реализована для СЭЖТ двухпутного участка с четырьмя тяговыми подстанциями (ТП). К шинам 10 кВ двух ТП были подключены установки РГ мощностью 20 МВт, реализованные на основе реконструкции производственных котельных в теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) с синхронными турбогенераторами. Электроснабжение ТП осуществлялось по магистральной линии электропередачи напряжением 220 кВ с двухсторонним питанием от узловых подстанций электроэнергетической системы. Общая протяженность ЛЭП 220 кВ составляла 200 км. Полученные результаты показали, что на основе установок РГ могут быть получены следующие положительные результаты: снижение затрат на энергообеспечение за счет более низкой себестоимости электроэнергии, вырабатываемой на собственных ТЭЦ, по сравнению с тарифами энергоснабжающей организации; уменьшение потерь мощности на головных участках питающих ЛЭП в среднем на 53...58%, в тяговых трансформаторах — на 18...32%. Использование автоматических регуляторов возбуждения генераторов ТЭЦ, обеспечивающих поддержание неизменных уровней напряжения на шинах 10 кВ ТП, позволяет увеличить эффект снижения потерь в ЛЭП до 80%, а также стабилизировать напряжения на токоприемниках электропоездов; при этом размах колебаний этих напряжений снижается примерно на 25%.

**Ключевые слова:** системы электроснабжения железных дорог; установки распределенной генерации; энергоэффективность.

## Distributed generation in railway power supply systems

Yu.N. Bulatov<sup>1a</sup>, A.V. Kryukov<sup>2,3b</sup>, A.V. Cherepanov<sup>2c</sup>, Nguen Van Huan<sup>3d</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>a</sup> bulatovyura@yandex.ru, <sup>b</sup> and\_kryukov@mail.ru, <sup>c</sup> smart\_grid@mail.ru, <sup>d</sup> huanco.k7a@gmail.com<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>,<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0002-7712-9537>, <sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0002-7321-3969>

Received 25.05.2020, accepted 08.09.2020

The purpose of the research presented in the article is to determine the energy efficiency of the use of distributed generation (DG) plants in railway power supply systems (RPSS). The studies were carried out using the Fazonord software package designed to simulate the modes of RPSS in phase coordinates. The calculation model is implemented for the RPSS double-track section with four traction substations (TS). DG plants with a capacity of 20 MW connected to the reconstruction of production boilers in heat and power plants (HPP) with synchronous turbogenerators were connected to 10 kV buses of two transformer substations. TS power supply was carried out from the 220 kV main transmission line with two-way power supply from the junction substations of the electric power system. The total length of 220 kV transmission lines was 200 km. The results have shown that on the basis of the DG plants the following positive results can be obtained: reduction in energy supply costs due to the lower cost of electricity generated at own RPSS in comparison with the tariffs of the energy supplying organization; reduction of power losses at the head sections of power lines on average by 53...58%, in traction transformers by 18...32%. The use of automatic excitation regulators of HPP generators that maintain constant voltage levels on 10 kV TP buses allows increasing the effect of reducing power line losses by up to 80%, as well as stabilizing voltages on current collectors of electric locomotives while the amplitude of these stresses decreases by about 25%.

**Keywords:** railroad power supply systems; distributed generation plants; energy efficiency.

**Введение.** Повышение эффективности перевозок грузов и пассажиров по сети железных дорог РФ невозможно обеспечить без реализации надежного энергообеспечения [1]. Для решения этой актуальной задачи возможно использовать технологии интеллектуальных электрических сетей (*smart grid*) [2–7], позволяющие повысить бесперебойность электроснабжения ответственных объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта и кардинально улучшить качество электроэнергии. Главная особенность этих технологий состоит в масштабном применении активных элементов, воздействующих на режимы систем электроснабжения (СЭС). В настоящее время разработан большой набор активных устройств *smart grid* [8–20]. Один из важных сегментов этого набора образуют установки распределенной генерации (РГ), которые могут быть реализованы на базе различных энергоисточников, включая нетрадиционные, использующие возобновляемые энергоресурсы.

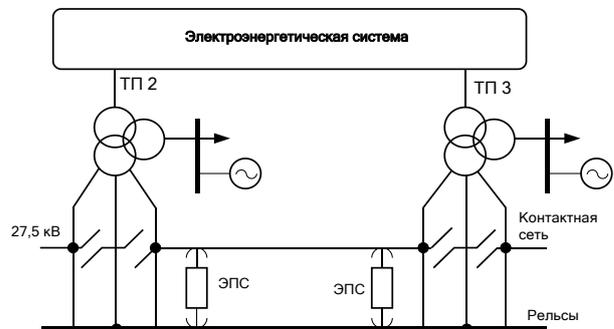
Наличие установок распределенной (собственной) генерации позволяет заметно снизить потребление электроэнергии (ЭЭ) из электроэнергетических систем. В условиях роста тарифов на ЭЭ этот фактор позволяет снизить затраты на энергообеспечение. За счет установок РГ повышается надежность электроснабжения устройств автоблокировки, что обеспечивает повышение безопасности движения поездов. Установки РГ, реализованные на базе производственных котельных, позволяют отказаться от дорогостоящего резервирования устройств железнодорожной автоматики и телемеханики с помощью дизельных электроагрегатов.

В настоящее время особое внимание уделяется вопросам цифровизации транспортной электроэнергетики. В этих условиях внедрению технологий *smart grid* должно предшествовать создание компьютерных моделей, которые могут базироваться на методах и средствах моделирования, разработанных в ИрГУПСе [21–24].

**Постановка задачи.** Цель описанных ниже исследований состоит в определении эффективности применения установок РГ на объектах железнодорожного транспорта. Предполагалось, что установки РГ мощностью 20 МВт могут быть реализованы на основе реконструкции производственных котельных в теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) с синхронными турбогенераторами. Один из основных эффектов использования мини-ТЭЦ состоит в снижении затрат на энергообеспечение за счет более низкой себестоимости электроэнергии, вырабатываемой на собственных ТЭЦ, по сравнению с тарифами энергоснабжающей организации. Дополнительные эффекты связаны с уменьшением потерь мощности и энергии в СЭЖД.

Для проведения компьютерного моделирования применялся программный комплекс Fazonord [22]. Рассматривались два режима работы генераторов РГ:

- 1) выдача мощности  $20 + j15$  МВ·А в сеть;
- 2) поддержание неизменного уровня фазных напряжений в 6 кВ на шинах районных обмоток тяговых трансформаторов путем автоматического регулирования возбуждения (АРВ) [25, 26]; при этом реактивная мощность генераторов РГ варьировалась. Для сравнения приведены результаты моделирования при отключенных установках РГ. В этом случае для обеспечения заданных размеров движения потребовалось включить батарею статических конденсаторов мощностью 5 Мвар на посту секционирования в межподстанционной зоне между ТП 2 и ТП 3.



**Рис. 1.** Фрагмент схемы СЭС:  
ЭПС — электроподвижной состав

**Методика и результаты моделирования.** Отличительная особенность железнодорожных СЭС состоит в наличии многократных продольных и поперечных несимметрий, которые возникают вследствие их трехфазно-однофазной структуры. Данный фактор приводит к существенным затруднениям при моделировании режимов. Для их преодоления можно использовать подход, базирующийся на применении фазных координат, реализованный в программном комплексе Fazonord.

На рис. 1 представлен фрагмент схемы железнодорожной СЭС, включающей следующие сегменты:

- тяговая сеть 25 кВ двухпутного участка с четырьмя тяговыми подстанциями (ТП) и межподстанционными зонами протяженностью 50 км;
- система внешнего электроснабжения с трехфазной сетью 220 кВ.

Центральная часть схемы расчетной модели представлена на рис. 2.

Режим СЭС определялся графиком движения (рис. 3) и токовыми профилями (рис. 4) поездов массой 5 000 т.

Полученные с помощью моделирования результаты проиллюстрированы на рис. 5–8 и в табл. 1, в которой представлены средние и мак-

симальные значения потерь мощности на головных участках ЛЭП 220 кВ, выполненных прово-

дами АС-240, и в тяговых трансформаторах ТДТНЖ-40000/230/ 27,5/11.

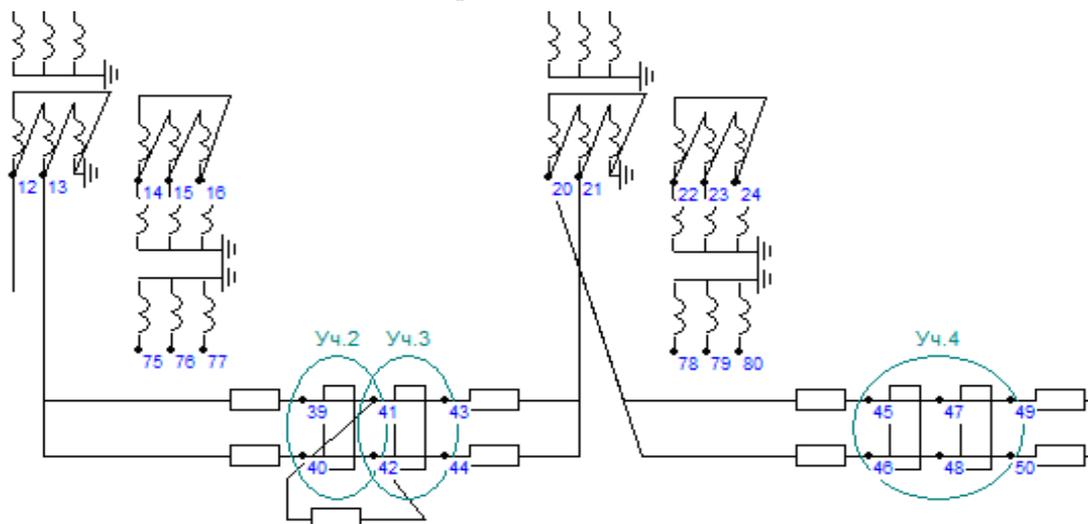


Рис. 2. Фрагмент схемы расчетной модели

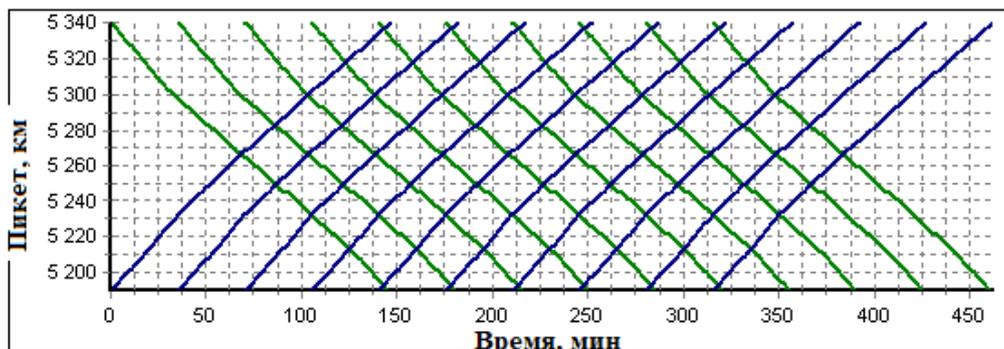


Рис. 3. График движения поездов

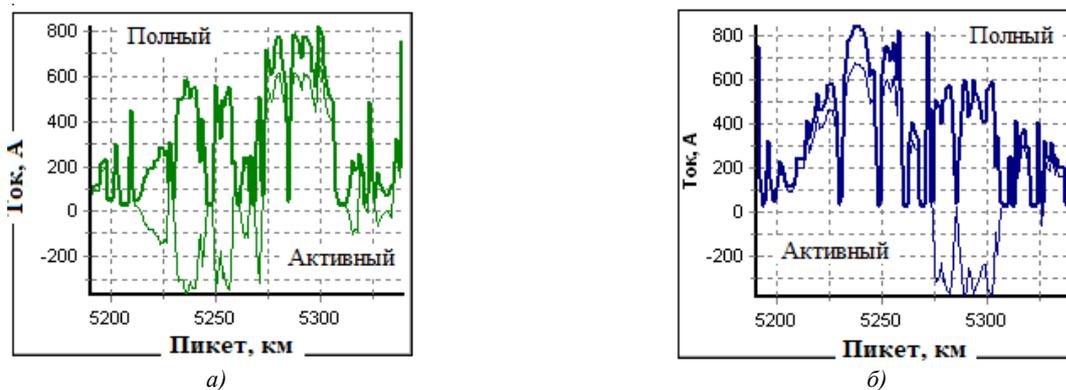


Рис. 4. Токовые профили поездов массой 5 000 т: а — нечетное направление; б — четное направление

Из анализа данных, приведенных в табл. 1, можно сделать следующие выводы:

- наличие установок РГ, работающих в режиме выдачи мощности  $20 + j15$  МВ·А, приводит к снижению максимумов потерь в ЛЭП на 54...56 %;
- аналогичные показатели для суммарных потерь активной мощности в тяговых трансформаторах (ТТ) уменьшаются на 26...33 %;
- при этом наибольшее уменьшение наблюдается на ТП 3, что связано с характером профилей пути примыкающих к ней межподстанционных

зон. Средние значения потерь в ЛЭП понижаются на 54...58 %, а в трансформаторах — на 18...32 %.

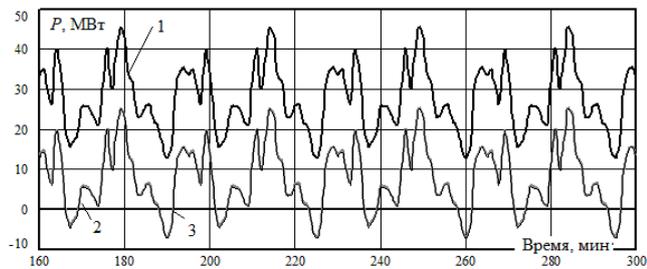
При включении АРВ эффект снижения потерь в ЛЭП проявляется так: максимальные значения уменьшаются на 50...51 %, а средние — на 72...82 %, т. е. имеет значительное увеличение эффекта для средних значений.

Снижение потерь в ТТ становится немного меньшим, что связано с перераспределением потоков реактивной мощности. Сформулированные выводы подтверждаются временными зависимостями, приведенными на рис. 5–8.

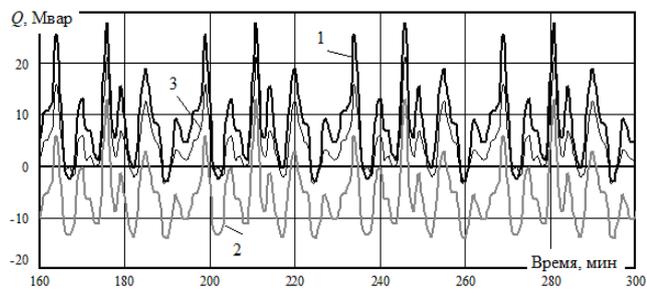
**Таблица 1.** Потери активной мощности, кВт

Объект	Показатель	Режим			Различие, %	
		1	2	3	Между столбцами 3 и 4	Между столбцами 3 и 5
1	2	3	4	5	6	7
Левый головной участок ЛЭП 220 кВ	Среднее значение	54,80	25,39	9,83	-53,67	-82,06
	Максимум	194,00	89,00	97,00	-54,12	-50,00
Правый головной участок ЛЭП 220 кВ	Среднее значение	62,97	26,16	17,83	-58,45	-71,68
	Максимум	218,00	95,00	105,00	-56,42	-51,83
Тяговый трансформатор ТП2	Среднее значение	182,40	149,84	158,97	-17,85	-12,84
	Максимум	443,00	327,00	341,00	-26,19	-23,02
Тяговый трансформатор ТП3	Среднее значение	226,10	153,33	163,87	-32,19	-27,52
	Максимум	497,00	331,00	340,00	-33,40	-31,59

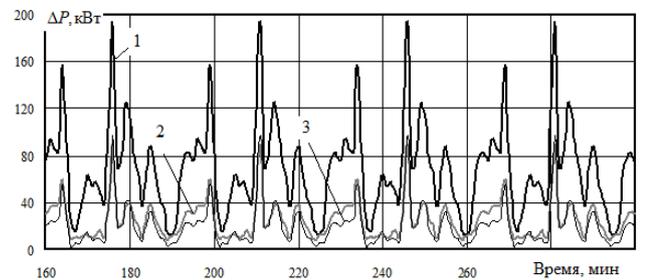
Примечание. 1 — установки РГ отключены; 2 — установки РГ выдают мощность  $20 + j15$  МВ·А; 3 — АРВ поддерживают фазное напряжение 6 кВ.



а)

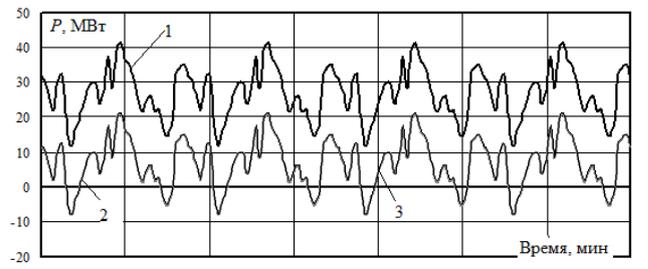


б)

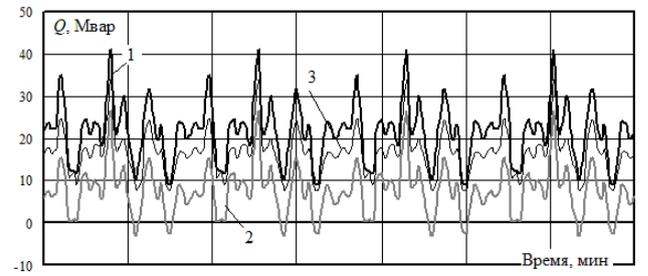


в)

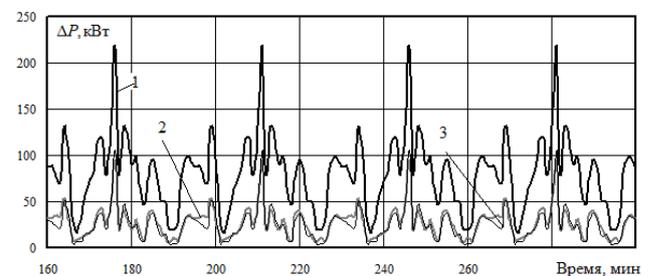
**Рис. 5.** Изменение потоков активной (а) и реактивной (б) мощности и потерь (в) на левом головном участке питающей ЛЭП 220 кВ; цифрами обозначены номера режимов



а)

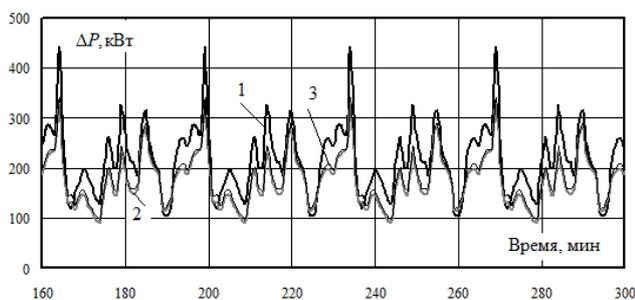


б)

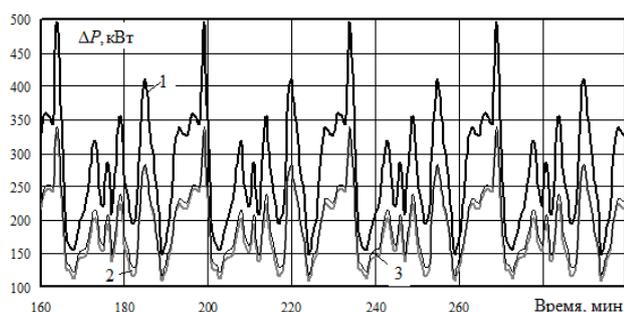


в)

**Рис. 6.** Изменение потоков активной (а) и реактивной (б) мощности и потерь (в) на правом головном участке питающей ЛЭП 220 кВ



а)



б)

Рис. 7. Изменение потерь активной мощности в трансформаторах: а — ТП 2; б — ТП 3

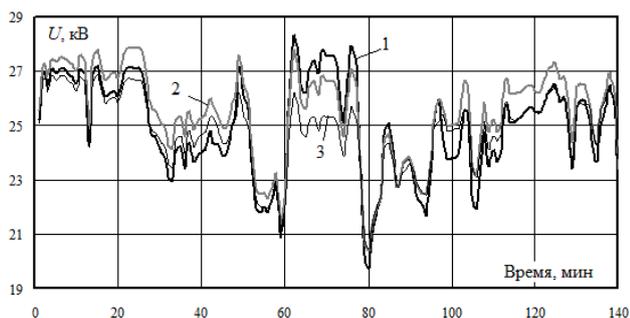


Рис. 8. Изменение напряжений на токоприемнике локомотива первого поезда

На рис. 8 показана динамика изменения напряжений на токоприемнике локомотива первого по-

Литература

1. Тер-Оганов Э.В., Пышкин А.А. Электроснабжение железных дорог. Екатеринбург: УрГУПС, 2014. 432 с.
2. 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, Panel session 5D. P. 1–5.
3. Buchholz Bernd M., Styczynski Zbigniew A. Smart Grids – Fundamentals and Technologies in Electricity Networks. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014. 396 p.
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. Suslov K., Solonina N., Stepanov V. A principle of power quality control in the intelligent distribution networks // International symposium on smart electric distribution systems and technologies EDST 2015 Proceedings, 2015. P. 260–264.
6. 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.

езда. Из представленных на нем временных зависимостей видно, что наличие установок РГ способствует стабилизации напряжений; при этом размах их колебаний снижается примерно на 25 %.

**Заключение.** На основе компьютерных исследований определена энергетическая эффективность применения установок распределенной генерации в системах электроснабжения железных дорог.

Полученные результаты показали, что за счет подключения установок РГ могут быть получены следующие положительные эффекты:

- снижение затрат на энергообеспечение из-за более низкой себестоимости электроэнергии, вырабатываемой на собственных ТЭЦ, по сравнению с тарифами энергоснабжающей организации;
- уменьшение потерь мощности на головных участках питающих ЛЭП в среднем на 53...58 %, в тяговых трансформаторах — на 18...32 %.
- использование автоматических регуляторов возбуждения генераторов ТЭЦ, обеспечивающих поддержание неизменных уровней напряжения на шинах 10 кВ ТП, позволяет увеличить эффект снижения потерь в ЛЭП до 80 %, а также стабилизировать напряжения на токоприемниках электровозов; при этом размах колебаний этих напряжений снижается примерно на 25 %.

Исследования выполнены при финансовой поддержке по гранту на тему «Повышение качества электрической энергии и электромагнитной безопасности в системах электроснабжения железных дорог, оснащенных устройствами Smart Grid, путем применения методов и средств математического моделирования на основе фазных координат».

7. Suslov K.V., Stepanov V.S., Solonina N.N. Smart grid: effect of high harmonics on electricity consumers in distribution networks // IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2013. P. 841–845.
8. Третьяков Е.А. Исследование компонент интеллектуальной системы электроснабжения нетяговых потребителей // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: материалы науч.-практической конф. (7 февр. 2014 г.). Омск: ОмГУПС, 2014. С. 76–83.
9. Третьяков Е.А. Мультиагентное управление распределением электрической энергии в системе электроснабжения нетяговых потребителей железных дорог // Наука и образование в XXI веке: теория, практика, инновации: материалы междунар. науч.-практической конф. (М. 02 июня 2014 г.); в 4 ч. М., 2014. Ч. 1. С. 45–48.
10. Третьяков Е.А. Повышение экономичности и пропускной способности системы электроснабжения за счет управления режимами и внедрения современного оборудования и материалов // Современные тенденции развития науки и технологий. 2015. № 3–1. С. 139–142.
11. Третьяков Е.А. Регулирование параметров режима в системе электроснабжения нетяговых потребителей же-

- лезных дорог // Омский науч. вестн. 2015. № 2 (140). С. 155–159.
12. Третьяков Е.А. Эффективность накопителей электроэнергии в распределительных сетях железных дорог // Россия молодая: передовые технологии в промышленность. 2013. № 2. С. 347–349.
  13. Третьяков Е.А., Малышева Н.Н. Моделирование установившихся режимов системы электроснабжения нетяговых потребителей // Совершенствование электромеханических преобразователей энергии: сб. науч. тр. Омск: ОмГУПС, 2010. С. 54–61.
  14. Валияхметова В.К., Николаев В.Л., Власова В.А. Повышение надежности электроснабжения нетяговых потребителей железных дорог // Современные инновации в науке, образовании и технике: материалы VIII Междунар. науч.-практической конф. (М. 15–16 апр. 2018 г.). М., 2018. С. 27–29.
  15. Шеломенцев А.О., Косяков А.А. Совершенствование организации проектирования систем электроснабжения нетяговых потребителей железнодорожного транспорта и распределительных сетей общего пользования // Инновационный транспорт. 2012. № 5 (6). С. 15–19.
  16. Дробов А.В., Галушко В.Н., Алферов А.А. Определение энергетической эффективности электрооборудования нетяговых железнодорожных потребителей с помощью имитационного моделирования при проектировании // Вестн. Гомельского гос. технического ун-та им. П.О. Сухого. 2017. № 2 (69). С. 95–105.
  17. Мухарямов Р.И., Добрынин Е.В., Окладов С.А. Автоматизация контроля текущего состояния системы электроснабжения нетяговых потребителей железнодорожного транспорта // Наука и образование транспорту. 2015. № 1. С. 136–138.
  18. Ожиганов Н.В. Повышение качества электроэнергии для ЖАТ // Автоматика, связь, информатика. 2012. № 1. С. 22–26.
  19. Орешков Е.В. Управление качеством электроэнергии в распределительных сетях железнодорожного транспорта // Качество в производственных и социально-экономических системах: материалы 6-й Междунар. науч.-техн. конф. (20 апр. 2018 г.); в 2 т. Курск, 2018. Т. 2. С. 106–109.
  20. Ермоленко А.В., Ермоленко Д.В. Перспективы применения современных устройств активной фильтрации для нормализации качества электрической энергии в системе электрической тяги переменного тока // Вестн. ВНИИЖТ. 2009. № 5. С. 7–12.
  21. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Черепанов А.В. Интеллектуальные технологии управления качеством электроэнергии. Иркутск: ИрГТУ, 2015. 218 с.
  22. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: ИрГУПС, 2005. 273 с.
  23. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Multifunctional Mathematical Models of Railway Electric System // Innovation & Sustainability of Modern Railway-Proceedings of ISMR, 2008. Beijing China Railway Publishing House, 2008. P. 504–508.
  24. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование систем электроснабжения с трехфазно-однофазными преобразователями // Вестн. ИрГТУ. 2018. Т. 22. № 5. С. 122–133.
  25. Bulatov Y.N., Kryukov A.V., Van Huan N. Automatic Prognostic Regulators of Distributed Generators. 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon, 2018. P. 1–4. URL: 10.1109/FarEastCon.2018.8602718.
  26. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Van Huan N. Application of Automatically Controlled Distributed Generation Plants in Railroads Power Supply Systems. 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). URL: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867655.

#### References

1. Ter-Oganov E.V., Pyshkin A.A. Power supply of railways. Ekaterinburg: UrGUPS, 2014. 432 p.
2. 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, Panel session 5D. P. 1–5.
3. Buchholz Bernd M., Styczynski Zbigniew A. Smart Grids – Fundamentals and Technologies in Electricity Networks. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014. 396 p.
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. Suslov K., Solonina N., Stepanov V. A principle of power quality control in the intelligent distribution networks // International symposium on smart electric distribution systems and technologies EDST 2015 Proceedings, 2015. P. 260–264.
6. 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.
7. Suslov K.V., Stepanov V.S., Solonina N.N. Smart grid: effect of high harmonics on electricity consumers in distribution networks // IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2013. P. 841–845.
8. Tret'yakov E.A. Research of the components of the intellectual system of power supply for non-traction consumers // Innovacionnye proekty i tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte: materialy nauch.-prakticheskoy konf. (7 fevr. 2014 g.). Omsk: OmGUPS, 2014. P. 76–83.
9. Tret'yakov E.A. Multi-agent control of the distribution of electric energy in the power supply system of non-traction consumers of railways // Nauka i obrazovanie v XXI veke: teoriya, praktika, innovacii: materialy mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. (M. 02 iyunya 2014 g.); v 4 ch. M., 2014. CH. 1. P. 45–48.
10. Tret'yakov E.A. Improving the efficiency and throughput of the power supply system by controlling the modes and introducing modern equipment and materials // Sovremennye tendencii razvitiya nauki i tekhnologii. 2015. № 3–1. P. 139–142.
11. Tret'yakov E.A. Regulation of the parameters of the regime in the power supply system of non-traction consumers of railways // Omsk Scientific Bulletin. 2015. № 2 (140). P. 155–159.
12. Tret'yakov E.A. Efficiency of electric energy storage in distribution networks of railways // Rossiya molodaya: peredovye tekhnologii v promyshlennost'. 2013. № 2. P. 347–349.
13. Tret'yakov E.A., Malysheva N.N. Modeling of steady-state modes of power supply systems for non-traction consumers // Sovershenstvovanie elektromekhanicheskikh preobrazovatelej energii: sb. nauch. tr. Omsk: OmGUPS, 2010. P. 54–61.
14. Valiyahmetova V.K., Nikolaev V.L., Vlasova V.A. Improving the reliability of power supply to non-traction rail consumers // Sovremennye innovacii v nauke, obrazovanii i tekhnike: materialy VIII Mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. (M. 15–16 apr. 2018 g.). M., 2018. P. 27–29.
15. Shelomencev A.O., Kosyakov A.A. Improving the organization of the design of power supply systems for non-traction consumers of railway transport and distribution networks for general use // «Innotrans» Journal. 2012. № 5 (6). P. 15–19.
16. Drobov A.V., Galushko V.N., Alferov A.A. Determination of energy efficiency of electrical equipment of non-traction railway consumers using simulation modeling during design

- // Vestn. Gomel'skogo gos. tekhnicheskogo un-ta im. P.O. Suhogo. 2017. № 2 (69). P. 95–105.
17. Muharyamov R.I., Dobrynin E.V., Okladov S.A. Automation of control of the current state of the power supply system of non-traction consumers of railway transport // *Nauka i obrazovanie transportu*. 2015. № 1. P. 136–138.
  18. Ozhiganov N.V. Improving the quality of electricity for railway automation and telemechanics // *Automation, communication and Informatics*. 2012. № 1. P. 22–26.
  19. Oreshkov E.V. Electricity quality management in distribution networks of railway transport // *Kachestvo v proizvodstvennyh i social'no-ekonomicheskikh sistemah: materialy 6-j Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (20 apr. 2018 g.); v 2 t. Kursk, 2018. V. 2. P. 106–109.*
  20. Ermolenko A.V., Ermolenko D.V. Prospects for the use of modern active filtering devices to normalize the quality of electric energy in the AC electric traction system // *Vestnik of the Railway Research Institute*. 2009. № 5. P. 7–12.
  21. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Cherepanov A.V. Intelligent Technologies for Electric Power Quality Management. Irkutsk: IrGTU, 2015. 218 p.
  22. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Complex asymmetric modes of electrical systems. Irkutsk: IrGUPS, 2005. 273 p.
  23. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Multifunctional Mathematical Models of Railway Electric System // *Innovation & Sustainability of Modern Railway-Proceedings of ISMR, 2008*. Beijing China Railway Publishing House, 2008. P. 504–508.
  24. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modeling of power supply systems with three-phase-single-phase converters // *Bulletin of Irkutsk State Technical University*. 2018. V. 22. № 5. P. 122–133.
  25. Bulatov Y.N., Kryukov A.V., Van Huan N. Automatic Prognostic Regulators of Distributed Generators. 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon, 2018. P. 1–4. URL: [10.1109/FarEastCon.2018.8602718](https://doi.org/10.1109/FarEastCon.2018.8602718).
  26. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Van Huan N. Application of Automatically Controlled Distributed Generation Plants in Railroads Power Supply Systems. 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). URL: [10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867655](https://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867655).