

МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 621.311, 621.331

DOI: 10.18324/2077-5415-2023-3-59-65

Применение распределенной генерации для улучшения качества электроэнергии в системах электроснабжения железных дорог на горных территориях

Ю.Н. Булатов^{1a}, А.В. Крюков^{2, 3b}, К.В. Суслов^{3, 4c}, В.В. Кижин^{1d}

¹ Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия

² Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского, 15, Иркутск, Россия

³ Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, Иркутск, Россия

⁴ Национальный исследовательский университет «МЭИ», ул. Красноказарменная, 14, Москва, Россия

^a bulatovyura@yandex.ru, ^b and_kryukov@mail.ru, ^c dr.suslov@yandex.ru, ^d vadim-hero4ever@yandex.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>, ^b <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>

^c <https://orcid.org/0000-0003-0484-2857>, ^d <https://orcid.org/0009-0003-5814-3047>

Статья поступила 21.09.2023, принята 22.09.2023

Цель исследований, результаты которых представлены в статье, состояла в оценке возможностей использования распределенной генерации и их регуляторов для улучшения качества электроэнергии в системах электроснабжения стационарных объектов, расположенных на горных территориях и питающихся от тяговых подстанций железной дороги. В качестве установки распределенной генерации рассматривался турбогенератор, оснащенный автоматическими регуляторами, обеспечивающими стабилизацию напряжения и скорости вращения ротора. Моделирование проводилось для трех следующих вариантов: пропорционально-интегрально-дифференциальные регуляторы классического типа при отсутствии согласованной настройки; согласованно настроенные регуляторы; регуляторы прогностического типа. Сравнение работы регуляторов выполнялось на основе моделирования переходного процесса, создаваемого включением дополнительной тяговой нагрузки большой мощности. На основе результатов моделирования сделаны выводы о том, что применение регуляторов прогностического типа дает возможность значительно улучшить показатели качества управления, а повышение загрузки турбогенератора уменьшает коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности. Регуляторы, в состав которых входит звено прогноза, позволяют поддерживать практически на неизменном уровне показатели качества электроэнергии при изменении генерируемой мощности. Дополнительно было выполнено моделирование режима системы электроснабжения при подключении потребителей и установке распределенной генерации через вставку постоянного тока. Полученные результаты показали, что такое техническое решение позволяет обеспечить нормативное качество электроэнергии по несимметрии и гармоническим искажениям.

Ключевые слова: горные территории; системы электроснабжения; установки распределенной генерации; качество электроэнергии; моделирование.

Application of distributed generation to improve the quality of electricity in railway power supply systems in mountainous areas

Yu.N. Bulatov^{1a}, A.V. Kryukov^{2, 3b}, K.V. Suslov^{3, 4c}, V.V. Kizhin^{1d}

¹ Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

² Irkutsk State Transport University; 15, Chernyshevsky St., Irkutsk, Russia

³ Irkutsk National Research Technical University; 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia

⁴ National Research University "MPEI"; 14, Krasnokazarmennaya St., Moscow, Russia

^a bulatovyura@yandex.ru, ^b and_kryukov@mail.ru, ^c dr.suslov@yandex.ru, ^d vadim-hero4ever@yandex.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>, ^b <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>

^c <https://orcid.org/0000-0003-0484-2857>, ^d <https://orcid.org/0009-0003-5814-3047>

Received 21.09.2023, accepted 22.09.2023

The purpose of the studies presented in the article is to determine the effectiveness of the use of distributed generation plants and their regulators to improve the quality of electricity in power supply systems for stationary facilities located in mountainous areas and powered by traction substations of the AC main railway. As a distributed generation plant, a turbogenerator is considered, equipped with automatic regulators that ensure voltage stabilization and rotor speed. The simulation is carried out for three types and settings of regulators: proportional-integral-differential regulators of the classical type in the absence of a consistent setting; matched regulators; predictive-type regulators. Comparison of the operation of the regulators is carried out in the transient mode created by the inclusion of an additional powerful traction load. The simulation results led to the conclusion that

the use of predictive regulators of a distributed generation plant makes it possible to significantly improve the quality of control compared to classical regulators, and an increase in the load of the turbogenerator reduces the voltage unbalance factor in the reverse sequence. Regulators, which include a forecast link, allow maintaining the electricity quality indicators at an almost unchanged level when the generated power changes. Additionally, a simulation of the operating mode of the power supply system under study is carried out when connecting consumers and installing distributed generation through a DC link. The results obtained show that such a technical solution makes it possible to ensure the standard quality of electricity in terms of unbalance and harmonic distortion.

Key words: mountainous areas; power supply systems; distributed generation plants; power quality; modeling.

Введение. Доля горных территорий в площади некоторых субъектов Российской Федерации достигает 75...99 % [1]. Например, в Байкальском регионе к таким субъектам относятся Иркутская и Читинская области. Для устойчивого развития горных территорий в современных условиях [1–3] требуется формирование развитой инфраструктуры, одним из важных сегментов которой являются системы электроснабжения (СЭС) промышленных, транспортных и жилищно-коммунальных объектов. Важность решения задач обеспечения надежного и качественного электроснабжения подтверждает анализ отечественных [4–10] и зарубежных [11–13] публикаций. В работах [4–6] рассматриваются вопросы применения возобновляемых источников энергии в СЭС объектов, расположенных на горных территориях. Методам использования устройств *smart grid* при формировании таких СЭС посвящены статьи [7; 8], а в работах [9; 10] решаются задачи повышения их энергетической эффективности. Вопросы моделирования и управления в СЭС горных территорий рассматриваются в работах [11–13].

В Байкальском регионе источником электроснабжения многих объектов, расположенных на горных территориях, являются тяговые подстанции (ТП) Транссибирской железнодорожной магистрали. Наличие резкопеременной, однофазной и нелинейной тяговой нагрузки приводит к тому, что показатели качества электроэнергии (ПКЭ) на шинах 110-220 и 6-10-35 кВ этих ТП могут далеко выходить за допустимые пределы. Данный факт подтверждается измерениями ПКЭ, результаты которых описаны в работе [14]. Наиболее значительные превышения наблюдаются при движении тяжеловесных поездов по горно-перевальным участкам.

Эффективный путь решения проблемы улучшения качества электроэнергии в системах электроснабжения

стационарных объектов, питающихся от районных обмоток 6-10-35 кВ тяговых трансформаторов, состоит в применении технологий *smart grid*, одним из важных сегментов которых являются автоматически регулируемые установки распределенной генерации (РГ). В условиях цифровизации электроэнергетики [15; 16] решение вопросов применения таких установок РГ должно осуществляться на основе применения компьютерных моделей [17–19].

Ниже представлены результаты компьютерных исследований, полученных на основе моделирования режимов системы электроснабжения железной дороги, профиль пути которой характеризуется уклонами, достигающими 17 %, а максимальный перепад высот — 450 м.

Объект и методы его моделирования. Для проведения исследований использовался пакет *MatLab*, в котором была разработана модель системы электроснабжения железной дороги (СЭЖД), проходящей по горной территории (рис. 1). Она включала модели следующих элементов (рис. 2):

- тягового трансформатора 110/27,5/6,3 кВ и контактной сети 25 кВ;
- вставки постоянного тока, реализованной на основе выпрямителя и инвертора;
- установки РГ, которая могла подключаться к шинам районной обмотки тягового трансформатора непосредственно или через вставку постоянного тока (ВПТ); генератор этой установки был оснащен автоматическими регуляторами возбуждения (АРВ) и частоты вращения (АРЧВ); АРВ подключался к обмотке возбуждения (ОВ) через трансформатор напряжения (ТН), а на вход АРЧВ подавался сигнал от датчика частоты вращения (ДЧВ).

Схема описанной модели СЭЖД в *MatLab* представлена на рис. 3.



Рис. 1. Электрифицированная железная дорога на горной территории

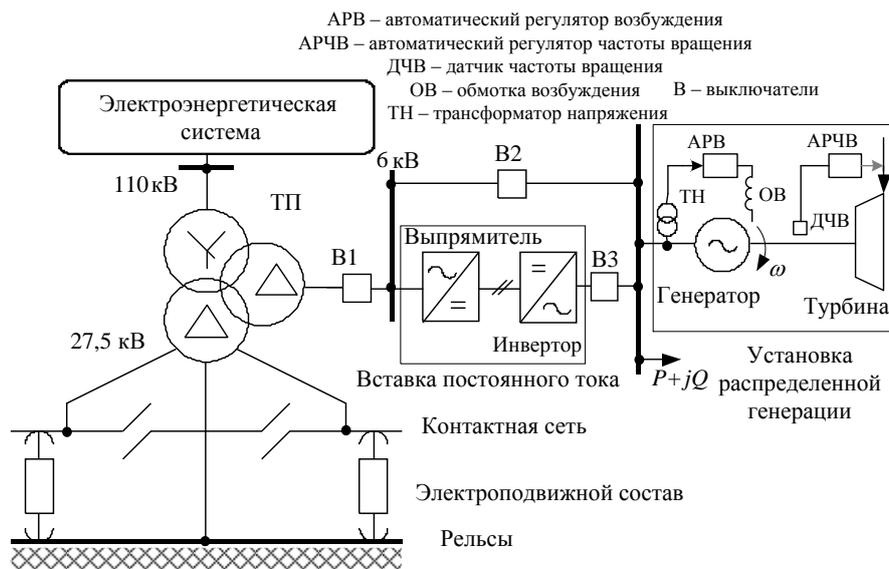


Рис. 2. Схема исследуемой СЭЖД

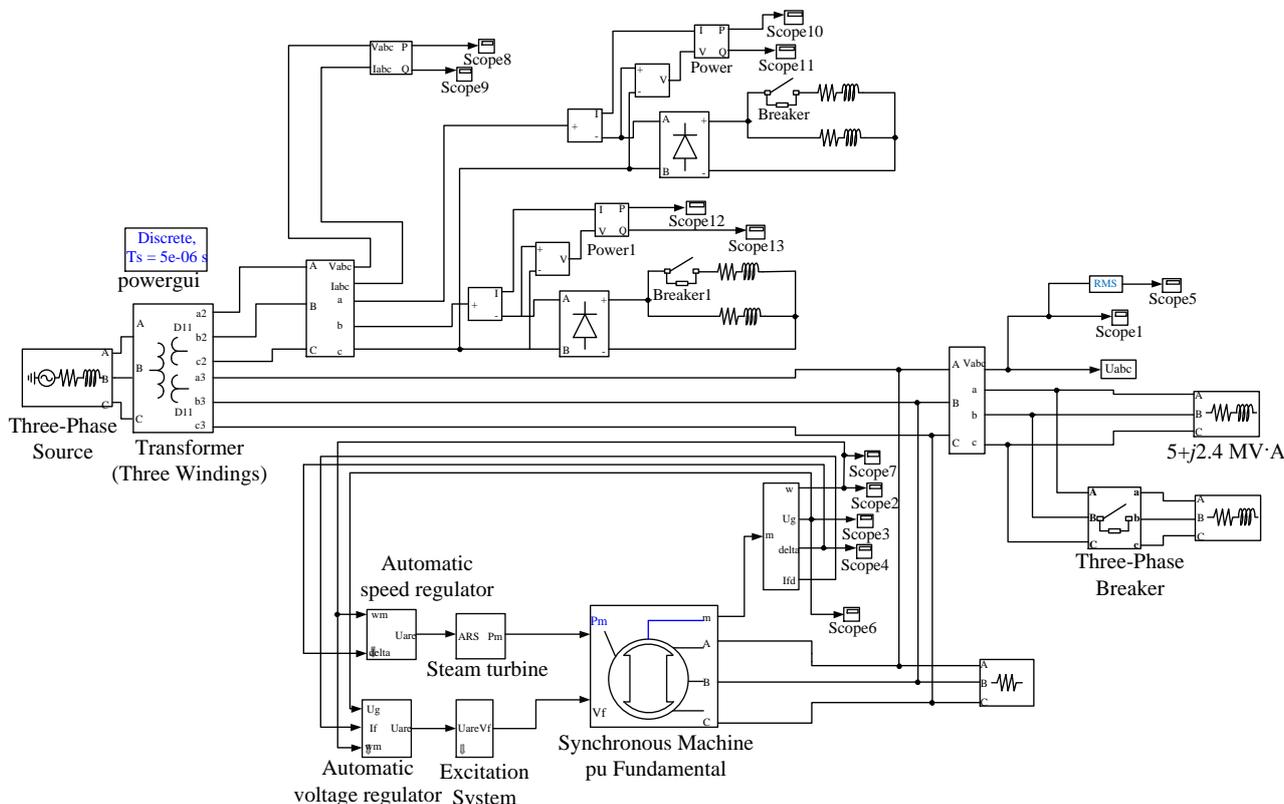


Рис. 3. Схема модели исследуемой СЭЖД в MatLab

Номинальная мощность генератора установки РГ равнялась 3,125 МВ·А. В качестве модели паровой турбины использовалось аperiodическое звено первого порядка с постоянным временем 0,2 с. В качестве входного сигнала использовалась информация о положении заслонок, а в качестве выходного — механическая мощность на валу. Аналогичная по структуре модель применялась для тиристорного возбудителя; при этом задавались следующие параметры: коэффициент усиления $k_e = 1$; постоянная времени $T_e = 0,025$ с.

Для управления установкой РГ применялись класси-

ческие АРВ и АРЧВ [17], использующие ПИД-закон регулирования, а также прогностический АРВ и самонастраивающийся АРЧВ [20].

Результаты моделирования. Исследования проводились для ситуаций подключения дополнительной тяговой нагрузки; при этом генерируемая мощность установки РГ варьировалась. Измерения проводились для наиболее критичных ПКЭ в СЭЖД — суммарных коэффициентов гармоник напряжения k_U по фазам и коэффициента несимметрии по обратной последовательности k_{2U} . Измерения указанных показателей выполнялись в

установившемся режиме. В качестве возмущения рассматривался наброс тяговой нагрузки величиной 16 МВ·А. Такие набросы характерны при движении тяжелых поездов по горно-перевальным участкам.

Наиболее значимые результаты многовариантного моделирования проиллюстрированы графиками, приведенными на рис. 4 и 5, характеризующими динамику изменений частоты вращения и напряжения генератора РГ. Кривая 1 на рис. 4 и рис. 5 а отвечали ситуации с несогласованно настроенными АРВ и АРЧВ, кривая 2 и рис. 5, б соответствовали согласованно настроенным регуляторам, а кривая 3 и рис 5, в отвечали регуляторам, оснащенным прогнозирующими элементами; при этом регуляторы также имели согласованную настройку. На рис. 5, г приведены графики для режима при отключенной установке РГ. Кроме того, на рис. 6 показаны графики изменения ПКЭ при варьировании генерируемой мощности установки РГ. Величина загрузки турбогенератора определялась коэффициентом

$$k_{load} = \frac{100P}{P_{nom}},$$

где P – фактическая мощность генерации; P_{nom} – номинальная мощность турбогенератора.

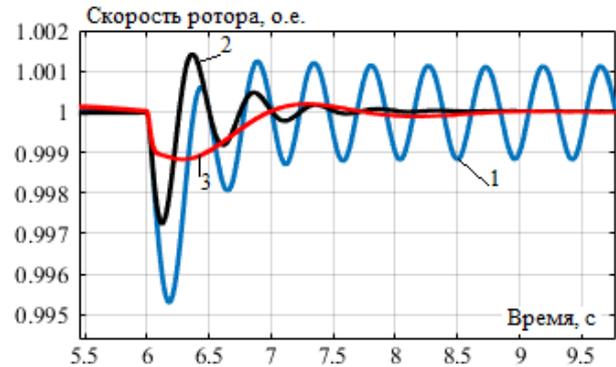
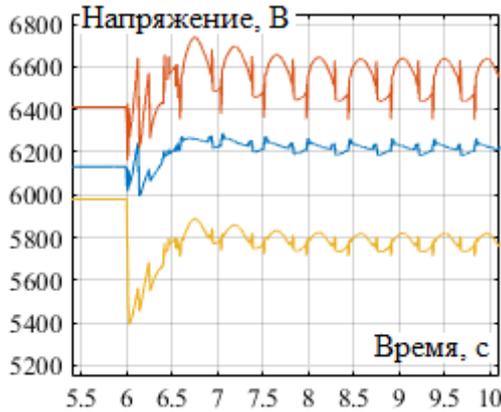
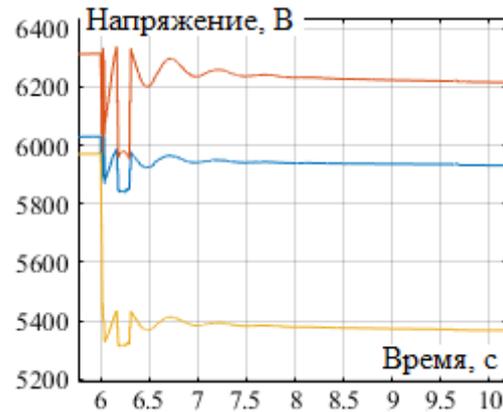


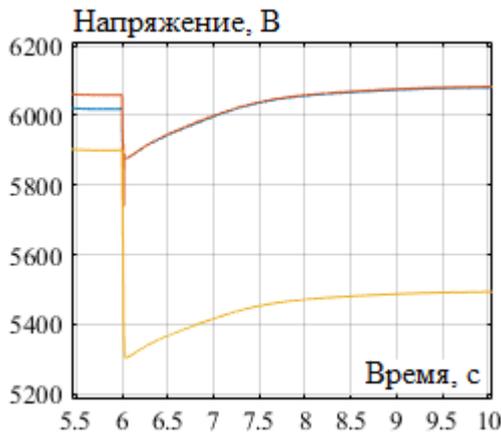
Рис. 4. Динамика изменения скорости вращения ротора



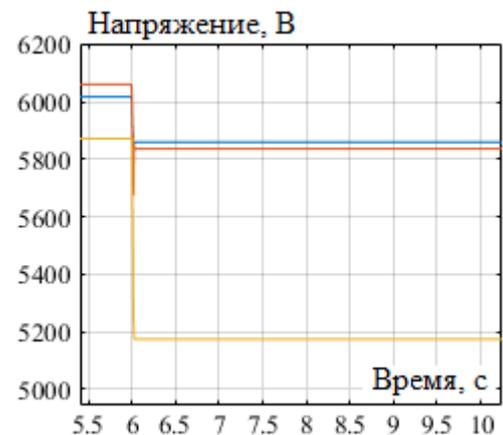
а)



б)



в)



г)

Рис. 5. Динамика изменений напряжения на шинах нетягового потребителя при подключении мощной тяговой нагрузки

На основе анализа представленных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Использование прогностических АРВ и АРЧВ приводит к улучшению показателей качества процессов управления для напряжения и скорости вращения ротора при подключении дополнительной тяговой нагрузки (рис. 4, 5); при этом несогласованная настройка АРВ и АРЧВ может вызывать заметные колебания этих параметров (рис. 4, 5, а).

2. При отсутствии установки РГ и набросе тяговой нагрузки стабилизировать напряжение у потребителей электроэнергии невозможно (рис. 5, г).

3. Увеличение генерируемой мощности установки РГ позволяет уменьшить уровни несимметрии, но при этом возрастают гармонические искажения (рис. 6).

4. На основе прогностических регуляторов удается стабилизировать ПКЭ в широком диапазоне изменений генерируемой мощности установки РГ (рис. 6, в, г).

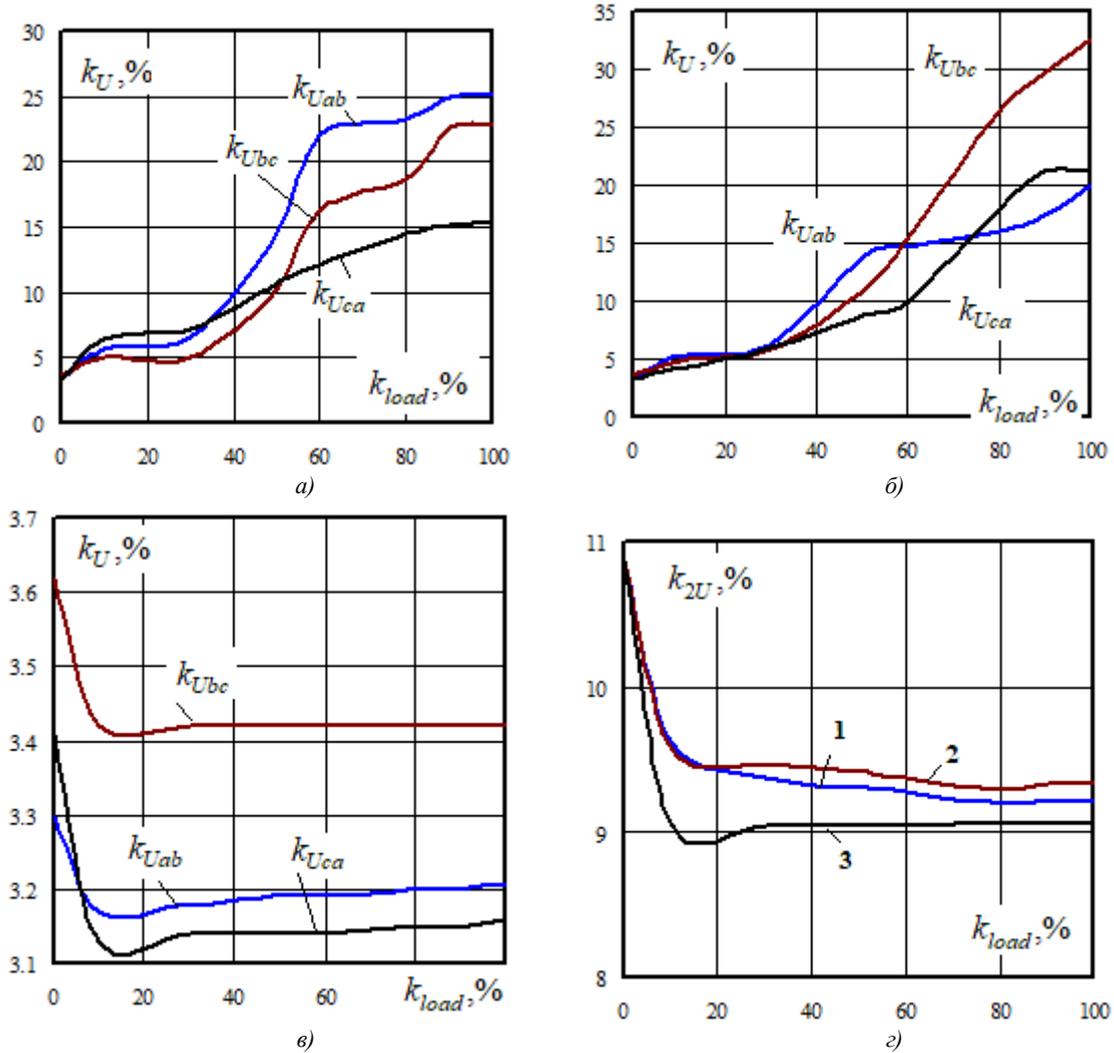


Рис. 6. Зависимости ПКЭ от загрузки установки РГ: цифровые и буквенные обозначения расшифрованы в пояснениях к рис. 4 и 5

Таким образом, для оценки эффективности на рис. 7 проиллюстрированы результаты моделирования при подключении РГ с прогностическими регуляторами через ВПТ. Они показывают, что применение ВПТ значительно улучшает ПКЭ, которые при этом составили (для

любой загрузки турбогенератора): $k_{UAB} = 0,2 \%$; $k_{UBC} = 0,14 \%$; $k_{UCA} = 0,21 \%$; $k_{2U} = 0,07 \%$. Кроме того, ВПТ и прогностические регуляторы позволяют значительно уменьшить колебательность и величину перерегулирования (рис. 7).

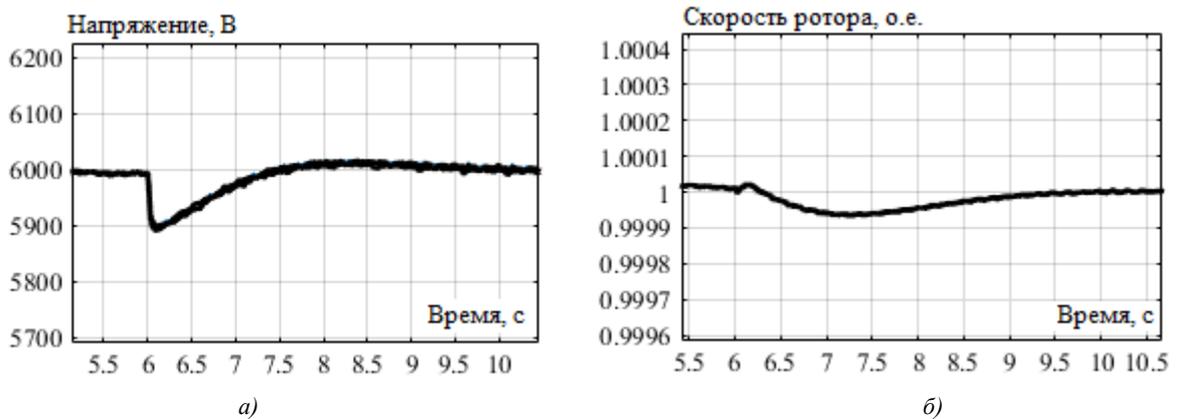


Рис. 7. Временные зависимости напряжения (а) и скорости турбогенератора (б), подключенного через ВПТ

Заключение. Предложена технология моделирования динамических режимов систем электроснабже-

ния железных дорог, проходящих по горным территориям и оснащенных автоматически регулируемым

установками распределенной генерации. Компьютерные модели реализованы в системе MatLab и могут использоваться для решения практических задач, связанных с улучшением качества электроэнергии на шинах 6-10-35 кВ тяговых подстанций, от которых осуществляется электропитание стационарных объектов транспорта, промышленности и жилищно-коммунального хозяйства.

По результатам моделирования могут быть сделаны следующие выводы об эффективности использования управляемых установок РГ в системах электроснабжения стационарных объектов горных территорий, питающихся

от тяговых подстанций магистральной железной дороги:

1. Установки РГ позволяют улучшить качество электроэнергии.

2. Прогностические регуляторы установки РГ дают возможность поддерживать практически на неизменном уровне ПКЭ при вариации в широких пределах мощностей установок РГ.

3. Использование вставки постоянного тока и прогностических регуляторов практически полностью устраняет несимметрию и гармонические искажения напряжений, а также уменьшает колебательность и величину перерегулирования для напряжения и скорости ротора генератора.

Литература

1. Космачева Н.М., Черкасская Г.В. Вопросы устойчивого развития горных территорий в Российской Федерации: система жизнеобеспечения, институты и инфраструктура // Экономика нового мира. 2020. Т. 5. № 4 (19). С. 44-60.
2. Гасанов М.А. Развитие производственно-отраслевой инфраструктуры горных территорий региона // Транспортное дело России. 2020. № 1. С. 62-65.
3. Сабанчиев А.Х., Мисаков А.В. Разработка инструментариев сбалансированного развития инфраструктуры горных территорий // Изв. Кабардино-Балкарского науч. центра РАН. 2018. № 1 (81). С. 45-50.
4. Клюев Р.В., Арсланбеков Б.А., Донченко В.А. Использование нетрадиционных возобновляемых источников электроэнергии в горных территориях // Перспективы устойчивого развития нефтегазовой отрасли и электроэнергетики в Российской Федерации и мире: материалы Междунар. науч.-практической конф. Владикавказ, 2019. С. 246-251.
5. Klyuev R., Gavrina O., Madaeva M. Benefits of Solar Power Plants for Energy Supply to Consumers in Mountain Territories. 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), 2019. Publisher: IEEE.
6. Klyuev R., Bosikov I., Gavrina O. Use of Wind Power Stations for Energy Supply to Consumers in Mountain Territories. 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 2019. Publisher: IEEE.
7. Цыгулев Н.И., Хлебников В.К., Шелест В.А. Электрическая распределительная сеть электроснабжения потребителей горных территорий на платформе интернета энергии постоянным током // Перспективы устойчивого развития нефтегазовой отрасли и электроэнергетики в Российской Федерации и мире: материалы Междунар. науч.-практической конф. Владикавказ, 2019. С. 296-302.
8. Хузмиев И.К., Лолаев А.Б., Кумаритов А.М. Интеллектуальная энергетическая система селения Кобан кремниевая долина «Тагаурия» в горной зоне РСО-Алании // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2016. № 2 (79). С. 20-25.
9. Кабисов А.А., Ерофеев М.И., Клюев Р.В. Эффективное функционирование единой промышленно-энергетической системы в горных территориях // Повышение эффективности процессов производства, распределения и потребления электроэнергии для устойчивого развития мировой энергетики: сб. материалов Междунар. семинара (25 мая 2018 г.). Владикавказ, 2018. С. 86-88.
10. Клюев Р.В., Босиков И.И., Гаврина О.А. Повышение эффективности использования электроэнергии на горно-добывающем предприятии // Труды СКГМИ (ГТУ). 2018. № 25. С. 13-19.
11. Gao X., Wu X., Liu Zh., Sun D., Li M., Gao H. Study on lighting characteristics of mountain transmission line. 2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), 2015. Publisher: IEEE.
12. Xie X., Wu Y., Hu J., Chen Y., Chen F., Zou Q., Fu B., Ye L., Sun Yu. Design of Grid Emergency Repair Management Command System Based on Mountain Distribution Networks. 2019 14th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2019. Publisher: IEEE.
13. Baoxuan Ye, Zaitao Zheng, Li Zhang, Kangjian Wang, Shengda Yu, Suchun Fan. Planning Method of Feeder Automation of Distribution Network in Mountain Area Considering Distributed Generation. 2019 9th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES), 2019. Publisher: IEEE.
14. Мустафа Г.М., Гусев С.И., Ершов А.М. Расчет мощности активного фильтросимметрирующего устройства для нормализации напряжения на шинах ПС 220 кВ Скворородино // Электрические станции. 2015. № 3. С. 46-53.
15. Жуков О.А. Аспекты цифровизации электроэнергетики и электротехнической экспертизы // Евразийское Науч. Объединение. 2019. № 5-2 (51). С. 121-125.
16. Burda Ye.D., Volkova I.O., Gavrikova E.V., Kosygina A.V. Digitalization and ways for the development of the electric energy industry with the participation of consumers: new challenges for shaping the investment climate // Journal of Siberian Federal University. Humanities and Social Sciences. 2019. V. 12. № 4. P. 545-564.
17. Kryukov A.V., Kargapol'cev S.K., Bulatov Yu.N., Skrypnik O.N., Kuznetsov B.F. Intelligent control of the regulators adjustment of the distributed generation installation, Far East // Journal of Electronics and Communications. 2017. V. 17. № 5. P. 1127-1140.
18. Bulatov Yu.N., Cherepanov A.V., Kryukov A.V., Suslov K.V. Distributed Generation in Railroad Power Supply Systems. 2020 3rd International Colloquium on Intelligent Grid Metrology (SMAGRIMET). Conference Location: Cavtat, Dubrovnik, Croatia, Croatia. Publisher: IEEE. P. 54-60.
19. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Nguyen Van Huan. Effect of distributed generation plants' automatic controllers on power quality factors. E3S Web of Confereces 114, 04001 (2019). Energy Systems Research, 2019, P. 1-5.
20. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Nguyen V.H. Automatic prognostic regulators of distributed generators. International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, 2018. P. 1-4.

References

1. Kosmacheva N.M., Cherkasskaya G.V. Issues of sustainable development of mountainous territories in the Russian Federation: life support system, institutions and infrastructure // Economy of the new world. 2020. V. 5. № 4 (19). P. 44-60.
2. Gasanov M.A. Development of industrial and industrial infrastructure of mountainous territories of the region // Transport business of Russia. 2020. № 1. P. 62-65.

3. Sabanchiev A.H., Misakov A.V. Development of tools for the balanced development of the infrastructure of mountain territories // *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2018. № 1 (81). P. 45-50.
4. Klyuev R.V., Arslanbekov B.A., Donchenko V.A. Use of non-traditional renewable energy sources in mountainous areas // *Perspektivy ustojchivogo razvitiya neftegazovoj otrasli i elektroenergetiki v Rossijskoj Federacii i mire: materialy Mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. Vladikavkaz*, 2019. P. 246-251.
5. Klyuev R., Gavrina O., Madaeva M. Benefits of Solar Power Plants for Energy Supply to Consumers in Mountain Territories. 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), 2019. Publisher: IEEE.
6. Klyuev R., Bosikov I., Gavrina O. Use of Wind Power Stations for Energy Supply to Consumers in Mountain Territories. 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 2019. Publisher: IEEE.
7. Cygulev N.I., Hlebnikov V.K., Shelest V.A. Electric distribution network of power supply to consumers of mountainous territories on the platform of the Internet of energy by direct current // *Perspektivy ustojchivogo razvitiya neftegazovoj otrasli i elektroenergetiki v Rossijskoj Federacii i mire: materialy Mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. Vladikavkaz*, 2019. P. 296-302.
8. Huzmiev I.K., Lolaev A.B., Kumaritov A.M. Intelligent energy system of Koban village "Tagauria" silicon valley in the mountainous zone of North Ossetia-Alania // *Avtomatizaciya i IT v energetike*. 2016. № 2 (79). P. 20-25.
9. Kabisov A.A., Erofeev M.I., Klyuev R.V. Effective functioning of a unified industrial and energy system in mountainous areas // *Povyshenie effektivnosti processov proizvodstva, raspredeleniya i potrebleniya elektroenergii dlya ustojchivogo razvitiya mirovoj energetiki: sb. materialov Mezhdunar. seminara (25 maya 2018 g.)*. Vladikavkaz, 2018. P. 86-88.
10. Klyuev R.V., Bosikov I.I., Gavrina O.A. Improving the efficiency of the use of electricity at a mining enterprise // *Trudy SKGMI (GTU)*. 2018. № 25. P. 13-19.
11. Gao X., Wu X., Liu Zh., Sun D., Li M., Gao H. Study on lightning characteristics of mountain transmission line. 2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), 2015. Publisher: IEEE.
12. Xie X., Wu Y., Hu J., Chen Y., Chen F., Zou Q., Fu B., Ye L., Sun Yu. Design of Grid Emergency Repair Management Command System Based on Mountain Distribution Networks. 2019 14th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2019. Publisher: IEEE.
13. Baoxuan Ye, Zaitao Zheng, Li Zhang, Kangjian Wang, Shengda Yu, Suchun Fan. Planning Method of Feeder Automation of Distribution Network in Mountain Area Considering Distributed Generation. 2019 9th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES), 2019. Publisher: IEEE.
14. Mustafa G.M., Gusev S.I., Ershov A.M. Calculation of the power of an active filter balancing device for normalizing the voltage on the buses of the 220 kV Skovorodino substation // *Electrical stations*. 2015. № 3. P. 46-53.
15. ZHukov O.A. Aspects of digitalization of the electric power industry and electrical engineering expertise // *Eurasian Scientific Association*. 2019. № 5-2 (51). P. 121-125.
16. Burda Ye.D., Volkova I.O., Gavrikova E.V., Kosygina A.V. Digitalization and ways for the development of the electric energy industry with the participation of consumers: new challenges for shaping the investment climate // *Journal of Siberian Federal University. Humanities and Social Sciences*. 2019. V. 12. № 4. P. 545-564.
17. Kryukov A.V., Kargapol'cev S.K., Bulatov Yu.N., Skrypnik O.N., Kuznetsov B.F. Intelligent control of the regulators adjustment of the distributed generation installation, Far East // *Journal of Electronics and Communications*. 2017. V. 17. № 5. P. 1127-1140.
18. Bulatov Yu.N., Cherepanov A.V., Kryukov A.V., Suslov K.V. Distributed Generation in Railroad Power Supply Systems. 2020 3rd International Colloquium on Intelligent Grid Metrology (SMAGRIMET). Conference Location: Cavtat, Dubrovnik, Croatia, Croatia. Publisher: IEEE. P. 54-60.
19. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Nguyen Van Huan. Effect of distributed generation plants' automatic controllers on power quality factors. E3S Web of Confereces 114, 04001 (2019). *Energy Systems Research*, 2019. P. 1-5.
20. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Nguyen V.H. Automatic prognostic regulators of distributed generators. International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, 2018. P. 1-4.