

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 004.942: 621.316:620.91

DOI: 10.17212/2782-2001-2021-1-61-72

О разработке программно-аппаратного комплекса моделирования электросетевого контроллера и объектов микрогенерации на основе возобновляемых источников энергии в сетях НН 0,4 кВ*

**А.С. ГРИЦАЙ^a, Е.В. ЧЕБАНЕНКО^b, В.И. ПОТАПОВ^c,
Е.Г. АНДРЕЕВА^d, Р.Н. ХАМИТОВ^e, И.В. ЧЕРВЕНЧУК^f**

644050, РФ, г. Омск, пр. Мира, 11, Омский государственный технический университет

^a aleksandr.gritsay@gmail.com ^b evchebanenko@gmail.com ^c ivt@omgtu.ru

^d el.tech.omgtu@gmail.com ^e el.tech.omgtu@gmail.com ^f aleksandr.ivt@omgtu.ru

В статье рассмотрены вопросы подключения объектов микрогенерации на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) к электрическим сетям низкого напряжения (НН) 0,4 кВ. Такой способ подключения позволит использовать объекты микрогенерации в качестве сетевых источников энергии, и при этом неиспользованная электрическая энергия, вырабатываемая с помощью объектов микрогенерации, может поставляться в сеть низкого напряжения 0,4 кВ. Предлагаются способы имитационного моделирования процессов распределения электрической энергии в системе электроснабжения с объектами микрогенерации; сформулированы требования к электросетевому контроллеру, используемому для обеспечения подключения объектов микрогенерации в сеть низкого напряжения. Проанализированы возникающие в связи с этим проблемы и предложены пути их решения. Предлагаемые способы разработки программно-аппаратных решений с применением современных методов имитационного моделирования процессов генерации и распределения электрической энергии на основе быстрого прототипирования в среде Matlab Simulink позволяют провести натурные эксперименты с целью моделирования процессов, протекающих в электрических сетях низкого напряжения 0,4 кВ с использованием объектов микрогенерации просьюмеров.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, объекты микрогенерации, система электроснабжения, система накопления энергии, просьюмеры, сетевые контроллеры, сети низкого напряжения, быстрое прототипирование, Simulink

* Статья получена 21 сентября 2020 г.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время во всем мире динамично развиваются направления, связанные с энергетикой, на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ), это вызвано с ограниченностью природных углеводородных ресурсов [1]. Так с принятием Кийотского протокола, а позже Парижского соглашения (в рамках рамочной конвенции ООН об изменении климата) была определена динамика добычи и использования углеводородных ресурсов. Целью соглашения согласно 2-й статье является «активизировать осуществление» Рамочной конвенции ООН по изменению климата, в частности, удерживать рост глобальной средней температуры «намного ниже» $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ и «приложить усилия» для ограничения роста температуры величиной $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ относительно средних значений температуры окружающей среды в 1990 году. В связи с этим возникает два основных направления в развитии потенциала имеющейся энергетической инфраструктуры:

- повышение эффективности использования существующих электроэнергетических систем;

- интеграция ВИЭ в традиционные электроэнергетические системы.

С целью повышения эффективности использования электроэнергетических систем применяются различные подходы, основные цели которых – повышение пропускной способности, сглаживание пиков потребления электрической энергии, совершенствование механизмов управления электроэнергетическими системами. Так, в 2019 году в России был запущен рынок управления спросом на электроэнергию, который активно развивается путем разработки программно-аппаратных комплексов и с помощью методов управления технологическими процессами производств [2]. В части интеграции ВИЭ в традиционные электроэнергетические системы вырабатываются новые механизмы интеграции децентрализованной генерации на основе возобновляемых источников энергии, внедряются интеллектуальные сети Smart Grids [3, 4], а это значит, что в электроэнергетической системе возникают двунаправленные потоки энергии как от традиционных источников энергии к потребителю, так и от микрогенерации (на основе ВИЭ) потребителя в сеть НН 0,4 кВ. В шестидесятые годы прошлого столетия единая энергетическая система нашей страны считалась сложнейшим кибернетическим объектом, воздвигнутым человеческими усилиями, с множеством управляющих воздействий и обратных связей. В настоящее время сложность такой кибернетической системы обусловлена введением новых механизмов управления и интеграции децентрализованных источников генерации на основе ВИЭ и двунаправленных потоков энергии. Всё это способствует развитию новых способов управления и диспетчеризации двунаправленных потоков энергии, применению систем на основе искусственного интеллекта и машинного обучения с целью повышения надежности, качества и пропускной способности существующих электроэнергетических систем.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В России с принятием ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон “Об электроэнергетике” в части микрогенерации 28 декабря 2019 года», принятого Государственной думой 11 декабря 2019 года и одобренного Советом

Федерации 23 декабря 2019 года, для отечественной энергетики возникает ряд новых задач для всех субъектов оптового и розничного рынка электрической энергии и мощности, связанных с технологическим присоединением просьюмеров и обеспечением их работы. Просьюмер – это потребитель электрической энергии, который может управляемым образом осуществлять не только потребление, но и производство (например, с помощью микрогенерации на основе ВИЭ) и хранение электрической энергии. Законодательно определена максимальная мощность объектов микрогенерации для одного домохозяйства, и она не может превышать 15 кВт.

Для сетевых компаний появляются новые задачи, связанные с вопросами технологического присоединения объектов микрогенерации на основе ВИЭ просьюмеров к распределительным сетям НН 0,4 кВ. В настоящее время ПАО «Россети» совместно с АО «Федеральный испытательный центр» и Сколковским институтом науки и технологий ведут работу по моделированию процессов в распределительных сетях НН 0,4 кВ на предмет устойчивой и бесперебойной работы распределительных сетей с учетом присоединенных объектов микрогенерации просьюмеров, а также разрабатывают стандарт на шкаф с присоединения таких объектов микрогенерации и электросетевого контроллер. Полученный функционал обеспечит решение следующих задач:

- контроль качества электрической энергии, вырабатываемой просьюмерами;
- интеграция объектов микрогенерации на основе ВИЭ в сетях НН 0,4 кВ;
- решение задачи параллельной работы силового оборудования различных производителей, инверторов, солнечных и ветроэлектростанций различных производителей.

Кроме того, одной из основных задач является задача по поддержанию качества электрической энергии [5] в сетях 0,4 кВ, поскольку технологически этот параметр обеспечивается сетевыми компаниями [6].

Для гарантирующих поставщиков возникают новые задачи, связанные с построением прогностических моделей и методов краткосрочного прогнозирования потребления электрической энергии для повышения эффективности работы на оптовом рынке электрической энергии и мощности [7]. Такие модели и методы должны учитывать объемы выработки электрической энергии объектами микрогенерации просьюмеров с учетом неопределенностей как режимов работы самих просьюмеров, так и метеорологических факторов [8]. В случае небольшого количества просьюмеров их работа окажет незначительные воздействия на энергосистему. Однако в случае если их количество будет исчисляться сотнями и тысячами, необходимо будет с достаточной точностью определять объемы их выработки / потребления электрической энергии в общем балансе потоков энергии. Кроме того, необходимо обеспечить контроль качества и бесперебойную работу распределительных сетей НН 0,4 кВ с подключенными объектами микрогенерации на основе ВИЭ. Также в случае аварийных режимов работы либо проводимых плановых ремонтных работ на участках распределительных сетей 0,4 кВ, очевидно, может потребоваться отключение децентрализованных объектов микрогенерации просьюмеров, чтобы полностью обесточить линию электропередач НН 0,4 кВ. Все указанные факты влияют на специфические требования к задачам

управления системами распределенной микрогенерации к изменению существующих требований, регламентов работы и поиску новых схемотехнических решений.

Известно, что одной из важнейших задач при построении сетей НН 0,4 кВ, включающей объекты микрогенерации, в том числе на основе ВИЭ с учетом и без учета системы накопления энергии (СНЭ), является защита самих объектов микрогенерации и СНЭ в случае возможных аварийных режимов. При этом возникает большое количество вопросов к построению электроэнергетических систем с различной топологией – радиальной и кольцевой структуры, включающей объекты микрогенерации на основе ВИЭ и разработки и применение специализированных систем автоматики, управления и релейной защиты. Одна из основных проблем состоит в том, что традиционные схемы защиты от перегрузок не способны работать с силовой электроникой объектов микрогенерации, поскольку применяемые схемы защиты от перегрузок не способны отличить ток короткого замыкания (КЗ) микрогенерации от величины тока рабочего режима с применением ограничителей тока КЗ. Например, при использовании ограничителей тока ток короткого замыкания устанавливается равным двум номинальным значениям. Без ограничителя тока ток КЗ обычно в 10 раз больше, чем значение номинального тока. Именно поэтому широко используемые схемы защиты от сверхтоков требуют доработки при включении объектов микрогенерации [9, 10]. Другая известная проблема [11] заключается в том, что существующие средства защиты слишком медленны с точки зрения времени отклика схемы защиты в аварийных режимах работы. Например, применяемые схемы защиты, в которых используются токоограничительные перемычки, имеют время отклика до нескольких секунд. Если ток короткого замыкания будет удерживаться в течение такого времени в распределительных сетях 0,4 кВ, включающих объекты микрогенерации на основе ВИЭ, это может привести к серьезным повреждениям управляющей силовой электроники инвертора, входящего в состав объектов микрогенерации.

2. ПРОТОТИП МОДУЛЬНОЙ АРХИТЕКТУРЫ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ОБЪЕКТОВ МИКРОГЕНЕРАЦИИ

Для построения имитационных моделей для целей моделирования может быть использовано программное обеспечение MATLAB Simulink. Это общепризнанное научным и инженерным сообществами программное обеспечение, которое применяется при моделировании и разработке статических и динамических систем различного уровня сложности. Опубликовано значительное количество работ, посвященных вопросам моделирования научными коллективами объектов микрогенерации, в том числе и гибридных систем на основе энергии воды, солнца и ветра [12–14]. Научным сообществом разработаны и представлены подробные Simulink-модели ветрогенераторов [15, 16], описывающие их динамическое поведение, а также детализированные модели, которые учитывают их конструктивные особенности [17] и механические нагрузки [18]. Предложены гибридные модели с фотоэлектрическими источниками и ветряными турбинами для изучения процесса

проектирования цифровых систем управления [19], модели инверторов различного уровня сложности [20]. Кроме того, на основе Simulink возможно проведение исследований надежности объектов микрогенерации [21], а также разработка имитационных моделей [22], возможна программная и программно-аппаратная симуляция, а это позволяет моделировать различные сценарии работы объектов микрогенерации, анализировать режимы работы СНЭ, моделировать возможные аварийные и предаварийные режимы работы системы, определять логику работы электросетевого контроллера. Программно-аппаратное моделирование предполагает запуск и отладку имитационных моделей в режиме реального времени. При этом необходимо «разнести» элементы Simulink-моделей электросетевого контроллера (РС-1) и объектов микрогенерации (РС-2) (рис. 1) и осуществить запуск на рабочих станциях в режиме реального времени.



Рис. 1. Программно-аппаратное моделирование

Fig. 1. Software-hardware modeling

Функциональные возможности Matlab Simulink позволяют осуществлять взаимодействие с внешним оборудованием в режиме реального времени с использованием различных интерфейсов подключения. При этом возможна отладка работы логики электросетевого контроллера совместно с лабораторными стендами (физические модели), реализующими сеть НН 0,4 кВ и содержащими объекты микрогенерации, включающие ВИЭ с учетом и без учета СНЭ, с разнородной нагрузкой.

Кроме того, с использованием программных средств Simulink возможно осуществлять управление внешним оборудованием. Это дает возможность описать процесс моделирования объектов микрогенерации формально и в перспективе использовать полученные сценарии моделирования при тестировании электросетевого контроллера, но уже в аппаратном исполнении (рис. 2).

Каждый объект или группа объектов Simulink-модели сгенерированы в виде кода языков программирования С, С++ и скомпилированы в исполняемый программный файл. Такой подход позволяет обеспечить эффективную поддержку модульной и расширяемой идеологии в случае расширения функциональных возможностей (рис. 3).

Для целей моделирования объектов микрогенерации необходимо выполнение следующих основных этапов.

А. Разработка модуля программного комплекса для ЭВМ, описывающего объект микрогенерации:

- 1) разработка Simulink-модели объекта микрогенерации;
- 2) генерация С-кода объекта микрогенерации;
- 3) конвертация в библиотеку языка С.

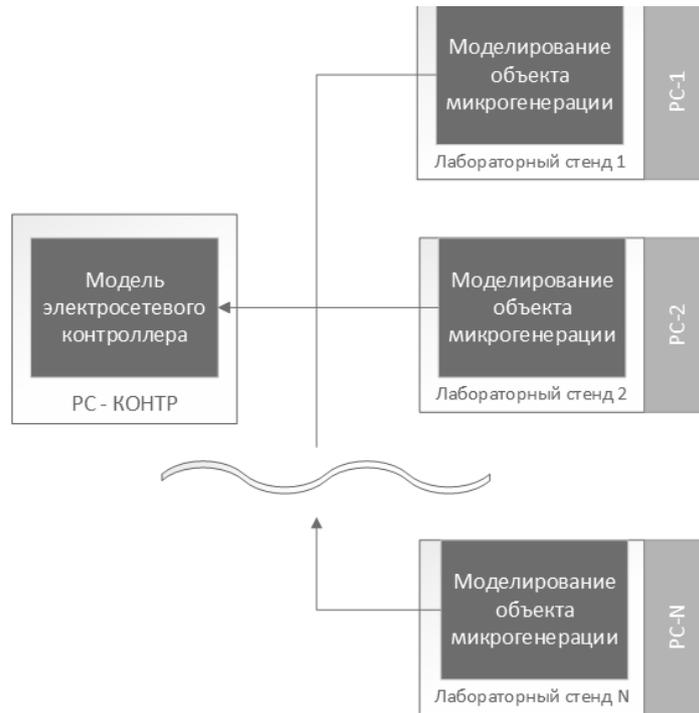


Рис. 2. Программно-аппаратное моделирование объектов микрогенерации с учетом различных возможных композиций

Fig. 2. Software-hardware modeling of microgeneration objects adjusted for various possible compositions

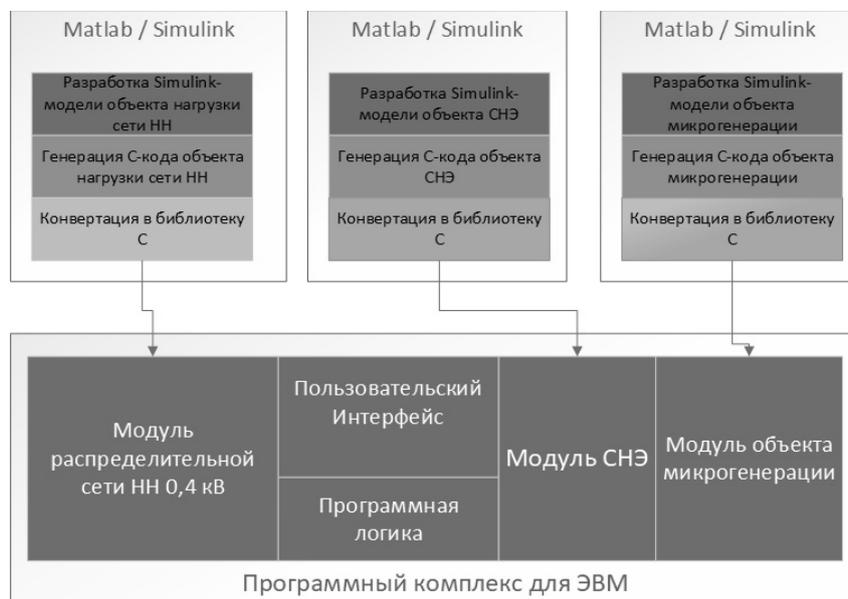


Рис. 3. Прототип модульной архитектуры при моделировании объектов микрогенерации на основе ВИЭ с учетом и без учета СНЭ

Fig. 3. A prototype of the module architecture in designing microgeneration objects based on RES with and without regard for EAS

В. Разработка модуля программного комплекса для ЭВМ, описывающего объект СНЭ:

- 1) разработка Simulink-модели объекта СНЭ;
- 2) генерация С-кода объекта СНЭ;
- 3) конвертация в библиотеку С.

С. Разработка модуля программного комплекса для ЭВМ, описывающего объект нагрузки сети НН:

- 1) разработка Simulink-модели объекта нагрузки распределительной сети НН 0,4 кВ;
- 2) генерация С-кода объекта нагрузки распределительной сети НН 0,4 кВ;
- 3) конвертация в библиотеку С.

Д. Разработка логики взаимодействия модулей программного комплекса, вычислительных алгоритмов и представления результатов.

Е. Разработка пользовательского интерфейса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный подход к моделированию процессов объектов микрогенерации на основе ВИЭ с использованием программно-аппаратной симуляции, в том числе функций электросетевого контроллера, позволит осуществить независимую разработку модулей программного комплекса, оперативную разработку новых библиотек, моделирующих объекты микрогенерации, СНЭ, разноплановую нагрузку, а также сами функции электросетевого контроллера, обеспечить подключение и разработку пользователями собственных модулей в случае такой необходимости.

Программно-аппаратная симуляция с использованием компилируемых модулей – объектов СНЭ – позволит обеспечить функциональную возможность сопряжения с компьютерной имитационной моделью электрической сети 0,4 кВ, включающей различные задаваемые композиции микрогенерации: СЭС–ВЭС, СЭС–СЭС, ДЭС–СЭС, ДЭС–СЭС–СНЭ и др. Программный комплекс также обеспечит возможность обработки внешних сигналов, что реализуется путем внешнего подключения преобразователей физических сигналов, имеющих требуемую сертификацию, и позволит осуществить беспрепятственный переход при отладке программы с математической модели на физическую.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Buchholz B.M., Styczynski Z.* Smart Grids : fundamentals and technologies in electric power systems of the future. – Heidelberg; New York: Springer, 2020. – 408 p.
2. *Третьяков Е.А., Малышева Н.Н.* Управление спросом активных потребителей в распределительных электрических сетях // Вестник Чувашского университета. – 2020. – № 1. – С. 190–202.
3. Smart grid digitalization in Germany by standardized advanced metering infrastructure and green button / J. Meister, N. Ihle, S. Lehnhoff, M. Usler // Application of Smart Grid Technologies. – London; San Diego: Academic Press, 2018. – P. 347–371.
4. *Манусов В.З., Хасанзода Н., Матренин П.В.* Применение методов искусственного интеллекта в задачах управления режимами электрических сетей Smart Grid. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. – 240 с.

5. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: введ. 2014–07–01. – М.: Стандартинформ, 2014. – 16 с.
6. СТО 34.01-39.3-003–2018. Регламент управления качеством электрической энергии в распределительных электрических сетях дочерних зависимых обществ ПАО «Россети»: дата введения 03.05.2018. – М.: ПАО «Россети», 2018. – (Стандарт организации).
7. The method of short-term forecast electricity load with combined a sinusoidal function and an artificial neural network / A. Gritsay, V. Makarov, R. Khamitov, A. Tatevosyan, S. Gritsay // *2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIcon Rus)*. – St. Petersburg, Moscow, 2019. – P. 523–526. – DOI: 10.1109/EIconRus.2019.8656796.
8. Short-term forecast methods of electricity generation by solar power plants and its classification / D.A. Tyunkov, A.S. Gritsay, V.I. Potapov, R.N. Khamitov, A.V. Blohin, L.K. Kondratukova // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. – Vol. 1260, iss. 5. – P. 052033.
9. Yang Z., Chai Y. A survey of fault diagnosis for onshore grid-connected converter in wind energy conversion systems // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2016. – Vol. 66. – P. 345–359.
10. Zhang F., Mu L. A fault detection method of microgrids with grid-connected inverter interfaced distributed generators based on the PQ control strategy // *IEEE Transactions on Smart Grid*. – 2019. – Vol. 10 (5). – P. 4816–4826.
11. Investigate dynamic and transient characteristics of microgrid operation and develop a fast-scalable-adaptable algorithm for fault protection system / D.M. Bui, K.-Y. Lien, S.-L. Chen, Y.-C. Lu, C.-M. Chan, Y.-R. Chang // *Electric Power Systems Research*. – 2015. – Vol. 120. – P. 214–233.
12. Mathematical modeling of hybrid renewable energy system: a review on small hydro-solar-wind power generation / B. Bhandari, S.R. Poudel, K.-T. Lee, S.-H. Ahn // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. – 2014. – Vol. 1, N 2. – P. 157–173.
13. Modeling of solar wind hybrid renewable energy sources in Simulink / S.C. Sahoo, B. Panda, R. Dash, B. Panda, S. Kar // *Proceedings of the International Conference on Soft Computing Systems, ICSCS 2015*. – New Delhi: Springer, 2016. – Vol. 1. – P. 939–947.
14. Зубакин В.А., Карнаухов М.Н., Стариннов С.А. Проектирование, строительство и эксплуатация солнечных и ветровых электростанций: учебное пособие. – М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2019. – 163 с.
15. Moussavi S.Z., Atapour R. Dynamic modelling and control of doubly fed induction generator variable speed wind turbine // *Computational Intelligence and Information Technology, CIIT 2011*. – Berlin; Heidelberg: Springer, 2011. – P. 78–86.
16. Suresh A., Resmi R., Vanitha V. Mathematical model of brushless doubly fed induction generator based wind electric generator // *Power Electronics and Renewable Energy Systems*. – India: Springer, 2015. – P. 1477–1487.
17. Kumar A., Munda J., Singh G. Wind-driven stand-alone six-phase self-excited induction generator transients under different loading conditions // *Electrical Engineering*. – 2015. – Vol. 97. – P. 87–100.
18. System dynamic modelling of three different wind turbine gearbox designs under transient loading conditions / H. Al-Hamadani, T. An, M. King, H. Long // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. – 2017. – Vol. 18, N 11. – P. 1659–1668.
19. Chettibi N., Mellit A. Study on control of hybrid photovoltaic-wind power system using Xilinx system generator // *Solar Photovoltaic Power Plants*. – Singapore: Springer, 2019. – P. 97–120.
20. Muthukumar R., Balamurugan P. A model predictive controller for improvement in power quality from a hybrid renewable energy system // *Soft Computing*. – 2019. – Vol. 23 (8). – P. 2627–2635.
21. Song H., De T. Research on maximum wind energy capturing of doubly fed induction wind generator based on fuzzy control technology // *Future Communication, Computing, Control and Management*. – 2012. – Vol. 141. – P. 43–48.
22. Khan M.J., Mathew L. Fuzzy logic controller-based MPPT for hybrid photo-voltaic/wind/fuel cell power system // *Neural Computing and Applications*. – 2019. – Vol. 31, N 10. – P. 6331–6344.

Грицай Александр Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Информатика и вычислительная техника», заведующий кафедрой «Информатика и вычислительная техника» Омского государственного технического университета. Основные направления научных исследований: прогнозирование электропотребления / выработки электрической энергии GRID систем, математическое моделирование в анализе данных. E-mail: aleksandr.gritsay@gmail.com

Чебаненко Евгений Владимирович, старший преподаватель кафедры «Информатика и вычислительная техника» Омского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – диагностика запорно-регулирующей арматуры. E-mail: evchebanenko@gmail.com

Потапов Виктор Ильич, доктор технических наук, профессор кафедры «Информатика и вычислительная техника». Основное направление научных исследований – разработка моделей, алгоритмов и программного обеспечения для решения оптимизационных задач противоборства технических систем в конфликтных ситуациях. E-mail: ivt@omgtu.ru

Андреева Елена Григорьевна, доктор технических наук, профессор кафедры «Электрическая техника». Основное направление научных исследований – моделирование электромагнитных процессов электротехнических устройств. E-mail: el.tech.omgtu@gmail.com

Хамитов Рустам Нуриманович, доктор технических наук, профессор кафедры «Электрическая техника». Основное направление научных исследований – повышение эффективности электротехнических комплексов и систем. E-mail: ivt@omgtu.ru

Червенчук Игорь Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Информатика и вычислительная техника» Омского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – математическое моделирование в анализе данных. E-mail: ivt@omgtu.ru

Gritsay Alexander S., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department “Informatics and Computing Technology”, Head of the Department of “Informatics and Computer Engineering” of the Omsk State Technical University. The main directions of research: predicting power consumption / generating electrical energy GRID systems, mathematical modeling in data analysis. E-mail: aleksandr.gritsay@gmail.com

Chebhangenko Evgeny V., Senior Lecturer, Department of Informatics and Computer Engineering, Omsk State Technical University. The main direction of scientific research is the diagnosis of shut-off-regulating reinforcement. E-mail: evchebanenko@gmail.com

Potapov Viktor I., Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department “Informatics and Computing Technique”. The main direction of scientific research is the work of models, algorithms and software to solve the optimization tasks of the confrontation of technical systems in conflict situations. E-mail: ivt@omgtu.ru

Andreeva Elena G., Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department “Electrical Technique”. The main direction of scientific research is modeling electromagnetic processes of electrical devices. E-mail: el.tech.omgtu@gmail.com

Khamitov Rustam N., Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department “Electrical Technique”. The main direction of scientific research is to increase the efficiency of electrical complexes and systems. E-mail: ivt@omgtu.ru

Chervenchuk Igor V., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of “Informatics and Computer Engineering” Omsk State Technical University. The main directions of scientific research are mathematical modeling in data analysis. E-mail: ivt@omgtu.ru

On the development of a software and hardware complex for modeling a power grid controller and microgeneration facilities based on renewable energy sources in LV 0,4 kV networks*

A.S. GRITSAY^a, E.V. CHEBANENKO^b, V.I. POTAPOV^c, E.G. ANDREEVA^d,
R.N. KHAMITOV^e, B.V. CHERVENCHUK^f

Omsk State Technical University, 11 Prospect Mira, Omsk, 644050, Russian Federation

^a alexandr.gritsay@gmail.com ^b evchebanenko@gmail.com ^c ivt@omgtu.ru

^d el.tech.omgtu@gmail.com ^e el.tech.omgtu@gmail.com ^f alexandr.ivt@omgtu.ru

Abstract

The article discusses the issues of connecting microgeneration facilities based on renewable energy sources (RES) to electric networks of low voltage (LV) 0,4 kV. This method of connection will allow the use of microgeneration facilities as network sources of energy, and at the same time unused electrical energy generated by micro-generation facilities can be supplied to a low-voltage network of 0,4 kV. Methods of simulation modeling of the processes of electrical energy distribution in the power supply system with microgeneration objects are proposed; the requirements for the power grid controller used to ensure the connection of micro-generation facilities to the low voltage network are formulated. The problems arising in connection with this are analyzed and the ways of their solution are offered. The proposed methods for the development of software and hardware solutions using modern methods of simulation of electrical energy generation and distribution based on rapid prototyping in the Matlab Simulink environment make it possible to carry out field experiments in order to simulate the processes occurring in 0,4 kV low voltage electrical networks using microgeneration objects prosumers.

Keywords: renewable energy sources, microgeneration facilities, power supply system, energy storage system, prosumers, network controllers, low voltage networks, rapid prototyping, Simulink

REFERENCES

1. Buchholz B.M., Styczynski Z. *Smart Grids : fundamentals and technologies in electric power systems of the future*. Heidelberg, New York, Springer, 2020. 408 p.
2. Tretyakov E.A., Malysheva N.N. Upravlenie sprosom aktivnykh potrebitelei v raspredelitel'nykh elektricheskikh setyakh [Managing the demand of active consumers in distribution electric networks]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2020, no. 1, pp. 190–202. (In Russian).
3. Meister J., Ihle N., Lehnhoff S., Uslar M. Smart grid digitalization in Germany by standardized advanced metering infrastructure and green button. *Application of Smart Grid Technologies*. London, San Diego, Academic Press, 2018, pp. 347–371.
4. Manusov V.Z., Khasanzoda N., Matrenin P.V. *Primenenie metodov iskusstvennogo intellekta v zadachakh upravleniya rezhimami elektricheskikh setei Smart Grid* [Application of artificial intelligence methods in the problems of controlling the modes of electric networks Smart Grid]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2019. 240 p.
5. GOST 32144-2013. *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya* [State Standard 32144-2013. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 16 p.

* Received 21 September 2020.

6. STO 34.01-39.3-003–2018. *Reglament upravleniya kachestvom elektricheskoi energii v raspredelitel'nykh elektricheskikh setyakh dochernikh zavisimykh obshchestv PAO "Rosseti"* [Standard organization 34.01-39.3-003–2018. Regulations for managing the quality of electrical energy in the distribution grids of subsidiaries of PJSC Rosseti]. Moscow, Rosseti Publ., 2018.

7. Gritsay A., Makarov V., Khamitov R., Tatevosyan A., Gritsay S. The method of short-term forecast electricity load with combined a sinusoidal function and an artificial neural network. *2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, St. Petersburg, Moscow, 2019, pp. 523–526. DOI: 10.1109/EIConRus.2019.8656796.

8. Tyunkov D.A., Gritsay A.S., Potapov V.I., Khamitov R.N., Blohin A.V., Kondratukova L.K. Short-term forecast methods of electricity generation by solar power plants and its classification. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1260, iss. 5, p. 052033.

9. Yang Z., Chai Y. A survey of fault diagnosis for onshore grid-connected converter in wind energy conversion systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 66, pp. 345–359.

10. Zhang F., Mu L. A fault detection method of microgrids with grid-connected inverter interfaced distributed generators based on the pq control strategy. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, vol. 10 (5), pp. 4816–4826.

11. Bui D.M., Lien K.-Y., Chen S.-L., Lu Y.-C., Chan C.-M., Chang Y.-R. Investigate dynamic and transient characteristics of microgrid operation and develop a fast-scalable-adaptable algorithm for fault protection system. *Electric Power Systems Research*, 2015, vol. 120, pp. 214–233.

12. Bhandari B., Poudel S.R., Lee K.-T., Ahn S.-H. Mathematical modeling of hybrid renewable energy system: A review on small hydro-solar-wind power generation. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2014, vol. 1, no. 2, pp. 157–173.

13. Sahoo S.C., Panda B., Dash R., Panda B., Kar S. Modeling of solar wind hybrid renewable energy sources in Simulink. *Proceedings of the International Conference on Soft Computing Systems, ICSCS 2015*. New Delhi, Springer, 2016, vol. 1, pp. 939–947.

14. Zubakin V.A., Karnaukhov M.N., Starinnov S.A. *Proektirovanie, stroitel'stvo i ekspluatatsiya solnechnykh i vetrovykh elektrostantsii* [Design, construction and operation of solar and wind power plants]. Moscow, RSU of Oil and Gas Publ., 2019. 163 p.

15. Moussavi S.Z., Atapour R. Dynamic modelling and control of doubly fed induction generator variable speed wind turbine. *Computational Intelligence and Information Technology, CIIT 2011*. Berlin, Heidelberg, Springer, 2011, pp. 78–86.

16. Suresh A., Resmi R., Vanitha V. Mathematical model of brushless doubly fed induction generator based wind electric generator. *Power Electronics and Renewable Energy Systems*. India, Springer, 2015, pp. 1477–1487.

17. Kumar A., Munda J., Singh G. Wind-driven stand-alone six-phase self-excited induction generator transients under different loading conditions. *Electrical Engineering*, 2015, vol. 97, pp. 87–100.

18. Al-Hamadani H., An T., King M., Long H. System dynamic modelling of three different wind turbine gearbox designs under transient loading conditions. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2017, vol. 18, no. 11, pp. 1659–1668.

19. Chettibi N., Mellit A. Study on control of hybrid photovoltaic-wind power system using Xilinx system generator. *Solar Photovoltaic Power Plants*. Singapore, Springer, 2019, pp. 97–120.

20. Muthukumar R., Balamurugan P. A model predictive controller for improvement in power quality from a hybrid renewable energy system. *Soft Computing*, 2019, vol. 23 (8), pp. 2627–2635.

21. Song H., De T. Research on maximum wind energy capturing of doubly fed induction wind generator based on fuzzy control technology. *Future Communication, Computing, Control and Management*, 2012, vol. 141, pp. 43–48.

22. Khan M.J., Mathew L. Fuzzy logic controller-based MPPT for hybrid photo-voltaic/wind/fuel cell power system. *Neural Computing and Applications*, 2019, vol. 31, no. 10, pp. 6331–6344.

Для цитирования:

О разработке программно-аппаратного комплекса моделирования электросетевого контроллера и объектов микрогенерации на основе возобновляемых источников энергии в сетях НН 0,4 кВ / А.С. Грицай, Е.В. Чебаненко, В.И. Потапов, Е.Г. Андреева, Р.Н. Хамитов, И.В. Червенчук // Системы анализа и обработки данных. – 2021. – № 1 (81). – С. 61–72. – DOI: 10.17212/2782-2001-2021-1-61-72.

For citation:

Gritsay A.S., Chebanenko E.V., Potapov V.I., Andreeva E.G., Khamitov R.N., Chervenчук B.V. O razrabotke programmno-apparatnogo kompleksa modelirovaniya elektrosetevogo kontrollera i ob"ektov mikrogeneratsii na osnove vozobnovlyaemykh istochnikov energii v setyakh NN 0,4 kV [On the development of a software and hardware complex for modeling a power grid controller and microgeneration facilities based on renewable energy sources in LV 0,4 kV networks]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and data processing systems*, 2021, no. 1 (81), pp. 61–72. DOI: 10.17212/2782-2001-2021-1-61-72.