

УДК 621.31

DOI: 10.53015/18159958_2025_21_3_49

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ РАСПРЕДЕЛЁННОЙ ГЕНЕРАЦИИ НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В SIMULINK

RESEARCH INTO PROCESSES IN DISTRIBUTED GENERATION SYSTEMS BASED ON SIMULATION MODELING IN SIMULINK

©2025

Сороченко Павел Александрович¹, аспирант кафедры электрооборудования
Зацепин Евгений Петрович², кандидат технических наук, заведующий
кафедрой электрооборудования

Зацепина Виолетта Иосифовна³, доктор технических наук, профессор кафед-
ры электрооборудования

Sorochenko Pavel Alexandrovich¹, postgraduate student, Department
of Electrical Equipment

Zatsepin Evgeny Petrovich², candidate of Technical Sciences, Head of
the Department of Electrical Equipment

Zatsepina Violetta Iosifovna³, doctor of Technical Sciences, Professor
of the Department of Electrical Equipment

Липецкий государственный технический университет, Липецк (Россия)
Lipetsk State Technical University, Lipetsk (Russia)

E-mail: sorochenko.pavel48@gmail.com

E-mail: ezats@mail.ru

E-mail: vizatsepina@yandex.ru

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0028-3262>²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9444-5753>³ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8347-4479>

Аннотация: Системы распределённой генерации представляют собой перспективное направление в электроэнергетике, особенно в сфере жилищно-коммунального хозяйства. Их развитие сдерживается высокой стоимостью микрогенерации и недостатком инструментов для визуального моделирования режимов работы. Имитационное моделирование, в частности в среде Simulink, позволяет более точно анализировать функционирование таких систем и оценивать их эффективность.

Ключевые слова: распределённая генерация, микрогенерация, электроэнергетика, имитационное моделирование, Simulink, жилищно-коммунальное хозяйство, моделирование режимов работы, эффективность системы.

Для цитирования: Сороченко П.А. Исследование процессов в системе распределённой генерации на основе имитационного моделирования в Simulink / П.А. Сороченко, Е.П. Зацепин, В.И. Зацепина // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2025. – Т. 21, № 3 (79). – С. 49–56. – DOI 10.53015/18159958_2025_21_3_49.

Abstract: Distributed generation systems are a promising area in the electric power industry, especially in the housing and utilities sector. Their development is hampered by the high cost of microgeneration and the lack of tools for visual modeling of operating modes. Simulation modeling, particularly in the Simulink environment, allows for more accurate analysis of the functioning of such systems and assessment of their efficiency.

Keywords: distributed generation, microgeneration, electric power engineering, simulation modeling, Simulink, housing and utilities, modeling of operating modes, system efficiency.

For citation: Sorochenko P. A. Research into processes in a distributed generation system based on simulation modeling in Simulink / P. A. Sorochenko, E. P. Zatsepin, V. I. Zatsepina // News of Higher Education Institutions of Chernozem. – 2025. – Vol. 21, № 3 (79). – P. 49–56. – DOI 10.53015/18159958_2025_21_3_49.

ВВЕДЕНИЕ

Распределённая генерация рассматривается как одно из ключевых направлений развития электроэнергетики, ориентированное на повышение надёжности и энергоэффективности локальных систем электроснабжения. Наиболее распространённым решением при построении таких систем является использование возобновляемых источников энергии — солнечных батарей, ветровых установок и других, — работающих в комплексе с аккумуляторными накопителями для сглаживания колебаний вырабатываемой мощности и обеспечения устойчивости энергоснабжения.

Проектирование автономной или гибридной системы электроснабжения отдельного здания, использующей возобновляемые источники энергии, обычно не вызывает значительных затруднений. Однако при масштабировании системы, то есть при увеличении числа взаимодействующих источников и элементов хранения энергии, существенно возрастает сложность расчётных процедур. Это обусловлено необходимостью учёта большого количества взаимозависимых параметров, влияющих на режимы

работы и эффективность функционирования всей системы [1].

В подобных условиях применение традиционных аналитических методов становится недостаточно эффективным. Поэтому особую значимость приобретает использование инструментов имитационного моделирования, позволяющих воспроизводить динамические процессы в системе распределённой генерации, оценивать влияние различных факторов на её работу и оптимизировать параметры проектируемых энергосистем.

ТЕОРИЯ ВОПРОСА

Для исследования режимов работы разработана модель системы распределённой генерации, рассчитанная на одну улицу коттеджного поселка (рис. 1). Система включает 10 идентичных комплектов солнечных панелей.

Использование одинаковых панелей, несмотря на различие электрических нагрузок в сети 0,4 кВ, обусловлено единым режимом эксплуатации и необходимым запасом электроэнергии для каждого потребителя, превышающим суммарное потребление подключённых устройств [2].

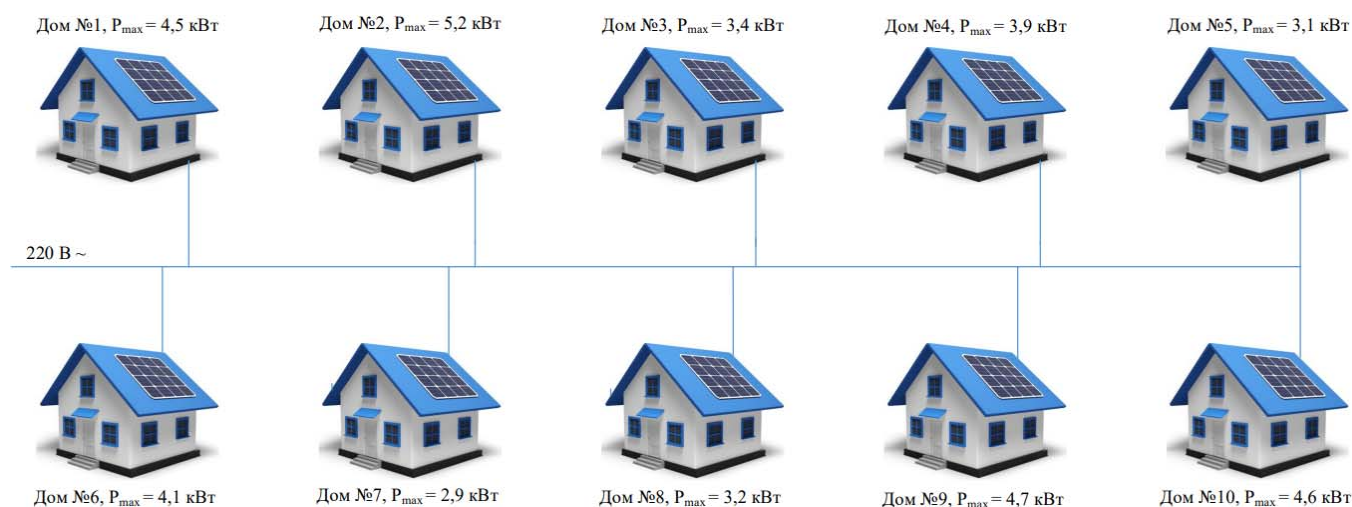


Рис. 1. Конфигурация системы распределенной генерации
Fig. 1. Configuration of a distributed generation system

Если рассматривать систему электро-снабжения отдельного дома (рис. 2), её структура включает:

- 1) устройства генерации электроэнергии (солнечные панели, ветрогенераторы, дизельные или бензиновые генераторы и др.);
- 2) зарядное устройство аккумуляторной батареи (АБ) с контроллером напряжения;
- 3) аккумуляторную батарею, состоящую из нескольких аккумуляторов напряжением 2–12 В, суммарное напряжение составляет около 220 В;
- 4) инвертор, преобразующий постоянное напряжение 12 В в переменное 220/380 В.

Ключевым аспектом является синхронизация напряжений всех инверторов, под-

ключённых к общей сети. На современном рынке представлены автономные инверторы с функцией автоматической синхронизации напряжения, что обеспечивает корректную работу электрооборудования при минимальном времени установления режима. Simulink позволяет моделировать устройства и алгоритмы синхронизации различными методами.

Однако внедрение этих элементов значительно усложняет модель, повышает требования к вычислительной мощности и снижает скорость моделирования. В целях оптимизации разработанной модели процесс синхронизации напряжений не учитывался.

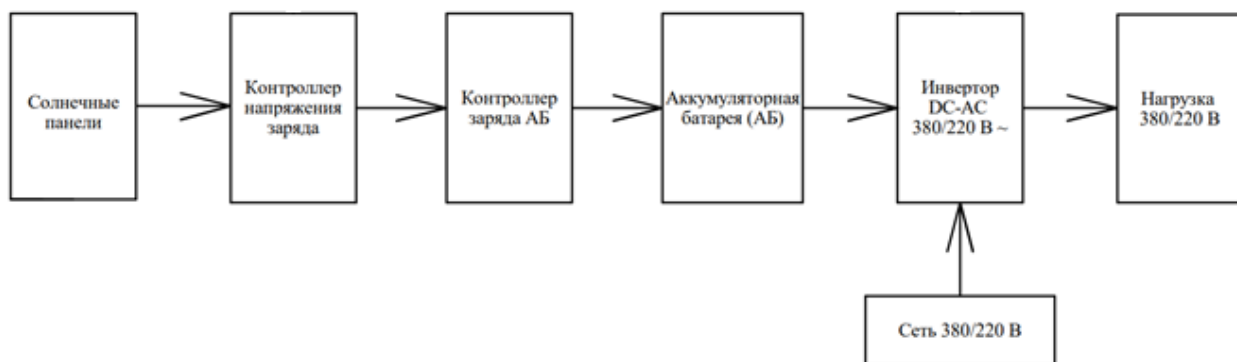


Рис. 2. Блок-схема системы электроснабжения дома
Fig. 2. Block diagram of the home power supply system

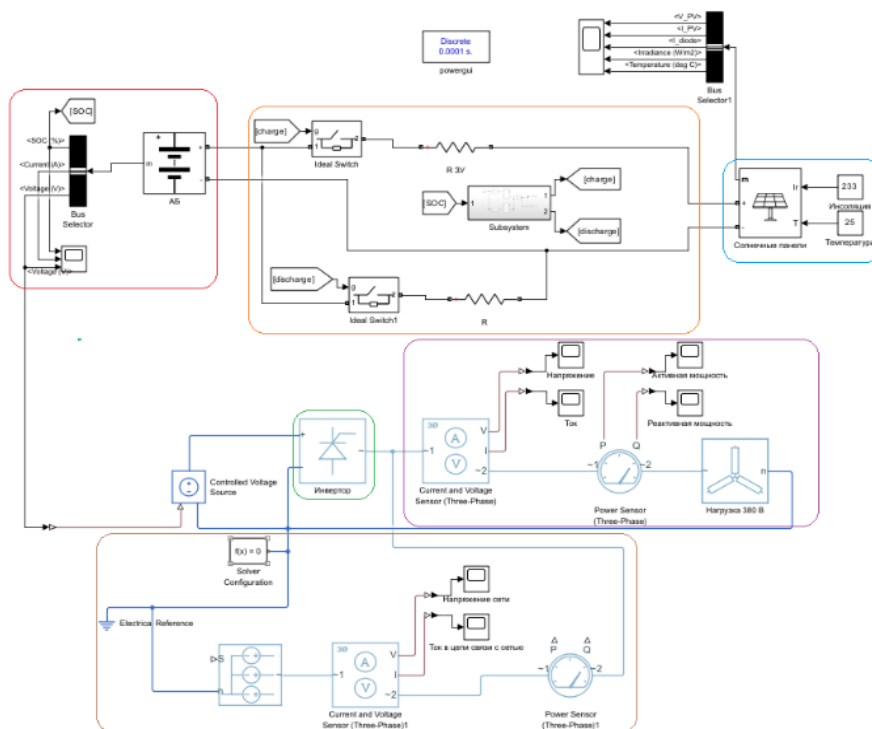


Рис. 3. Модель системы электроснабжения дома
Fig. 3. Model of a home power supply system

Система контроля и управления, интегрированная в модель, обеспечивает сбор информации о состоянии работы всех элементов системы и позволяет координировать распределение энергии.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

На рис. 3 представлена модель электропитания отдельного дома.

Основные элементы системы выделены цветом:

- Голубым показан блок солнечных панелей с учётом инсоляции и температуры окружающей среды. Средние значения инсоляции и температуры для июля 2023 г. в г. Воронеже составили 233 Вт/м^2 и 25°C соответственно.
- Оранжевым выделен контроллер заряда АБ, работающий по алгоритму производителей: минимальный заряд — 20 % от номинальной емкости, максимальный —

80 %. При достижении нижнего порога нагрузка отключается, а энергия солнечных панелей направляется исключительно на зарядку батареи [3].

- Красным выделена аккумуляторная батарея с отображением ключевых параметров (уровень заряда, напряжение, ток).

- Зелёным обозначен инвертор, преобразующий постоянное напряжение в переменное.

- Коричневым — участок подключения к сети.

- Фиолетовым — блок электроприёмников.

Такое построение модели позволяет не только обеспечивать питание дома, но и при необходимости направлять избыточную электроэнергию в сеть, обеспечивая гибкость и устойчивость системы. На рис. 4 представлен участок модели всей системы электропитания, построенной по принципу распределенной генерации.

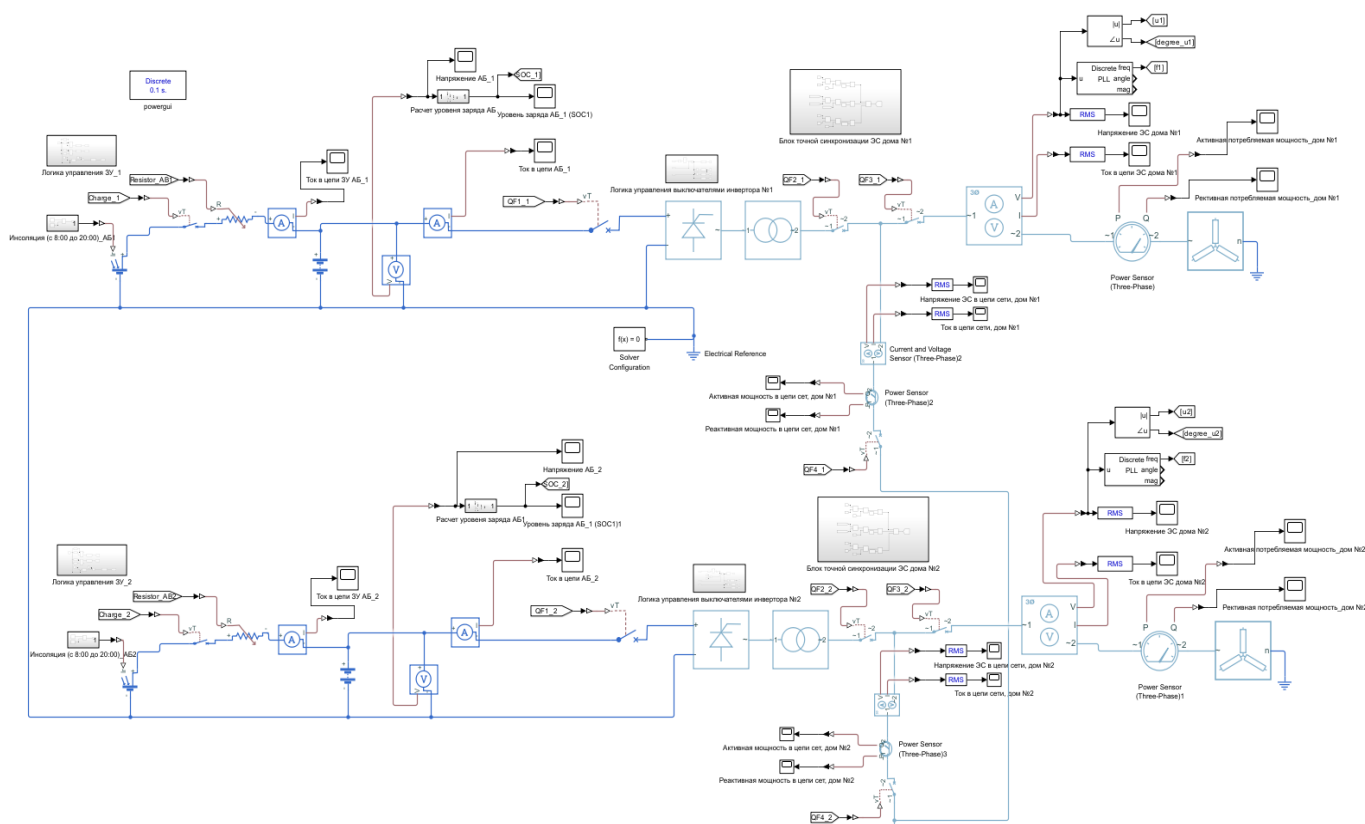


Рис. 4. Участок модели системы электропитания
Fig. 4. Section of the power supply system model

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В рамках проведённого исследования был выполнен анализ различных режимов функционирования разработанной модели системы распределённой генерации. В качестве примера рассмотрен режим, характеризующийся циклическим разрядом и последующим зарядом аккумуляторной батареи (АБ) при сохранении питания электроприёмников от внешней сети [4].

При моделировании были приняты следующие условия:

1. Инсоляция в течение дня считается постоянной и составляет примерно 233 Вт/м².

2. Во время зарядки АБ питание электроприёмников осуществляется исключительно от внешней сети.

3. Ток зарядки АБ принят на уровне 10–12 А в соответствии с рекомендациями производителей.

4. Постоянная нагрузка системы составляет 1 кВт.

5. Емкость АБ – 200 А·ч.

6. В первом случае моделируются солнечные панели с $I_{\text{раб}} = 26,4$ А, во втором случае с $I_{\text{раб}} = 18,6$ А.

На основе этих параметров были построены графики, иллюстрирующие динамику

разряда и заряда АБ, а также взаимодействие с внешней сетью (рис. 5). Анализ полученных данных позволяет оценить эффективность работы системы в заданных условиях и выявить ключевые факторы, влияющие на её стабильность и надёжность.

Результаты моделирования режима работы сети при условии установки солнечных модулей с $I_{\text{раб}} = 18,6$ А приведены на рис. 6.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Первое исследование с аккумуляторными батареями 204 В, 200 А·ч и солнечными панелями с номинальным током 26,4 А показало наличие плато заряда АБ на уровне 80 %, что указывает на неполное использование потенциала оборудования. Длительность плато составила около трех часов, что снижает экономическую эффективность.

После замены панелей на модели с током 18,6 А (стоимость на 35 % ниже) плато отсутствует, а цикл заряд-разряд обеспечивает положительную остаточную емкость, что свидетельствует о полном использовании оборудования. Площадь панелей при этом уменьшается с 180 м² до 140 м², что делает конфигурацию более практичной для стандартных крыш домов.

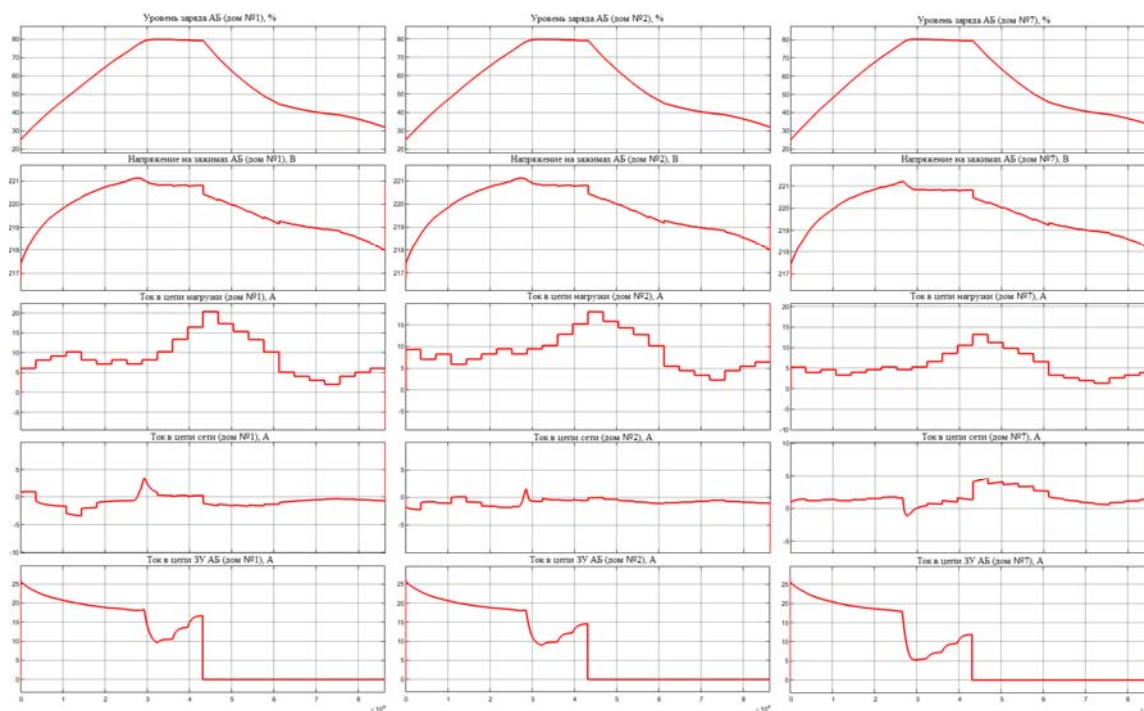


Рис. 5. Результаты моделирования сети электроснабжения (1-й вариант конфигурации)
Fig. 5. Results of power supply network simulation (configuration option 1)

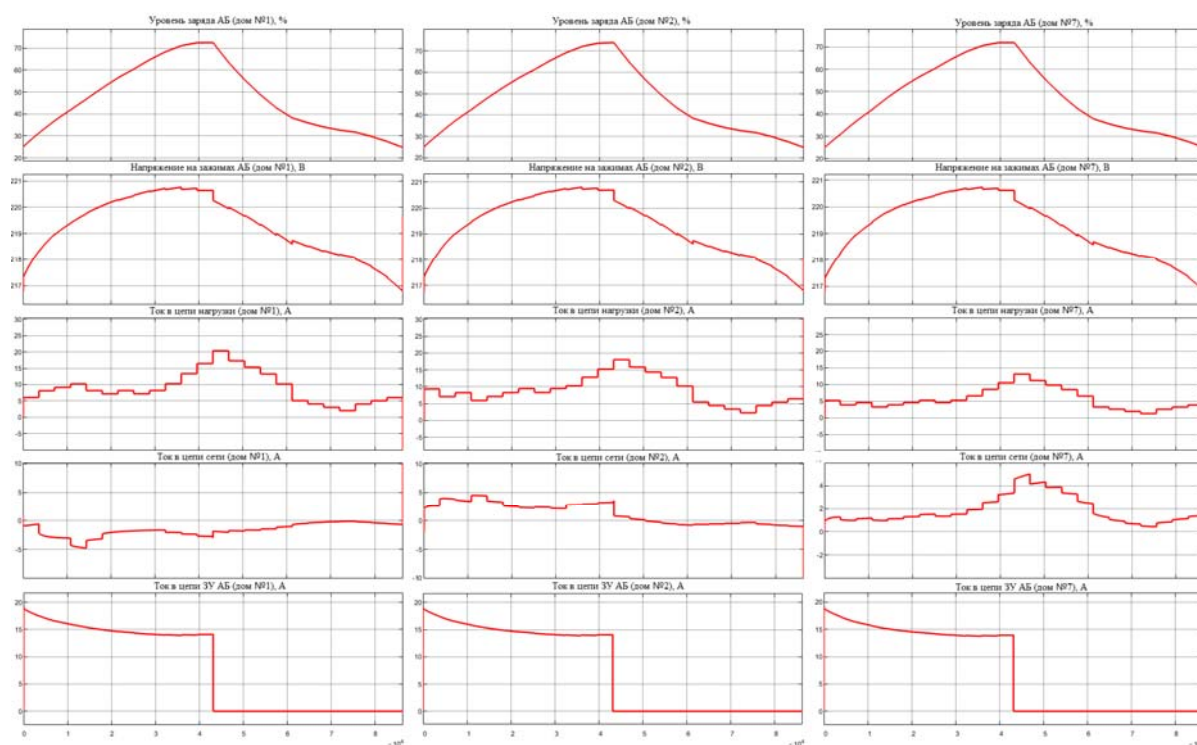


Рис. 6. Результаты моделирования сети электроснабжения (2-й вариант конфигурации)
Fig. 6. Results of power supply network simulation (configuration option 2)

Разработанная модель представляет собой эффективный инструмент для оценки работы сетей с распределённой генерацией на примере жилых домов, оборудованных солнечными панелями и соответствующими комплектами аккумуляторных батарей и инверторов. На основе анализа двух различных конфигураций оснащения домов проведено исследование режимов работы системы и выявлен наиболее оптимальный и экономически эффективный вариант подбора оборудования. Таким образом, предложенная модель позволяет проводить всесторонний анализ динамических режимов работы сети с распределённой генерацией и обосновывать выбор оптимальной конфигурации оборудования при проектировании подобных энергосистем.

ВЫВОДЫ

Распределённая генерация — перспективное направление в электроэнергетике, особенно для жилищно-коммунального хозяйства, но её развитие сдерживается высокой стоимостью микрогенерации и отсутствием эффективных инструментов визу-

ального моделирования. В работе предложено использование имитационного моделирования в среде Simulink для анализа и оптимизации режимов работы таких систем.

Основные результаты:

- Разработана модель системы распределённой генерации для коттеджного посёлка, включающая 10 комплектов солнечных панелей, аккумуляторные батареи, инверторы и систему управления.

- Проведено сравнение двух конфигураций солнечных панелей (с токами 26,4 А и 18,6 А). Вторая конфигурация показала более высокую экономическую эффективность: отсутствие «плато» заряда, полное использование оборудования, снижение площади панелей и стоимости на 35 %.

- Модель позволяет оценивать динамические режимы работы, оптимизировать параметры оборудования и обосновывать выбор наиболее эффективных решений для проектирования энергосистем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мокеев А.В. Интеллектуальные электронные устройства для цифровых под-

- станций 110(35)/6 кВ // Сборник материалов Международной научно-технической конференции «Современные тенденции развития систем релейной защиты и автоматизации энергосистем». Сочи, 2015. С. 40-48.
2. СТО 56947007-29.240.10.256-2018. Технические требования к аппаратно-программному обеспечению и электрооборудованию CPS: стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС»: официальная публикация: утвержден и введен в действие приказом ОАО «ФСК ЕЭС» от 21.09.2018 № 355: введен впервые: дата введения 21.09.2018 / разработан ООО «Интер РАО - Инжиниринг ООО, ОАО «ГЦК ОСЭ». Москва, 2018. 130 с.
3. Инновационные технологии в электроэнергетическом комплексе // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: матер. международной научно-практической конференции, Воронеж, 9-10 июня 2020 г. Воронеж : Воронежский государственный университет, 2020. С. 451-455.
4. Чичев С.И. Методология проектирования цифровой подстанции в формате новых технологий. Москва : Спектр, 2014. С. 228.
5. Обработка и передача полномочий для классических и цифровых электрических подстанций: монография; Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «УТ «Дубна», филиал «Протвино», кафедра информационных технологий. Москва : Прометей, 2016. 235 с.: ил., табл.; 20 см. ISBN 978-5-9908018-7-5.
6. Куксин А.В. Предпосылки создания и основные технические решения первой цифровой подстанции 110 кВ «Спутник» в Воронеже // Научно-практический бюллетень «Энергетика-XXI век». Воронеж : НПО «Энергия», 2020. С. 67-70.
7. Иванов В.А. Особенности испытаний релейных устройств защиты и автоматики на цифровых подстанциях, поддерживающих стандарт IEC 61850 // Сборник актуальных проблем прикладной и школьной информатики. Чебоксары : ЧГУ, 2020. С. 321-325
8. Куксин А.В., Сороченко П.А. Кластерные цифровые подстанции. Новые технологии в цифровизации электроэнергетики // Труды высших учебных заведений. Том 18. Липецк : ЛГТУ, 2022. С. 75-82.
9. Томас Р., Вуянич А., Сюй Д.З., Сьедин Дж.-Э., Ян М., Пауэрс Н. «Нестандартные измерительные трансформаторы, включение цифровых подстанций в сеть будущего», IEEE // Конференция по передаче и распределению электроэнергии, 2016.
10. Федосеев А.М., Федосеев М.А. Релейная защита электрических систем. Москва : Энергоатомиздат, 1992. 528 с. ISBN 5-283-01171-2.
11. Рожнов Е.И. Электронные трансформаторы тока и напряжения для полного мониторинга энергосистем // ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение. 2014. № 3(24). С. 100-103.
12. Наволочный А.А., Нудельман Г.С., Онисова О.А. Применение технологий моделирования в развитии инновационных направлений электроэнергетики // Релейщик. 2014. № 2. С. 16-19.
13. Сривастава Н., Хинтон Г., Крижевский А., Суцкевер И., Салахутдинов Р. Dropout: простой способ предотвратить переобучение нейронных сетей // Journal of Machine Learning Research. Т. 15, № 56. С. 1929–1958, 2014. URL <http://jmlr.org/papers/v15/srivastava14a.html>
14. Зацепина В.И., Зацепин Е.П., Шачнев О.Я. Анализ качества электроэнергии при наличии частотных искажений // E3s web of conferences. Прага, Чехия : EDP Sciences, 2020. С. 10-19.

REFERENCES

1. Mokeev A.V. Intelligent electronic devices for digital substations 110(35)/6 kV // Collection of International scientific and Technical conf. "Modern trends in the development of relay protection systems and automation of power systems". Sochi, 2015. pp. 40-48.

2. STO 56947007-.29.240.10.256-2018. Technical requirements for hardware and software and electrical equipment of the CPS: standard of the organization of FGC UES PJSC: official publication: approved and put into effect by Order of FGC UES PJSC dated 21.09.2018 № 355: introduced for the first time: date of introduction 21.09.2018 / developed by Inter RAO - Engineering LLC, JSC STC FGC UES". Moscow, 2018. 130 p.
3. Innovative technologies in the electric power complex // Energy efficiency and energy conservation in modern production and society: mater. international scientific Practical conference, Voronezh, June 9-10, 2020 Voronezh : Voronezh State University, 2020. pp. 451-455.
4. Chichev S.I. Methodology of designing a digital substation in the format of new technologies. Moscow : Spectrum, 2014. p. 228.
5. Processing and transmission of credentials for classical and digital electrical substations: monograph; State budgetary Educational Institution Higher. education "Ut "Dubna", Phil "Protvino", Department of Information Technology. Moscow : Prometheus, 2016. 235 p.: ill., table; 20 cm. ISBN 978-5-9908018-7-5.
6. Kuksin A.V. Prerequisites for the creation and main technical solutions of the first 110 kV digital substation "Sputnik" in Voronezh // Scientific and practical bulletin Energy-XXI century. Voronezh : NPO Energia, 2020. pp. 67-70.
7. Ivanov V.A. Features of testing relay protection and automation devices on digital substations that support the IEC 61850 standard // Collection of actual problems of applied and school informatics. Cheboksary : ChSPU, 2020. pp. 321-325
8. Kuksin A.V., Sorochenko P. A. Cluster digital substations. New technologies in the digitalization of the electric power industry // Conduct of higher educational institutions. Volume 18. Lipetsk : LSTU, 2022. p. 75-82.
9. Thomas R., Vujanich A., Xu D.Z., Sjodin J.-E., Yang M., Powers N. Unconventional measuring transformers, inclusion of digital substations in the network of the future // IEE, Conference on Transmission and Distribution, 2016.
10. Fedoseev A.M., Fedoseev M.A. Relay protection of electric power systems. Москва : Energoatomizdat, 1992. 528 p. ISBN 5-283-01171-2.
11. Rozhnov E.I. Electronic current and voltage transformers for complete monitoring of power grids // ELECTRIC POWER. Transmission and Distribution. 2014. № 3(24). pp. 100-103.
12. Navolochny A.A., Nudelman G.S., Onisova O.A. Application of modeling technologies in the development of innovative areas of the electric power industry // Relayschik. 2014. № 2. pp. 16- 19.
13. Srivastava N., Hinton G., Krizhevsky A., Sutskever I., Salakhutdinov R. Drop-out: A simple way to prevent overfitting of neural networks // Journal of Machine Learning Research. Vol. 15, № 56. pp. 1929–1958, 2014. URL <http://jmlr.org/papers/v15/srivastava14a.html>
14. Zatsepina V.I., Zatsepina E.P., Shachnev O.Ya. Analysis of power quality in the presence of frequency distortions // E3s web of conferences. Prague, Czech Republic: EDP Sciences, 2020. Pp. 10-19.