

## Физическая модель потребителя электрической энергии в составе комплекса полунатурного моделирования автономной системы электроснабжения

*С.В. Буш, О.В. Архипова, В.З. Ковалев*

*Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск*

**Аннотация:** В работе представлена физическая модель потребителя электрической энергии, предназначенная для воспроизведения стохастического характера фазной несимметрии суточных графиков электропотребления автономных объектов и использования в составе комплекса полунатурного моделирования автономных систем электроснабжения при разработке и отладке систем управления гибридными электростанциями. Рассмотрена архитектура комплекса, включающего математические модели источников генерации, системы управления и физическую модель потребителя электроэнергии. Предложен подход к формированию активно-реактивной нагрузки на основе дискретно-коммутируемых активных и индуктивных элементов, реализован механизм подбора конфигурации нагрузки по заданным параметрам режима электропотребления и приведён метод масштабирования режимов на основе теории подобия.

**Ключевые слова:** физическая модель, автономные системы электроснабжения, полунатурное моделирование, гибридные электростанции, Арктическая зона, Крайний Север, энергоснабжение удаленных территорий, активно-реактивная нагрузка, фазная несимметрия, суточные графики нагрузки, теория подобия.

### Введение

Электроснабжение Арктической Зоны и Крайнего Севера (АЗиКС) в основном представлено децентрализованными системами [1]. Большая часть потребителей электрической энергии в этой зоне – поселения с малой установленной мощностью [2]. Они характеризуются выраженной стохастичностью: отсутствуют явно выраженные суточные максимумы и минимумы графиков нагрузки, часто происходят резкие скачки и провалы мощности [3, 4]. Пример такого потребления электрической энергии представлен на рисунке 1, на котором изображен фрагмент суточного графика потребления электроэнергии поселком Никулкина (ХМАО-Югра). На нем видно, что в разные

---

моменты времени каждая фаза, в сравнении с двумя другими фазами, достигает или минимального или максимального значения потребления.

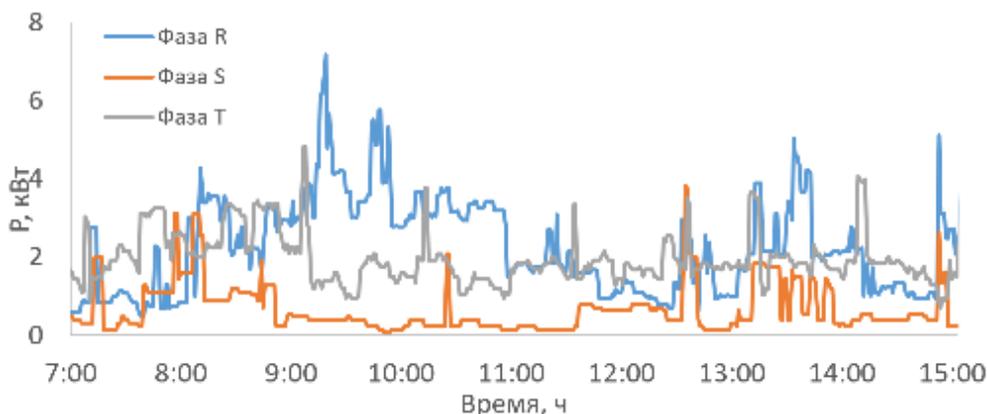


Рисунок 1. – Фрагмент суточного графика потребления электроэнергии в п.Никулкина (Ханты-Мансийского автономный округ – Югра)

Аналогичная неопределённость наблюдается и со стороны источников генерации. Для АЗиКС характерна стохастичность, сезонная и суточная неравномерность выработки энергии фотоэлектрическими станциями [5, 6] и ветровыми электростанциями [7, 8].

Совокупность указанных факторов существенно усложняет управление гибридными электростанциями и требует разработки алгоритмов, обеспечивающих снижение расхода топлива, повышение доли использования возобновляемых источников энергии и продление ресурса накопителей энергии. Разработка таких алгоритмов требует их экспериментальной проверки. Однако отладка алгоритмов управления на реальных объектах связана с рисками и затратами. Для решения данной проблемы коллектив Югорского государственного университета занимается разработкой комплекса полунатурного моделирования, предназначенного для исследования режимов



работы автономных электростанций с дизельной электростанцией (ДЭС) и солнечной электростанцией (СЭС).

### **Описание комплекса полунатурного моделирования**

Разработка указанного комплекса обусловлена необходимостью экспериментальной проверки алгоритмов управления в условиях, приближенных к эксплуатации автономных энергосистем.

Использование полунатурного стенда в условиях университетской лаборатории обусловлено рядом причин. Реализация натурной дизельной электростанции связана с большими габаритами оборудования, повышенными требованиями к безопасности, а также с невозможностью эксплуатации дизельных установок в здании учебного корпуса и сложностью организации эксперимент в условиях реальной энергетической системы.

В то же время применение исключительно математического моделирования не позволяет в полной мере учесть особенности работы реальных накопителей энергии, силовой электроники и систем управления. Для корректного тестирования алгоритмов управления принципиально важно учитывать реальные ограничения оборудования и обеспечить возможность сопряжения разрабатываемых алгоритмов с системой управления действующих электростанций.

В связи с этим был выбран полунатурный подход, сочетающий математическое моделирование отдельных подсистем с физической реализацией ключевых элементов энергосистемы. Аналогичные подходы применяются при создании экспериментальных энергетических установок, предназначенных для проверки алгоритмов управления и режимов работы энергосистем в

лабораторных условиях [8, 9]. Структурная схема полунатурного комплекса представлена на рисунке 2.

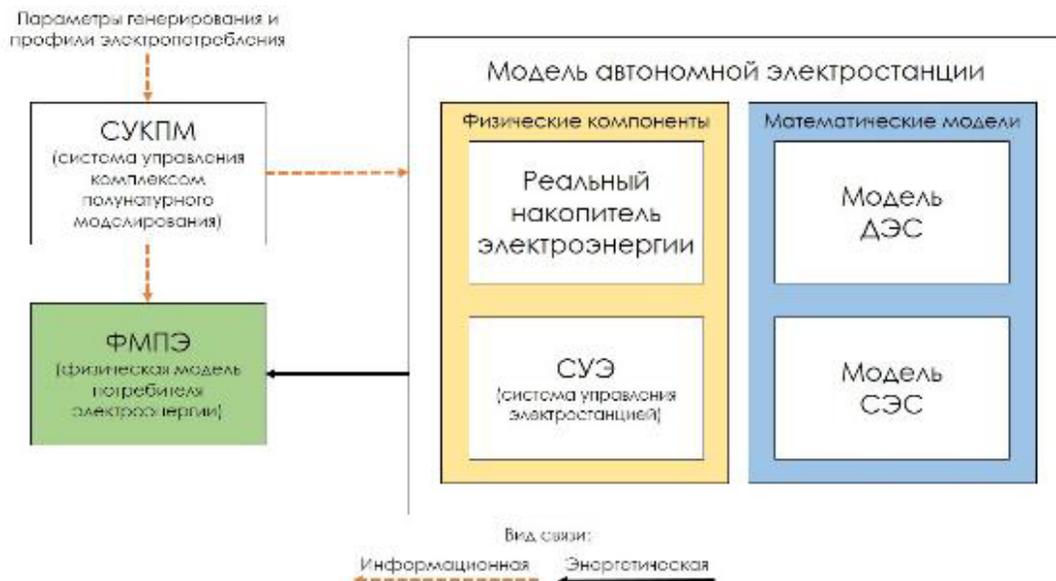


Рисунок 2. – Структурная схема комплекса полунатурного моделирования

Полунатурный стенд включает модель автономной электростанции, физическую модель потребителя электроэнергии (ФМПЭ) и систему управления комплексом полунатурного моделирования (СУКПМ) с которой взаимодействует пользователь (рис. 2). Через СУКПМ обеспечивается установка параметров моделирования и задаются сценарии потребления и генерации электроэнергии.

В рамках полунатурного моделирования солнечная и дизельная электростанции представлены в виде математических моделей. В реальности электрическая энергия для питания комплекса поступает из сети университета, однако процесс её потребления организован таким образом, как если бы энергия поступала от соответствующих источников генерации. Использование математических моделей позволяет воспроизводить различные сценарии

генерации без использования реальных энергетических установок, обеспечивая безопасность, гибкость и воспроизводимость экспериментов.

При этом для обеспечения адекватности моделирования часть элементов энергосистемы реализована физически. В состав физической части комплекса входит часть модели автономной электростанции: система управления электростанцией (СУЭ), включая силовые инверторы, накопители электрической энергии, а также ФМПЭ. Использование управляемых физических моделей нагрузок в составе экспериментальных энергетических стендов является распространённым подходом при исследовании режимов работы и алгоритмов управления энергосистемами [11 – 13].

### Описание ФМПЭ

Важной частью данной установки является физическая модель потребителя электроэнергии, предназначенная для воспроизведения реальных и синтетических суточных графиков электрических нагрузок поселений с разной установленной мощностью. Схема ФМПЭ представлена на рисунке 3. Она состоит из набора резисторов разной мощности и сопротивления R1.1–R7.3, а также элементов с дискретно регулируемой индуктивностью X1.1–X5.3.

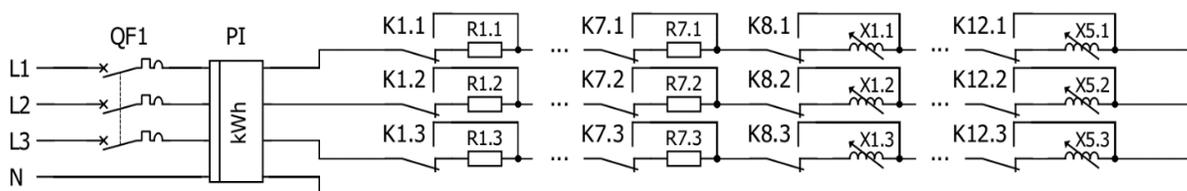


Рисунок 3. – Принципиальная схема физической модели потребителя электроэнергии

Каждая фаза модели имеет одинаковую максимально моделируемую полную мощность  $S_{\max(m)}$ . Это позволяет моделировать нагрузку как в симметричном, так и в несимметричном режимах. Установленное оборудование физической части комплекса позволяет воспроизводить нагрузку мощностью до 5 кВт на одну фазу при требуемом диапазоне коэффициента мощности. Разработанный математический аппарат реализован в серии ПО [14, 15], которое установлено в системе управления комплексом полунатурного моделирования (рис.2). Внешний вид разработанной физической модели представлен на рисунке 4.



Рисунок 4. – Реализация физической модели потребителя электроэнергии

В качестве средства защиты установлен трёхфазный автоматический выключатель QF1, а все элементы установки подключены к контуру защитного заземления.

Для измерения мощности потребления используется трёхфазный счётчик электроэнергии Р1 – Пульсар 3/3Т 3×230/400, обеспечивающий раздельное измерение активной и реактивной мощности. Измерительная система комплекса также позволяет регистрировать мгновенные значения фазных токов и напряжений.

Охлаждение нагрузочного модуля осуществляется системой принудительной вентиляции, включающей три вентилятора диаметром 300, 300 и 400 мм. Коммутация элементов нагрузки реализована с использованием двухпозиционных электромагнитных реле К1 – К12 (рис. 2), объединённых в коммутационные блоки по четыре реле в каждом (рис. 5).

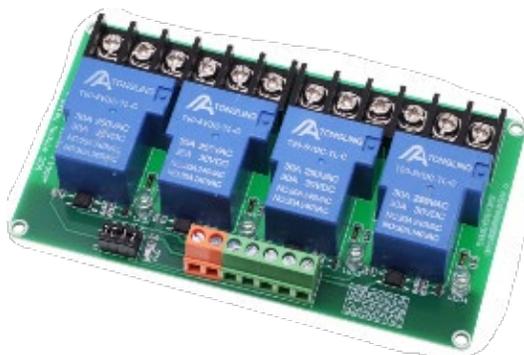


Рисунок 5 – Модуль двухпозиционных электромагнитных реле

Для обеспечения гибкости воспроизведения нагрузочных режимов в составе комплекса реализована система управления ФМПЭ. Управление нагрузкой осуществляется СУКПМ в двух основных режимах:

1. Ручной режим: предусматривает прямой ввод значений эквивалентных значений индуктивности и активного сопротивления, или полной мощности и коэффициента мощности.

2. Автоматический режим: позволяет воспроизводить заранее записанные суточные графики электрических нагрузок объекта с частотой дискретизации – не менее одной минуты. Для воспроизведения необходимы данные напряжения, активной мощности и реактивной мощности.

На основе передаваемых параметров режима электропотребления выполняется автоматический подбор конфигурации элементов нагрузки. Управляющие сигналы на коммутационные реле передаются от СУКПМ по промышленному интерфейсу RS–485.

При воспроизведении мощности в автоматическом режиме при помощи алгоритма подбора [15] вычисляется оптимальная комбинация  $k$  элементов модели (рис.3) из множества всех комбинаций  $K$  [14] обеспечивающая:

$$\min_{k \in K} ((P_o - P_M(k))^2 + (Q_o - Q_M(k))^2), \quad (1)$$

где  $P_o$  и  $Q_o$  – целевые значения активной и реактивной мощности моделируемого объекта,  $P_M$  и  $Q_M$  – активная и реактивная мощности комбинаций элементов ФМПЭ. Диапазон мощностей моделируемых объектов может превышать допустимые значения физической модели, что учитывается при интерпретации результатов моделирования.

### **Масштабирование результатов моделирования**

В случае если максимальная мощность объекта моделирования  $S_o$  превышает максимальную мощность модели  $S_{\max(M)}$ , то тогда согласно теории

подобия [16] следует воспользоваться следующей формулой для масштабирования результатов моделирования:

$$m_S = \frac{S_{\max(M)}}{S_{\max(O)}}, \quad (2)$$

где  $m_S$  – коэффициент подобия мощности.

Ввиду того, что номинальные напряжения моделируемых объектов  $U_{\text{ном}(O)}$  и ФМПЭ  $U_{\text{ном}(M)}$  одинаковые, то коэффициент подобия напряжения будет равен единице:

$$m_U = \frac{U_{\text{ном}(M)}}{U_{\text{ном}(O)}} = 1. \quad (3)$$

При воспроизведении суточных графиков нагрузки предполагается сохранение коэффициента мощности объекта, поэтому:

$$m_{\cos\varphi} = \frac{\cos\varphi_M}{\cos\varphi_O} = 1. \quad (4)$$

Коэффициенты подобия активной и реактивной мощности:

$$m_P = \frac{P_M}{P_O} = \frac{S_M \cdot \cos\varphi_M}{S_O \cdot \cos\varphi_O} = m_S; \quad (5)$$

$$m_P = m_Q = m_S. \quad (6)$$

Коэффициент подобия силы тока:

$$m_I = \frac{m_S}{m_U} = m_S. \quad (7)$$

Коэффициент подобия сопротивления:

$$m_Z = \frac{m_U}{m_I} = \frac{1}{m_S}. \quad (8)$$

Применение приведённых соотношений подобия (2) – (8) позволяет корректно интерпретировать результаты моделирования и использовать их при разработке алгоритмов управления автономными энергосистемами.

Разработанная физическая модель потребителя электрической энергии и программно-аппаратные средства управления подготовлены к проведению экспериментальных исследований. В дальнейшем планируется выполнение серии испытаний, направленных на оценку точности воспроизведения суточных графиков нагрузки.

### **Выводы**

В результате проведённого исследования получены следующие основные результаты:

1. Разработан комплекс полунатурного моделирования автономной системы электроснабжения, включающий математические модели источников генерации, систему управления электростанцией и физическую модель потребителя электрической энергии. Предложенная архитектура позволяет воспроизводить режимы работы солнечно-дизельных электростанций в условиях, приближенных к эксплуатации изолированных поселений или других автономных потребителей энергии.

2. Реализована система управления физической моделью нагрузки, поддерживающая ручной и автоматический режимы формирования суточных графиков электрических нагрузок с заданным шагом дискретизации. Подбор конфигурации активных и индуктивных элементов осуществляется на основе заданных параметров режима электропотребления.

3. Разработана физическая модель потребителя электрической энергии на основе дискретно-коммутируемых активных сопротивлений и индуктивностей,

обеспечивающая независимое формирование активно-реактивной нагрузки по фазам и воспроизведение симметричных и несимметричных режимов электропотребления.

4. Обосновано применение теории подобия для масштабирования режимов электропотребления, мощность которых превышает допустимые значения физической модели.

Полученные результаты создают основу для дальнейшей экспериментальной верификации алгоритмов управления гибридными автономными электростанциями.

### **Благодарности**

*Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема: «Предиктивное управление потоками энергии электрогенерирующих комплексов Арктики и Крайнего Севера при стохастических характерах потребления и генерации электрической энергии: теория, синтез, эксперимент», код темы: FENG-2023-0001).*

### **Литература**

1. Змиева К. А. Проблемы энергоснабжения Арктических регионов // Российская Арктика. 2020. № 8. С. 5–14. DOI: 10.2441/2658-4255-2020-10086. EDN BMVLQT.
2. Башмаков И. А. Повышение эффективности энергоснабжения в северных регионах России // Энергосбережение. 2017. № 2. С. 46–53. EDN YHTYLI.
3. Исаев Ю. Н., Архипова О. В., Ковалев В. З., Хамитов Р. Н. Адаптивное краткосрочное прогнозирование потребления электроэнергии автономными



энергосистемами малых северных поселений на основе методов корреляционного анализа // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334, № 2. С. 224–239. DOI: 10.18799/24131830/2023/2/4076. EDN JJRZNX.

4. Архипова О. В., Дюба Е. А., Евстегнеева Ю. Д., Ковалев В. З., Парамзин А. О., Петухова О. А. Анализ графиков нагрузки потребителей децентрализованных зон электроснабжения предприятия // Инженерный вестник Дона. 2019. № 8(59). С. 23. EDN COHDUL.

5. Widén, J., Carpman N., Castellucci V., et al. Variability assessment and forecasting of renewables: A review for solar, wind, wave and tidal resources // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015. Vol. 44. P. 356–375. DOI: 10.1016/j.rser.2014.12.019.

6. Ковалев В. З., Буш С. В., Архипова О. В., Шлык Ю. К., Хамитов Р. Н., Моисеев А. В., Махмутова В. Р. Анализ структуры и качества данных солнечной радиации из реанализа ERA5 для краткосрочного прогнозирования в условиях Крайнего Севера // Инженерный вестник Дона. 2025. № 7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2025/10212

7. Стенников В. А., Курбацкий В. Г., Санеев Б. Г., Клер А. М., Сидоров Д. Н., Томин Н. В., Иванова И. Ю., Тугузова Т. Ф., Марченко О. В., Соломин С. В., Лебедев А. В., Жарков С. В., Попов С. П., Постников И. В., Карамов Д. Н., Корнеев К. А., Пеньковский А. В., Жуков А. В., Халгаева Н. А., Максакова Д. В., Николаев В. Г., Ганага С. В., Николаев В. В., Кудряшов Ю. И., Рахманов Н. Р., Гулиев Г. Б., Шакиров В. А. Региональные аспекты ветроэнергетики. Новосибирск: Сибирское отделение Российской академии наук, 2020. 296 с. ISBN 978-5-6044348-8-8. DOI: 10.15372/REGIONAL2020SVA. EDN TRRDBN.

---

8. Горшенин А. Ю., Денисова Л. А. Прогнозирование выработки электроэнергии ветроэлектростанцией с применением рекуррентной нейронной сети // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 4. С. 39–45. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-4-39-45. EDN ZDOIGJ.

9. Wang J., Pratt. A., Prabakar K., Miller B., Symko-Davies M. Development of an integrated platform for hardware-in-the-loop evaluation of microgrids prior to site commissioning // Applied Energy. 2021. Vol. 290. P. 116755. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.116755.

10. Huerta F., Gruber J.K., Prodanovic M., Matatagui P. Power-hardware-in-the-loop test beds: evaluation tools for grid integration of distributed energy resources // IEEE Industry Applications Magazine. 2016. Vol. 22, No. 2. P. 18–26. DOI: 10.1109/mias.2015.2459091.

11. Billas I., Konstantaras J., Tsambasis E., Elias C., Ktena A., Manasis C. Smart Load for a Hybrid Microgrid Testbed // 2019 8th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO). IEEE, 2019. P. 1–5. DOI: 10.1109/meco.2019.8760143.

12. Обухов С. Г., Плотников И. А., Маров Д. Ю. Физическая модель электрических нагрузок автономных энергетических систем // Промышленные АСУ и контроллеры. 2011. № 11. С. 37–40. EDN SXZKDF.

13. Лансберг А. А., Виноградов А. В. Разработка физической модели сельской электрической сети 0,4 кВ // Техника и оборудование для села. 2024. № 8(326). С. 39–43. DOI: 10.33267/2072-9642-2024-8-39-43. EDN YRWLCA.

14. Ковалев В. З., Архипова О. В., Буш С. В., Годовников Е. А. Генератор базы данных конфигураций многокомпонентной активно-реактивной нагрузки. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №

---



2025696511. Бюл. 2025. №12. URL: [fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet?DB=EVM&DocNumber=2025696511&TypeFile=html](https://fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=EVM&DocNumber=2025696511&TypeFile=html) (дата обращения: 24.02.2026).

15. Ковалев В. З., Архипова О. В., Буш С. В., Сайфуллин Р. В. Автоматизированный подбор конфигурации активно-реактивной нагрузки по заданным параметрам режима электропотребления. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2025696510. Бюл. 2025. №12. URL: [fips.ru/fips\\_servl/fips\\_servlet?DB=EVM&DocNumber=2025696510&TypeFile=html](https://fips.ru/fips_servl/fips_servlet?DB=EVM&DocNumber=2025696510&TypeFile=html) (дата обращения: 24.02.2026).

16. Веников В. А. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики). 2-е изд., доп. и перераб. М.: Высшая школа, 1976. 480 с.

### Reference

1. Zmieva K. A. Rossiyskaya Arktika, 2020, no. 8, pp. 5–14. DOI: 10.2441/2658-4255-2020-10086. EDN BMVLQT.
2. Bashmakov I. A. Energoberezhnie, 2017, no. 2, pp. 46–53. EDN YHTYLJ.
3. Isaev Yu. N., Arkhipova O. V., Kovalev V. Z., Khamitov R. N. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov, 2023, vol. 334, no. 2, pp. 224–239. DOI: 10.18799/24131830/2023/2/4076. EDN JJRZNX.
4. Arkhipova O. V., Dyuba E. A., Evstegneeva Yu. D., Kovalev V. Z., Paramzin A. O., Petukhova O. A. Inzhenernyy vestnik Dona, 2019, no. 8(59), p. 23. EDN COHDUL.
5. Widén, J., Carpmán N., Castellucci V., et al. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015. Vol. 44. P. 356–375. DOI: 10.1016/j.rser.2014.12.019.



6. Kovalev V. Z., Bush S. V., Arkhipova O. V., Shlyk Yu. K., Khamitov R. N., Moiseev A. V., Makhmutova V. R. Inzhenernyj vestnik Dona, 2025, № 7. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2025/10212](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2025/10212)

7. Stennikov V. A., Kurbatskiy V. G., Saneev B. G., Kler A. M., Sidorov D. N., Tomin N. V., Ivanova I. Yu., Tuguzova T. F., Marchenko O. V., Solomin S. V., Lebedev A. V., Zharkov S. V., Popov S. P., Postnikov I. V., Karamov D. N., Korneev K. A., Pen'kovskiy A. V., Zhukov A. V., Khalgaeva N. A., Maksakova D. V., Nikolaev V. G., Ganaga S. V., Nikolaev V. V., Kudryashov Yu. I., Rakhmanov N. R., Guliev G. B., Shakirov V. A. Regional'nye aspekty vetroenergetiki [Regional aspects of wind power]. Novosibirsk, 2020. 296 p. ISBN 978-5-6044348-8-8. DOI: 10.15372/REGIONAL2020SVA. EDN TRRDBN.

8. Gorshenin A. Yu., Denisova L. A. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki, 2023, no. 4, pp. 39–45. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-4-39-45. EDN ZDOIGJ.

9. Wang J., Pratt. A., Prabakar K., Miller B., Symko-Davies M. Applied Energy. 2021. Vol. 290. P. 116755. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.116755.

10. Huerta F., Gruber J.K., Prodanovic M., Matatagui P. IEEE Industry Applications Magazine. 2016. Vol. 22. No. 2. P. 18–26. DOI: 10.1109/mias.2015.2459091.

11. Billas I., Konstantaras J., Tsambasis E., Elias C., Ktena A., Manasis C. 2019 8th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO). IEEE, 2019. P. 1–5. DOI: 10.1109/meco.2019.8760143.

12. Obukhov S. G., Plotnikov I. A., Marov D. Yu. Promyshlennyye ASU i kontrollery, 2011, no. 11, pp. 37–40. EDN SXZKDF.



13. Lansberg A. A., Vinogradov A. V. Tekhnika i oborudovanie dlya sela, 2024, no. 8(326), pp. 39–43. DOI: 10.33267/2072-9642-2024-8-39-43. EDN YRWLCA.

14. Kovalev V. Z., Arkhipova O. V., Bush S. V., Godovnikov E. A. Generator bazy dannykh konfiguratsiy mnogokomponentnoy aktivno-reaktivnoy nagruzki [Database generator of configurations of multi-component active-reactive load]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy` dlya E`VM № 2025696511. Byul. 20252025, № 12. URL: [fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet?DB=EVM&DocNumber=2025696511&TypeFile=html](https://fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=EVM&DocNumber=2025696511&TypeFile=html) (date accessed: 24.02.2026).

15. Kovalev V. Z., Arkhipova O. V., Bush S. V., Sayfullin R. V. Avtomatizirovannyy podbor konfiguratsii aktivno-reaktivnoy nagruzki po zadannym parametram rezhima elektropotrebleniya [Automated selection of active-reactive load configuration according to specified power consumption mode parameters]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy` dlya E`VM №2025696510. Byul., № 12. URL: [fips.ru/fips\\_servl/fips\\_servlet?DB=EVM&DocNumber=2025696510&TypeFile=html](https://fips.ru/fips_servl/fips_servlet?DB=EVM&DocNumber=2025696510&TypeFile=html) (date accessed: 24.02.2026).

16. Venikov V. A. Teoriya podobiya i modelirovaniya (primenitel'no k zadacham elektroenergetiki) [Theory of similarity and modeling (applied to electric power engineering problems)]. Moskva, Vysshaya shkola Publ., 1976. 480 p.

**Дата поступления: 12.01.2026**

**Дата публикации: 3.03.2026**