

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9397/2025.1.09

УДК 621.311

Е.В. Жилин, Д.Д. Лёвин

Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Российская Федерация

МОДЕЛИРОВАНИЕ СУТОЧНОЙ ПОТРЕБЛЯЕМОЙ НАГРУЗКИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

При имитационном моделировании систем электроснабжения возникает сложность представления изменяющейся потребляемой мощности в течение суток, месяца, года. **Цель:** разработать метод моделирования динамической изменяющейся во времени потребляемой нагрузки систем электроснабжения. В работе предлагаются **методики** для моделирования суточной нагрузки на подстанции 10/0,4 кВ в программном комплексе SimInTech. Программный комплекс позволяет моделировать элементы системы электроснабжения на основании их схем замещения. Имитационная модель состоит из участка кабельной линии, силового трансформатора, коммутационных аппаратов, измерительных приборов и блока нагрузки, который задает значения активной и реактивной мощности. Предложены **два способа** моделирования изменяющейся активной и реактивной мощности от времени: кусочно-постоянной и полиномиальной аппроксимации. В первом случае в параметрах специального блока задаются значения величины и продолжительности потребляемой мощности, такой подход позволяет построить псевдодискретный график, что облегчает его анализ. Преимуществами такого подхода является полное соответствие значениям суточного графика нагрузки, возможность отображения результатов в формате столбчатой диаграммы, недостатками являются сложность задания параметров, отсутствие какого-либо обобщения. Вторым способом является регрессионный анализ, мощность становится зависимой переменной от времени, которое принимает заданное значение, для суточного графика – двадцать четыре значения. Такую форму суточных графиков можно описать полиномом высокой степени. На основании измеренных данных потребления мощности за сутки с усреднением за один час составляется регрессионное уравнение или полином при использовании встроенных инструментов Microsoft Excel. Полученная функция с помощью специального блока подается на нагрузку системы электроснабжения. **Результаты** имитационного моделирования и исходные данные, полученные после экспериментальных исследований, показали достаточную сходимость.

Ключевые слова: график нагрузки, имитационное моделирование, SimInTech, кусочно-постоянная и полиномиальная аппроксимация, система электроснабжения, динамическая мощность.

E.V. Zhilin, D.D. Levin

University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

MODELING OF DAILY CONSUMED LOAD IN POWER SUPPLY SYSTEMS

In the simulation modeling of power supply systems, the representation of the variability in power consumption throughout a day, month, and year poses a significant challenge. **Objective:** to develop a method for modeling dynamic time-varying consumed load of power supply systems. **Methods** for modeling daily load profiles on 10/0.4 kV substations using the SimInTech software is presented in this paper. The SimInTech platform enables the modeling of power supply system components based on their equivalent circuits. The simulation model consists of a section of a cable line, a power transformer, switching devices, measuring instruments, and a load block that dictates the values of active and reactive power. **Two methods** are proposed to address the dynamic nature of active and reactive power over time: piecewise-constant approximation and polynomial approximation. In the first case, the parameters of a special block specify the values of magnitude and duration of power consumption which allows the construction of a pseudo-discrete graph that facilitates analysis. The advantages of this approach are precise adherence to actual data and the ability to construct in a pseudo-discrete format (bar chart), while the disadvantages include the complexity of parameter specification and the lack of generalization. The second method employs regression analysis, power becomes a dependent variable of time with specified values—typically twenty-four for a daily graph. The shape of the daily graphs can also be described by a high-degree polynomial. Based on measured power consumption data averaged over one hour, a regression equation or polynomial is constructed with built-in tools in Microsoft Excel. This resulting function is then integrated into the load block of the power supply system model. Simulation **results** and initial data from experimental studies demonstrate strong convergence.

Keywords: load graph, simulation modeling, SimInTech, piecewise-constant and polynomial approximation, power supply system, dynamic power.

Введение

Одним из ключевых вопросов при создании и совершенствовании методов управления и регулирования режимов электрических сетей является анализ типовых суточных графиков нагрузки исследуемого объекта. В системах электроснабжения графики нагрузки используют для анализа работы электроустановок [1, 2], проектирования электрических сетей [3], прогнозирования электропотребления [3, 4], планирования ремонтов оборудования [2, 5], а также в процессе эксплуатации для поддержания нормального режима работы [1, 2, 6]. Изменения в графиках нагрузки, вызванные колебаниями спроса, вариативностью генерации энергии, а также внедрением новых технологий, таких как возобновляемые источники энергии, оказывают значительное влияние на поведение всей энергосистемы. Имитационное моделирование позволяет не только учитывать эти изменения, но и разрабатывать эффективные стратегии

для интеграции различных устройств, способных компенсировать непредсказуемость нагрузки и обеспечить стабильную работу [7–11].

Для исследования систем электроснабжения выполняют разработку имитационных моделей, на основании которых выполняется оценка режима работы, устойчивости эффективности функционирования [12]. Также модели позволяют оценить эффективность внедрения различных технических устройств (системы компенсации реактивной мощности [13], фильтрокомпенсирующие [14, 15], накопители электроэнергии [16–19] и т.д.) и их воздействие на систему электроснабжения. При моделировании систем электроснабжения возникают сложности представить изменения нагрузки в единицу времени, поэтому целью работы является разработка методики моделирования графиков нагрузки систем электроснабжения, то есть динамически изменяющейся потребляемой мощности во времени.

Основная часть

Объектом исследования является двухтрансформаторная подстанция напряжением 10/0,4 кВ с трансформаторами ТМЗ-1600 [20]. Питание подстанции осуществляется от двух независимых источников по кабельным линиям марки АСБ-3х240 длиной 3 км. Суточный график нагрузки активной мощности на шинах 0,4 кВ подстанции представлен на рис. 1.

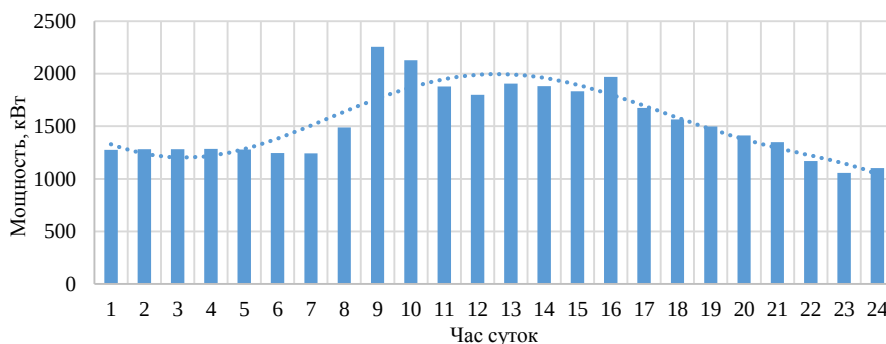


Рис. 1. Суточный график нагрузки активной мощности

Для моделирования динамически изменяющейся нагрузки на шинах 0,4 кВ трансформаторной подстанции было опробовано два подхода: с помощью кусочно-постоянной функции нагрузки и полинома высокой степени.

Для создания имитационной модели системы электроснабжения был выбран программный продукт SimInTech [21]. Моделирование кабельной линии осуществлялось по П-образной схеме замещения, которая учитывает активное и реактивное сопротивление и зарядную мощность линии. Силовой трансформатор моделируется на основании Г-образной схемы замещения, исходными данными являются паспортные параметры трансформатора [22, 23]. На их основании программный продукт рассчитывает значения схемы замещения: активное и реактивное сопротивление и проводимость [24].

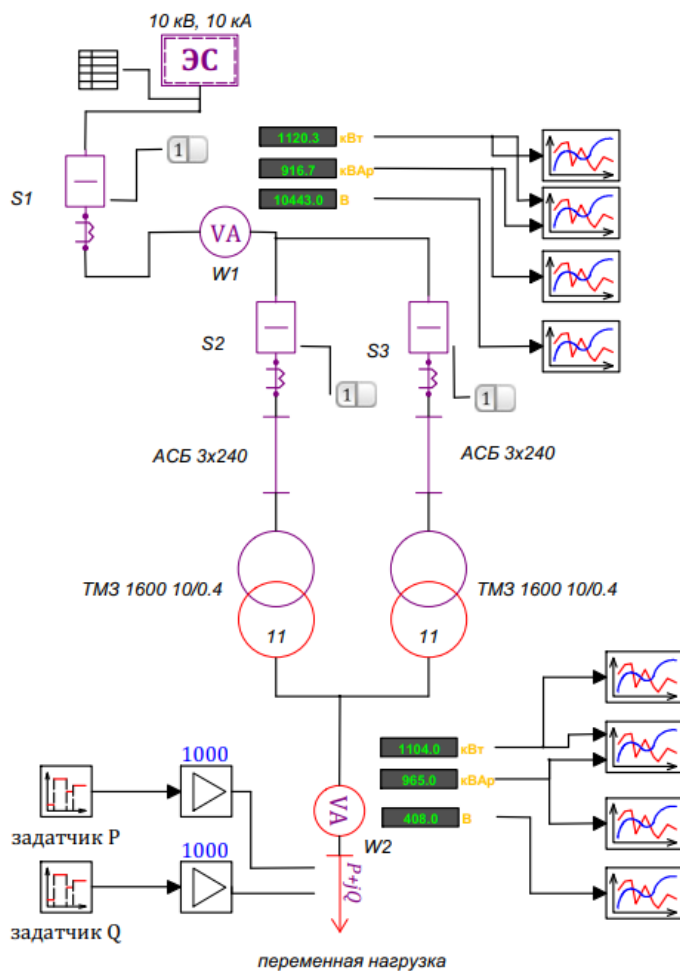


Рис. 2. Имитационная модель суточного графика нагрузки при использовании кусочно-постоянной функции мощности

Источник моделируется в виде энергосистемы номинальным напряжением 10 кВ с бесконечной мощностью и 3-фазным током короткого замыкания на шинах вышестоящей подстанции, равным 10 кА (распространенное значение по актам разграничения балансовой принадлежности для промышленных предприятий в черте крупных городов). Также на трансформаторной подстанции моделируются выключатели (S) и блоки измерения (W) основных параметров сети [24].

Нагрузка на шинах подстанции 0,4 кВ моделируется с помощью модели статической управляемой нагрузки, ключевой особенностью является возможность задания функции нагрузки в зависимости от любой переменной через внешний порт. Общий вид имитационной модели при использовании в качестве функции нагрузки кусочно-постоянной функции представлен на рис. 2.

Первым способом моделирования суточного графика нагрузки является задание значений активной и реактивной мощности в блок кусочно-постоянной функции в SimInTech, представленном на рис. 3. В параметрах блока задаются значения величины и продолжительности потребляемой мощности, т.е. для получения суточного графика нагрузки с временем усреднения 1 час необходимо задать двадцать четыре значения мощности.

Свойства			
Общие			
Порты			
Визуальные слои			
Название	Имя	Формула	Значение ▲
Массив значений	y		[[1276 , 1282 , 1283 , 1284 , 1280 , 1244 , 1242 , 1490 , 2255 , 2129 , 18
Массив временных интервалов	t		[[5 , 5 , 5 , 5 , 5 , 5 , 5 , 5 , 5 , 5 , 5 , 5 , 5 , 5 , 5 , 5 , 5 , 5 , 5 , 5 ,

Рис. 3. Блок «Кусочно постоянная»

Также необходимо определить временной масштаб потребления мощности, в рамках данной задачи было принято: пять секунд в программном продукте эквивалентно одному часу, соответственно, сутки моделирования равны сто двадцати секундам. Стоит отметить, что для приведения в соответствие единиц измерения в данной модели необходимо использовать блок усилителя на выходе функции с множителем 1000. Такой подход позволяет построить псевдодискретный график, что облегчает его анализ. Результаты моделирования графика нагрузки заданием кусочно-постоянной функции мощности представлены на рис. 4.

Преимуществами такого подхода являются полное соответствие значениям суточного графика нагрузки, а также возможность построить графики нагрузки в псевдодискретном формате (столбчатая диаграмма). Недостатками являются сложность задания параметров и отсутствие какого-либо обобщения.

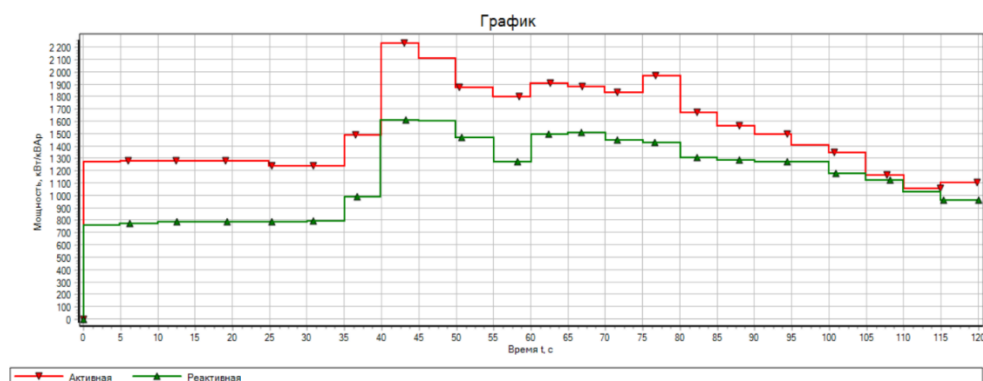


Рис. 4. График нагрузки с кусочно-постоянной функцией

Логично и математически верно предположить, что другим методом определения зависимостей одних переменных от других является регрессионный анализ [25]. Мощность становится зависимой переменной от времени t , которое принимает значения от 1 до 24. Исходя из форм суточных графиков, в подавляющем большинстве случаев это будет полином высокой степени. Так как у нас отсутствует задача нахождения функции, которая обобщает данные за какой-либо период, то использование полиномов высокой степени обосновано. Более того, нам нужно подобрать функцию, максимально приближённую к истинным значениям суточного графика нагрузки.

Первоначально нужно определить регрессионное уравнение, которое получено при использовании встроенных инструментов Microsoft Excel. В случае полинома встроенные инструменты могут посчитать максимально полином 6-й степени, если использовать инструменты построения линии тренда в графике. Другим способом является функция `=ЛИНЕЙН()`, которая не имеет каких-либо ограничений. В основе этих инструментов лежит классический метод наименьших квадратов. Исходя из подбора полиномов, выявлено, что после пятой степени коэффициент детерминации растет незначительно, в связи

с чем инструмента, встроенного в график, достаточно. Результаты полученного уравнения регрессии посуточного профиля активной мощности приведены на рис. 5.

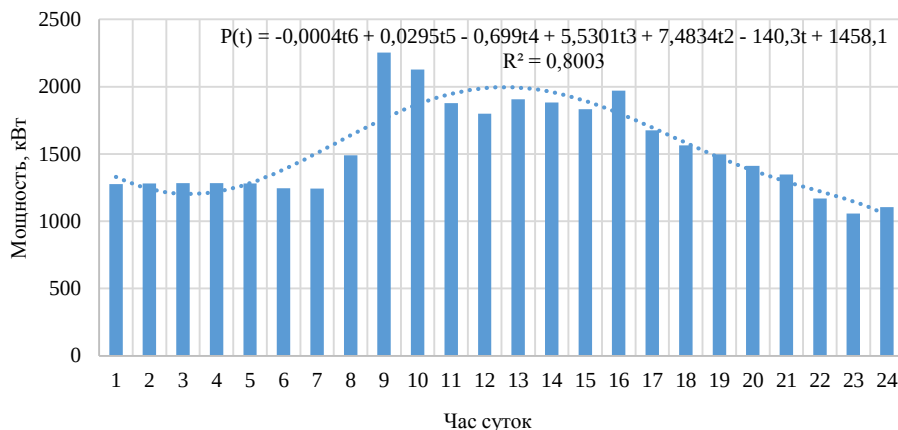


Рис. 5. График нагрузки активной мощности с полиномом регрессии 6-й степени

Далее создана модель нагрузки с полиномиальной функцией (1):

$$P(t) = -0,0004t^6 + 0,0296t^5 - 0,699t^4 + 5,5301t^3 + 7,4834t^2 - 140,3t + 1458,1. \quad (1)$$

Изменение времени в течение суток в программном продукте задается с помощью блока «Часы», который берет значение аргумента из реального времени. Соответственно масштаб времени следующий, одна секунда в программном продукте равна одному часу. Полиномиальная функция мощности задается с помощью блока полинома, аргументы вбиваются в порядке, начиная с 0-й степени. Схема модели нагрузки, которая подключается к шинам 0,4 кВ, представлена на рис. 6.

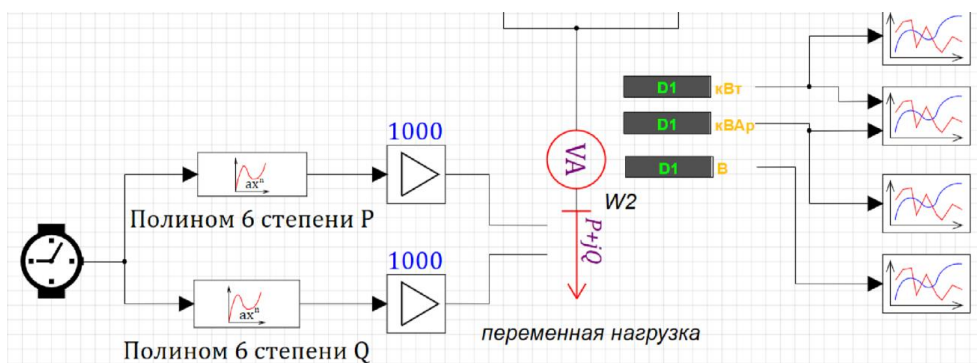


Рис. 6. Модель нагрузки с полиномиальными функциями мощностей

Результаты имитационного моделирования графика нагрузки с полиномиальной функцией представлены на рис. 7. Из рисунка видно, что изменение активной мощности в течение суток полностью соответствует полученной зависимости в Microsoft Excel (рис. 5, пунктирная кривая). Однако, как видно из рис. 5, полиномиальная функция сглаживает пиковые значения графика нагрузки в отдельные интервалы времени, что приводит к определенной погрешности, например, в промежутках времени 9, 10, 16 ч. Учитывая, что коэффициент детерминации достаточно высок и составляет $R^2 = 0,8003$, можно считать, что полученные зависимости мощности позволяют оценить уровень и время потребления максимума и минимума нагрузки, особенно когда моделируется большой фрагмент системы электроснабжения с множеством подстанций, на которых график нагрузки изменяются по своему закону. Это свидетельствует об эффективности использования полиномиальной функции для моделирования изменяющейся нагрузки во времени.

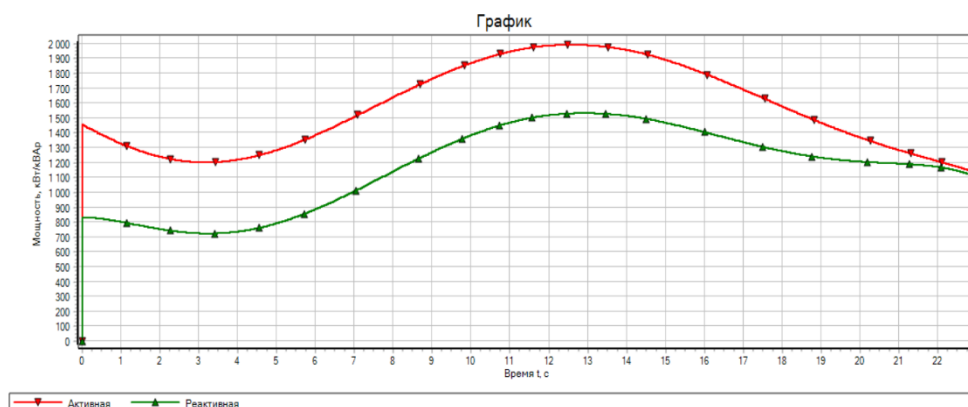


Рис. 7. Результаты моделирования с полиномиальной функцией

Преимуществами полиномиальной функции являются: более простой способ задачи параметров функции, введение определённого уровня обобщения, возможность оценить общие перепады мощности за определенный период времени. Недостатками являются необходимость большой предварительной подготовки, отсутствие точного соответствия реальному графику нагрузки, отсутствие возможности представления в формате столбчатой диаграммы.

Заключение

Были предложены два способа имитационного моделирования динамических графиков мощности с помощью программного продукта *SimInTech*: кусочно-постоянной и полиномиальной аппроксимации. Результаты имитационного моделирования суточного графика нагрузки с помощью полиномиальной функции и исходные данные графика мощности, полученные после экспериментальных исследований, показали хорошую сходимость (коэффициент детерминации полиномиальной функции $R^2 = 0,8003$). Предложенные методы позволят моделировать фрагменты систем электроснабжения с узлами нагрузки, в которых мощность изменяется во времени по разным зависимостям. Это даст возможность оценивать не только режимы работы в разные промежутки времени, но и эффективность внедрения компенсирующих устройств в часы максимума и минимума нагрузки, также исследовать системы управления отбора мощности накопителей электроэнергии и других технических устройств, что и является планом дальнейшей работы.

Библиографический список

1. Петров, М.Б. Модель выравнивания суточного графика нагрузки потребителями электроэнергии / М.Б. Петров, К.Б. Кожов // Вестник Гуманитарного университета. – 2023. – № 4 (43). – С. 124–134. DOI: 10.35853/vestnik.gu.2023.4(43).12
2. Болтунов, В.В. Распределение энергетического потенциала Кемеровской области с учётом введения в эксплуатацию Крапивинской ГЭС / В.В. Болтунов, Я.А. Загороднев, О.С. Мусорина // Инновации. Наука. Образование. – 2021. – № 33. – С. 1405–1415.
3. Митрофанов, С.В. Моделирование работы гибридной энергетической установки, работающей на возобновляемых источниках энергии с почасовым графиком нагрузки / С.В. Митрофанов // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2023. – № 1. – С. 40–45.
4. Дзюба, А.П. Оценка эффективности управления спросом на электроэнергию по критерию характеристик суточных графиков нагрузок / А.П. Дзюба // Вестник Поволж. гос. технолог. ун-та. Сер. Экономика и управление. – 2020. – № 1 (45). – С. 56–71. DOI: 10.25686/2306-2800.2020.1.56

5. Евстюхина, Е.В. Оптимальный режим изменения мощности ядерного реактора в период угрозы экстремальных внешних воздействий при работе в переменном суточном графике нагрузки / Е.В. Евстюхина, А.М. Загребаев, А.В. Трифоненков // Вестник Национального исследоват. ядерного ун-та «МИФИ». – 2023. – Т. 12, № 3. – С. 165–169. DOI: 10.26583/vestnik.2023.257
6. Тавлинцев, А.С. Поиск однотипных графиков нагрузки энергообъекта / А.С. Тавлинцев, А.А. Суворов, Е.Д. Стаймова // Вестник Южно-Урал. гос. ун-та. Сер. Энергетика. – 2018. – Т. 18, № 2. – С. 20–27. DOI: 10.14529/power180203
7. Álvarez, G.E. A data-driven model for the operation and management of prosumer markets in electric smart grids / G.E. Álvarez, D.E. Kröhling, E. Martínez // Computers & Industrial Engineering. – 2024. – Vol. 196. DOI: 10.1016/j.cie.2024.110492
8. Hu, Y. Research on Industry 4.0 smart grid monitoring and energy management based on data mining and Internet of Things technology / Y. Hu // Thermal Science and Engineering Progress. – 2024. – Vol. 54. DOI: 10.1016/j.tsep.2024.102830
9. Aljarrah, E. AI-based model for Prediction of Power consumption in smart grid-smart way towards smart city using blockchain technology / E. Aljarrah // Intelligent Systems with Applications. – 2024. – Vol. 24. DOI: 10.1016/j.iswa.2024.200440
10. Люtareвич, А.Г. Применение нейронных сетей для прогнозирования параметров электропотребления / А.Г. Люtareвич // Вестник Югорск. гос. ун-та. – 2023. – № 2 (69). – С. 124–132. DOI: 10.18822/byusu202302124-132
11. Прогнозирование потребления электрической энергии промышленным предприятием с помощью методов машинного обучения / А.Д. Моргоева, И.Д. Моргоев, Р.В. Ключев, О.А. Гаврина // Известия Томск. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333, № 7. – С. 115–125. DOI: 10.18799/24131830/2022/7/3527
12. Моделирование процессов потребления и распределения электроэнергии в электротехническом комплексе нефтедобывающего предприятия / А.С. Семенов, А.Б. Петроченков, В.И. Южаков, С.Д. Иванов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные

технологии, системы управления. – 2024. – № 50. – С. 82–103. DOI: 10.15593/2224-9397/2024.2.05

13. Котенев, В.И. Управление коэффициентом реактивной мощности системы электроснабжения в функции мощности потребителей и потерь в трансформаторах / В.И. Котенев, А.В. Котенев, А.Д. Стулов // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. – 2022. – Т. 30, № 4 (76). – С. 142–157. DOI: 10.14498/tech.2022.4

14. Pavlov, N.V. Multiagent approach for modeling power-supply systems with microgrid / N.V. Pavlov, A.B. Petrochenkov, A.V. Romodin // Russian Electrical Engineering. – 2021. – Vol. 92, № 11. – P. 637–643.

15. Анализ несинусоидальных режимов в системах электроснабжения горных предприятий с нелинейной нагрузкой и конденсаторными установками / Ю.А. Сычев, В.Н. Костин, В.А. Сериков, М.Е. Аладьин // Горный информационно-аналитический бюллетень (науч.-техн. журнал). – 2023. – № 1. – С. 159–179. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_1_0_159

16. Жилин, Е.В. Разработка имитационной модели участка сети 10 кВ с управляемым накопителем электроэнергии / Е.В. Жилин, А.Д. Малышева, И.А. Белоусов // Вестник Чуваш. ун-та. – 2024. – № 2. – С. 28–39. DOI: 10.47026/1810-1909-2024-2-28-39

17. Выравнивание графика нагрузки предприятий за счет применения гибридных накопителей электроэнергии / О.С. Васильков, Д.Е. Батуева, К.А. Хомяков, П.С. Паляницын // Известия МГТУ МАМИ. – 2020. – № 1 (43). – С. 27–34. DOI: 10.31992/2074-0530-2020-43-1-27-34

18. Выравнивание графика электрической нагрузки фермы КРС с применением накопителя электроэнергии / А.В. Виноградов, А.В. Виноградова, А.В. Букреев, В.А. Братанюк // Агротехника и энергообеспечение. – 2023. – № 1 (38). – С. 20–30.

19. Никишин, А.Ю. Накопитель электроэнергии как средство регулирования электропотребления морского порта / А.Ю. Никишин, М.С. Харитонов, Р.В. Зубавичюс // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – № 4-4 (54). – С. 87–93. DOI: 10.37220/MIT.2021.54.4.012

20. Формирование графиков нагрузок трансформаторов / Ю.М. Помогаев, И.В. Лакомов, С.Ю. Зобов, В.В. Шередекин // Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения: материалы междунар. науч.-прак. конф.; Воронеж,

25 ноября 2021 г. – Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. аграрного ун-та им. Императора Петра I, 2021. – С. 430–437.

21. Программный продукт SimInTech. Общество с ограниченной ответственностью «ЗВ Сервис» (ООО «ЗВС») [Электронный ресурс]. – URL: <https://simintech.ru/> (дата обращения: 09.01.2025).

22. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: ЭНАС, 2012. – 376 с.

23. Герасименко, А.А. Передача и распределение электрической энергии: учеб. пособие / А.А. Герасименко, В.Т. Федин. – М.: КноРус, 2014. – 648 с.

24. Поляков, А.М. Методика моделирования электрической части электростанции в SimInTech / А.М. Поляков. – М.: ДМК Пресс, 2023. – 144 с.

25. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие для вузов / В.Е. Гмурман. – 10-е изд., стер. – М.: Высшая школа, 2004. – 479 с.

References

1. Petrov M.B., Kozhov K.B. Model' vyравnivaniiia sutochnogo grafika nagruzki potrebiteliami elektroenergii [Model for equalizing the daily load schedule of electric power consumers]. *Vestnik Gumanitarnogo universiteta*, 2023, no. 4 (43), pp. 124-134. DOI: 10.35853/vestnik.gu.2023.4(43).12

2. Boltunov V.V., Zagorodnev Ia.A., Musorina O.S. Raspredelenie energeticheskogo potentsiala Kemerovskoi oblasti s uchetom vvedeniia v ekspluatatsiiu Krapivinskoi GES [Distribution of the energy potential in the Kemerovo region considering the commissioning of the Krapivinskaya hydroelectric power station]. *Innovatsii. Nauka. Obrazovanie*, 2021, no. 33, pp. 1405-1415.

3. Mitrofanov S.V. Modelirovanie raboty gibridnoi energeticheskoi ustanovki, rabotaiushchei na vozobnovliaemykh istochnikakh energii s pochasovym grafikom nagruzki [Modeling the operation of a hybrid renewable energy power system with hourly load profile]. *Energobezopasnost' i energosberezhenie*, 2023, no. 1, pp. 40-45.

4. Dziuba A.P. Otsenka effektivnosti upravleniia sprosom na elektroenergiiu po kriteriiu kharakteristik sutochnykh grafikov nagruzok [Assessment of the efficiency of electric power demand management based on the

characteristics of daily load schedules]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ekonomika i upravlenie*, 2020, no. 1 (45), pp. 56-71. DOI: 10.25686/2306-2800.2020.1.56

5. Evstiukhina E.V., Zagrebaev A.M., Trifonenkov A.V. Optimal'nyi rezhim izmeneniia moshchnosti iadernogo reaktora v period ugrozy ekstremal'nykh vneshnikh vozeistvii pri rabote v peremennom sutochnom grafike nagruzki [Optimal mode of power change in a nuclear reactor during threats of extreme external influences while operating on an alternate daily load schedule]. *Vestnik Natsional'nogo issledovatel'skogo iadernogo universiteta "MIFI"*, 2023, vol. 12, no. 3, pp. 165-169. DOI: 10.26583/vestnik.2023.257

6. Tavlintsev A.S., Suvorov A.A., Staimova E.D. Poisk odnotipnykh grafikov nagruzki energoob"ekta [Search for similar load schedules of energy facility]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Energetika*, 2018, vol. 18, no. 2, pp. 20-27. DOI: 10.14529/power180203

7. Álvarez G.E., Kröhling D.E., Martínez E. A data-driven model for the operation and management of prosumer markets in electric smart grids. *Computers & Industrial Engineering*, 2024, vol. 196. DOI: 10.1016/j.cie.2024.110492

8. Hu Y. Research on Industry 4.0 smart grid monitoring and energy management based on data mining and Internet of Things technology. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2024, vol. 54. DOI: 10.1016/j.tsep.2024.102830

9. Aljarrah E. AI-based model for Prediction of Power consumption in smart grid-smart way towards smart city using blockchain technology. *Intelligent Systems with Applications*, 2024, vol. 24. DOI: 10.1016/j.iswa.2024.200440

10. Liutarevich A.G. Primenenie neironnykh setei dlia prognozirovaniia parametrov elektropotrebleniia [Application of neural networks for forecasting parameters of electricity consumption]. *Vestnik Iugorskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2023, no. 2 (69), pp. 124-132. DOI: 10.18822/byusu202302124-132

11. Morgoeva A.D., Morgoev I.D., Kliuev R.V., Gavrina O.A. Prognozirovanie potrebleniia elektricheskoi energii promyshlennym predpriatiem s pomoshch'iu metodov mashinnogo obucheniia [Forecasting electric energy consumption by an industrial enterprise using machine learning methods]. *Izvestiia Tomskego politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov*, 2022, vol. 333, no. 7, pp. 115-125. DOI: 10.18799/24131830/2022/7/3527

12. Semenov A.S., Petrochenkov A.B., Iuzhakov V.I., Ivanov S.D. Modelirovanie protsessov potrebleniia i raspredeleniia elektroenergii v elektrotekhnicheskom komplekse nefte dobyvaiushchego predpriiatiia [Modeling of electricity consumption and distribution processes in the electrical engineering complex of an oil production enterprise]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotekhnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2024, no. 50, pp. 82-103. DOI: 10.15593/2224-9397/2024.2.05

13. Kotenev V.I., Kotenev A.V., Stulov A.D. Upravlenie koeffitsientom reaktivnoi moshchnosti sistemy elektrosnabzheniia v funktsii moshchnosti potrebiteli i poter' v transformatorakh [Control of the reactive power factor of the power supply system as a function of consumer power and losses in transformers]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2022, vol. 30, no. 4 (76), pp. 142-157. DOI: 10.14498/tech.2022.4

14. Pavlov N.V., Petrochenkov A.B., Romodin A.V. Multiagent approach for modeling power-supply systems with microgrid. *Russian Electrical Engineering*, 2021, vol. 92, no. 11, pp. 637-643.

15. Sychev Iu.A., Kostin V.N., Serikov V.A. Alad'in, M.E. Analiz nesinusoidal'nykh rezhimov v sistemakh elektrosnabzheniia gornykh predpriiati s nelineinoi nagruzkoi i kondensatornymi ustanovkami [Analysis of non-sinusoidal modes in power supply systems of mining enterprises with nonlinear loads and capacitor banks]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*, 2023, no. 1, pp. 159-179. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_1_0_159

16. Zhilin E.V., Malysheva A.D., Belousov I.A. Razrabotka imitatsionnoi modeli uchastka seti 10 kV s upravliaemym nakopitelem elektroenergii [Development of a simulation model of a 10 kV network section with a controlled energy storage system]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2024, no. 2, pp. 28-39. DOI: 10.47026/1810-1909-2024-2-28-39

17. Vasil'kov O.S., Batueva D.E., Khomiakov K.A., Palianitsin P.S. Vyravnivanie grafika nagruzki predpriiati za schet primeneniia gibridnykh nakopitelei elektroenergii [Load smoothing of enterprises through the use of hybrid energy storage systems]. *Izvestiia Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta "MAMI"*, 2020, no. 1 (43), pp. 27-34. DOI: 10.31992/2074-0530-2020-43-1-27-34

18. Vinogradov A.V., Vinogradova A.V., Bukreev A.V., Brataniuk V.A. Vyravniwanie grafika elektricheskoi nagruzki fermy KRS s primeneniem nakopitelia elektroenergii [Smoothing the electric load profile of a livestock farm using energy storage system]. *Agrotekhnika i energoobespechenie*, 2023, no. 1 (38), pp. 20-30.
19. Nikishin A.Iu, Kharitonov M.S., Zubavichius R.V. Nakopitel' elektroenergii kak sredstvo regulirovaniia elektropotrebleniia morskogo porta [Energy storage system as a means of regulating electricity consumption in a seaport]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*, 2021, no. 4-4 (54), pp. 87-93. DOI: 10.37220/MIT.2021.54.4.012
20. Pomogaev Iu.M., Lakomov I.V., Zobov S.Iu., Sheredekin V.V. Formirovanie grafikov nagruzok transformatorov [Formation of transformer load schedules]. *Nauka i obrazovanie na sovremennom etape razvitiia: opyt, problemy i puti ikh resheniia. Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Voronezh, 25 November 2021*. Voronezh: Voronezhskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet imeni Imperatora Petra I, 2021, pp. 430-437.
21. Programmnyi produkt SimInTech. Obshchestvo s ogranichennoi otvetstvennost'iu "3V Servis" (OOO "3VS") [SimInTech software product. Limited Liability Company "3V Service" (LLC "3VS")], available at: <https://simintech.ru/> (accessed 09 January 2025).
22. Spravochnik po proektirovaniu elektricheskikh setei [Handbook for designing electrical networks]. Ed. D.L. Faibisovich. 4nd ed. Moscow: ENAS, 2012, 376 p.
23. Gerasimenko A.A., Gerasimenko A.A., Fedin V.T. Peredacha i raspredelenie elektricheskoi energii [Transmission and distribution of electric energy]. Moscow: KnoRus, 2014, 648 p.
24. Poliakov A.M. Metodika modelirovaniia elektricheskoi chasti elektrostantsii v SimInTech [Methodology of modeling the electrical part of a power plant in SimInTech]. Moscow: DMK Press, 2023, 144 p.
25. Gmurman V.E. Teoriia veroiatnostei i matematicheskaiia statistika [Probability theory and mathematical statistics]. 10nd ed. Moscow: Vysshaia shkola, 2004, 479 p.

Сведения об авторах

Жилин Евгений Витальевич (Москва, Российская Федерация) – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Энергетика и энергоэффективность горной промышленности» Горного института Университета науки и технологий МИСИС (119049, Москва, Ленинский пр., д. 4, стр. 1, e-mail: zhilin.ev@misis.ru).

Лёвин Даниил Дмитриевич (Москва, Российская Федерация) – аспирант кафедры «Энергетика и энергоэффективность горной промышленности» Горного института Университета науки и технологий МИСИС (119049, Москва, Ленинский пр., д. 4, стр. 1, e-mail: m1805181@edu.misis.ru).

About the authors

Evgenii V. Zhilin (Moscow, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the “Department of Energy and Energy Efficiency” of the Mining Industry of the University of Science and Technology MISIS (119049, Moscow, Leninsky pr., 4 str. 1, e-mail: zhilin.ev@misis.ru).

Daniil D. Levin (Moscow, Russian Federation) – Postgraduate Student at the “Department of Energy and Energy Efficiency” of the Mining Industry of the University of Science and Technology MISIS (119049, Moscow, Leninsky pr., 4 str. 1, e-mail: m1805181@edu.misis.ru).

Поступила: 12.02.2025. Одобрена: 04.03.2025. Принята к публикации: 15.03.2025.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов по отношению к статье.

Вклад авторов. Авторы сделали равноценный вклад в подготовку статьи.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Жилин, Е.В. Моделирование суточной потребляемой нагрузки систем электро-снабжения / Е.В. Жилин, Д.Д. Лёвин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2025. – № 53. – С. 177–192. DOI: 10.15593/2224-9397/2025.1.09

Please cite this article in English as:

Zhilin E.V., Levin D.D. Modeling of daily consumed load in power supply systems. *Perm National Research Polytechnic University Bulletin. Electrotechnics, information technologies, control systems*, 2025, no. 53, pp. 177-192. DOI: 10.15593/2224-9397/2025.1.09