



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.39

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-12-157-168>

ИССЛЕДОВАНИЕ МУЛЬТИЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА МЕТОДАМИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

© Н.И. Воропай¹, Е.В. Уколова², Д.О. Герасимов³,
К.В. Суслов⁴, П. Ломбарди⁵, П. Комарницки⁶

^{1,2}ФГБУН Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, 664033, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130.

^{2,3,4}ФГБОУ ВО Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

⁵Institute IFF Magdeburg, Sandtorstrasse 22, 39106 Magdeburg, Germany

⁶University of applied science Magdeburg-Stendal, Breitscheidstraße 2, 39114 Magdeburg, Germany

РЕЗЮМЕ: Рассмотрены принципы конструирования имитационной модели мультиэнергетического хаба. Исследован энергетический объект методами имитационного моделирования. Проведен анализ экономической эффективности от накопления электроэнергии и преобразования электроэнергии в тепловую. При решении поставленной задачи применялась теория энергетических хабов, принципы имитационного моделирования в системе MatLab. В статье описана техническая возможность реализации мультиэнергетической системы. Представлена функциональная схема мультиэнергетического объекта, выполненная в среде MatLab. На примере накопления и преобразования электроэнергии в тепло проанализирована экономическая эффективность применения принципов мультиэнергетического хаба. Тематическое исследование показывает эффективность разработанного программного обеспечения моделирования энергетического хаба. В данной статье в развитии изложенных подходов представлены принципы построения имитационной модели интегрированной мультиэнергетической системы энергоснабжения на основе использования концепции энергетического хаба. Приведен пример применения разработанной имитационной модели. Предлагаемый подход открывает широкую перспективу для исследования многих значительных проблем в интегрированных энергосистемах с несколькими несущими, включая их свойства, особенности расширения и эксплуатации. Эта статья вносит первый небольшой вклад в обсуждаемое важное направление исследования.

Ключевые слова: энергетический хаб, интегрированная система энергоснабжения, преобразователи энергии, накопители энергии, оптимизация энергопотребления, мультиэнергетические системы

Благодарности: Работа выполнена в рамках проекта III.17.4.1 фундаментальной исследовательской программы СО РАН # АААА-А17-117030310438-9.

¹Воропай Николай Иванович, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, e-mail: voropai@isem.irk.ru

Nikolai I. Voropai, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Corresponding Member of RAS, e-mail: voropai@isem.irk.ru

²Уколова Екатерина Владимировна, аспирант, e-mail: ukolovaekaterina@yandex.ru

Ekaterina V. Ukolova, Post-graduate student, e-mail: ukolovaekaterina@yandex.ru

³Герасимов Дмитрий Олегович, доцент кафедры электроснабжения и электротехники, e-mail: gerasimovdo@mail.ru
Dmitry O. Gerasimov, Associate Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, e-mail: gerasimovdo@mail.ru

⁴Суслов Константин Витальевич, кандидат технических наук, профессор кафедры электроснабжения и электротехники, e-mail: dr.souslov@yandex.ru

Konstantin V. Suslov, Cand. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, e-mail: dr.souslov@yandex.ru

⁵Ломбарди Пио, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник института организации и автоматизации промышленного производства Fraunhofer IFF, e-mail: pio.lombardi@iff.fraunhofer.de
Lombardi Pio, Candidate of technical sciences, Leading Researcher of the Institute of Organization and Automation of Industrial Production Fraunhofer IFF, e-mail: pio.lombardi@iff.fraunhofer.de

⁶Пшемислав Комарницки, кандидат технических наук, профессор по энергетической системе в Университете прикладных наук Магдебург и руководитель отдела
Przemyslaw Komarnicki, Candidate of technical sciences, Professor for the Power System at the University of Applied Sciences in Magdeburg, Head of the Department



Информация о статье: Дата поступления 18 октября 2018 г.; дата принятия к печати 20 ноября 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 декабря 2018 г.

Для цитирования: Воропай Н.И., Уколова Е.В., Герасимов Д.О., Суслов К.В., Ломбарди П., Комарницки П. Исследование мультиэнергетического объекта методами имитационного моделирования. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018;22(12):157–168. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-12-157-168

STUDY OF A MULTI-POWER FACILITY BY SIMULATION MODELING METHODS

N.I. Voropai, E.V. Ukolova, D.O. Gerasimov, K.V. Suslov, P. Lombardi, P. Komarnicki

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russian Federation
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation
Institute IFF Magdeburg, Sandtorstrasse 22, 39106 Magdeburg, Germany
University of applied science Magdeburg-Stendal, Breitscheidstraße 2, 39114 Magdeburg, Germany

ABSTRACT: The purpose of the paper is to consider the design principles of the multi-power hub simulation model, study the power facility by the methods of simulation modeling, analyze the economic efficiency of accumulation of electric power and its conversion into heat energy. The set problem is solved using the theory of energy hubs and the principles of simulation modeling in the MatLab system. The article describes the technical feasibility of a multi-power system implementation. The function block diagram of a multi-power facility made in the MatLab environment is presented. The economic efficiency of multi-power hub principle application is analyzed on example of electric energy accumulation and conversion into heat. The case study shows the efficiency of the developed software for energy hub modeling. The article presents the construction principles of the simulation model of the integrated multi-power system of power supply based on the concept of a power hub. An example of developed simulation model application is given. The proposed approach offers a broad perspective for the study of many significant problems in the integrated power systems with multiple carriers including their properties, features of their growth and operation. This article makes the first small contribution to the discussed important research direction.

Keywords: energy hub, integrated power supply system, energy converters, energy storage, energy consumption optimization, multi-power systems

Acknowledgements: The work is carried out under the project III.17.4.1 of the fundamental research program SB RAS # AAAAA 17-117030310438-9.

Information about the article: Received October 18, 2018; accepted for publication November 20, 2018; available online December 28, 2018.

For citation: Voropai N.I., Ukolova E.V., Gerasimov D.O., Suslov K.V., Lombardi P., Komarnicki P. Study of a multi-power facility by simulation modeling methods. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018; 22(12):pp. 157–168. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-12-157-168

Введение

Системы энергоснабжения, прежде всего системы электро-, тепло- и газоснабжения играют исключительно важную инфраструктурную роль в обеспечении функционирования отраслей экономики и жизнедеятельности населения любой страны. К инфраструктурным системам энергоснабжения предъявляются вполне конкретные требования по надежности энергоснабжения потребителей и качеству поставляемых им энергоресурсов, а также эффективности

функционирования и развития самих этих систем. Необходимо отметить возрастание требований потребителей к надежности и качеству в связи с цифровизацией и компьютеризацией технологических процессов их производства.

В [1] была высказана идея о том, что синергетическое рассмотрение систем энергоснабжения с различными формами энергии дает реальные возможности повышения эффективности энергоснабжения в



целом. С учетом этого была сформулирована концепция энергетического хаба, под которым понимается интегрированный объект с множествами входов и выходов, которые представляют различные виды энергии и с реализацией внутренних функций этого объекта по передаче, хранению и преобразованию различных видов энергии. Примером энергетического хаба является когенерационная установка [2]. В связи с появлением конкурирующих технологий у потребителей для реализации одних и тех же функций при использовании разных энергоресурсов (например, централизованное отопление от ТЭЦ либо с помощью электрообогревателей) таких потребителей можно рассматривать в виде энергетического хаба [2–6]. В [7–9] отмечается, что концепция энергетического хаба может применяться достаточно широко – от представления отдельного устройства, преобразующего несколько видов энергии до здания или части города. В [10] рассмотрена система энергетических хабов, в которой входами одного хаба являются выходы другого, что позволяет иссле-

довать мультиэнергетические интегрированные системы энергоснабжения.

Большое внимание уделяется моделированию энергетического хаба. В [11] в общем виде представлена система линейных алгебраических уравнений, матрица коэффициентов которой отображает преобразование одних видов энергии в другие и связывает входные переменные энергетического хаба, представляющие различные виды энергии, с его выходными переменными. В [12, 13] отмечается, что в общем случае коэффициенты преобразования одних видов энергии в другие могут иметь сложную внутреннюю структуру и содержать нелинейности, что существенно затрудняет решение задач на основе концепции энергетического хаба.

В данной статье в развитии изложенных подходов представлены принципы построения имитационной модели интегрированной мультиэнергетической системы энергоснабжения на основе использования концепции энергетического хаба. Приведен пример применения разработанной имитационной модели.

Принципы конструирования модели и их реализация

В основу конструирования имитационной модели интегрированной мультиэнергетической системы заложены следующие базовые положения:

Средствами Matlab/Simulink разработана универсальная модель энергетического хаба, включающего несколько входов и несколько выходов (например, входы – газ, электроэнергия и тепло, выходы – электроэнергия и тепло), а также функции передачи, преобразования и хранения различных видов энергии и суммирования одного вида энергии, поступающей по нескольким каналам. Используя универсальную модель хаба путем зануления некоторых входов и выходов и некоторых функций, формируются элементарные хабы, каждый из которых представляет модель элемента интегрированной мультиэнергетической системы энергоснабжения (например, когенерационная установка, трансформаторная

подстанция – повышающая или понижающая линия электропередачи, теплопровод системы теплоснабжения, накопитель электроэнергии, газопровод распределительной газовой сети, комплексный потребитель, потребляющий электроэнергию, тепло и газ, потребитель, потребляющий только электроэнергию или только газ, и т.п.).

Функции, реализуемые каждым элементарным хабом по передаче, преобразованию или/и хранению того или иного вида энергии, а также суммирования одного вида энергии, поступающей по нескольким каналам, моделируются полиномами до третьего порядка, аппроксимирующими реальные характеристики элементарных хабов. В принципе, могут быть использованы и полиномы более высоких порядков. Коэффициенты аппроксимирующих полиномов определяются известными методами. При этом учитываются потери соответствующего



энергоносителя при его передаче, накоплению и преобразованию как функций соответствующего хаба, или, иначе, – коэффициент полезного действия рассматриваемого хаба. Применение аппроксимирующих полиномов, помимо универсальности описания различных элементарных хабов, обеспечивает быстроедействие имитационной модели интегрированной мультиэнергетической системы при приемлемой точности этой модели.

Кроме аппроксимирующих полиномов, моделирующих функции элементарных хабов, при необходимости задаются ограничения на входные и/или выходные перемен-

ные элементарных хабов, отражающие реальные технологические ограничения на переменные состояния элементов реальных систем энергоснабжения.

В качестве универсальной энергетической единицы измерения различных видов энергии (электроэнергия, газ, тепло и др.) используется джоуль.

Имитационная модель интегрированной мультиэнергетической системы конструируется путем соединения входов и выходов элементарных хабов в соответствии со схемами соединения реальных элементов, моделируемых элементарными хабами.

Имитационная модель энергетического хаба

На рис. 1 приведена обобщенная функциональная структура имитационной модели энергетического хаба для трех каналов энергоснабжения (электроэнергии, тепла и газа) на примере программной реализации [14]. Эти каналы связывают источ-

ники электрической, тепловой и газовой энергии с электрическими, тепловыми и газовыми нагрузками, реализуя несколько основных функций – передачу, преобразование, преобразование друг в друга и хранение различных видов энергии.

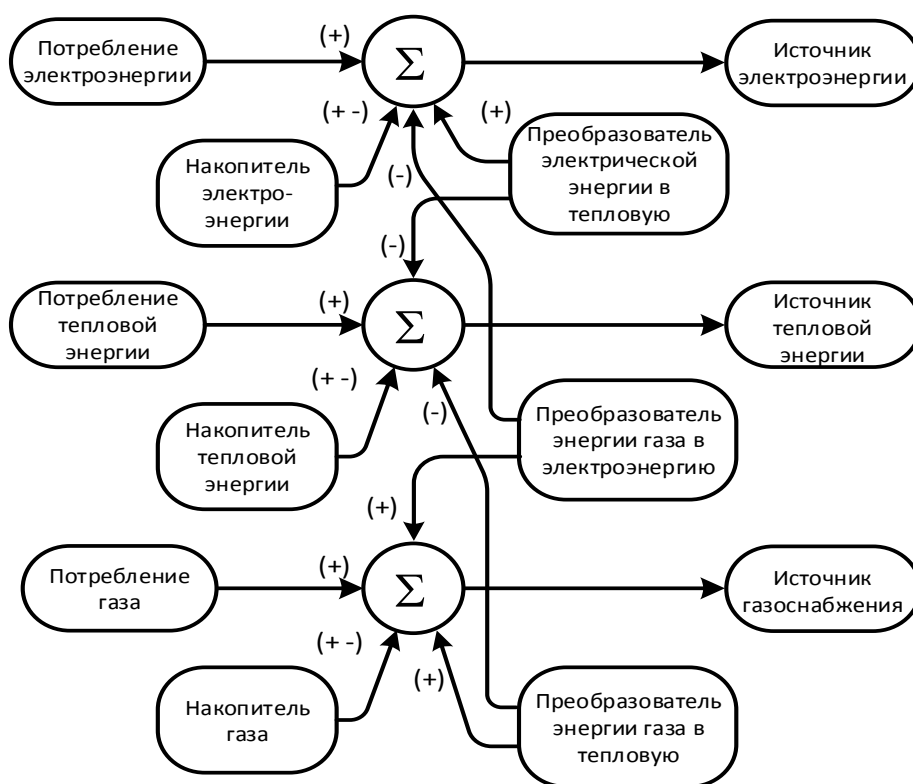


Рис. 1. Обобщенная функциональная структура имитационной модели энергетического хаба (1 – каналы электроснабжения, 2 – теплоснабжения и 3 – газоснабжения)

Fig. 1. Generalized functional structure of the energy hub simulation model (1 – electric energy supply channels, 2 – heat supply channels and 3 – gas supply channels)



На рис. 2 представлена уточненная функциональная схема по одному из каналов энергоснабжения имитационной модели общего энергетического хаба с учетом специфики имитационного моделирования в среде Matlab/Simulink.

Функциональная схема состоит из структурных блоков, каждый из которых реализует определенную функцию. Функция передачи – передача энергии от одного узла к другому с учетом потерь энергии, но без преобразования. Функция преобразования занимается трансформацией энергетических параметров (уровень напряжения трансформатором, уровень давления газа насосом и др.) без преобразования в другой вид энергии. Функция преобразования – это преобразование одного вида энергии в другой. Функция хранения связана с накопле-

нием энергии в блоке памяти. Суммирование – дополнительная важная функция для того, чтобы перераспределить энергию между различными каналами энергоснабжения (см. Блок суммирования в диаграмме 1).

На рис. 3 представлена внутренняя структура для двух узлов передачи и преобразования энергии, созданных средствами Matlab/Simulink. Каждая единица общей модели энергетического хаба может рассматриваться как элементарный хаб.

Предложенная имитационная модель позволяет учитывать распределение потоков энергии с учетом изменения стоимости различных видов энергии. А также определить экономическую целесообразность использования систем хранения и конверсионных систем.

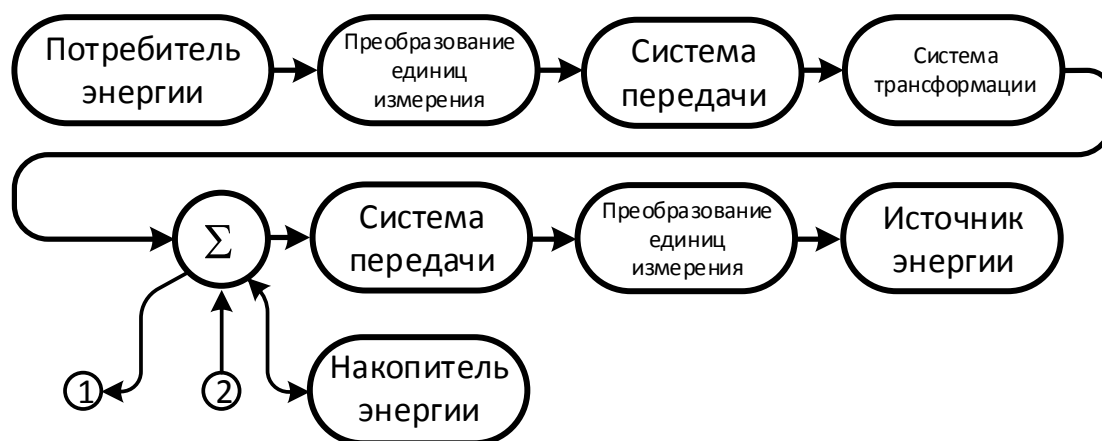


Рис. 2. Функциональная схема канала энергоснабжения имитационной модели энергетического хаба
Fig. 2. Functional diagram of the electric energy supply channel of the energy hub simulation model

Стадия исследования

Рассмотрим интегрированную систему энергопотребления одного здания университетского городка на основе концепции энергетического хаба. Потребление энергетических диаграмм в течение года представлено на рис. 4 (электричество) и 5 (тепло). Произведен расчет стоимости потребленной тепло- и электроэнергии. Дополнительная плата за электроэнергию взимается в часы пикового потребления элект-

троэнергии. Цены на потребленную электроэнергию и тепло рассчитываются на основании полученных данных по энергоснабжению. На рис. 6 и 7 представлен расчет ежемесячных платежей за потребленную электроэнергию и тепло.

Анализ потребления электроэнергии по месяцам позволил выявить периоды времени, когда оплата за электроэнергию имеет максимальное значение. Это произошло в часы пиковой нагрузки в системе.

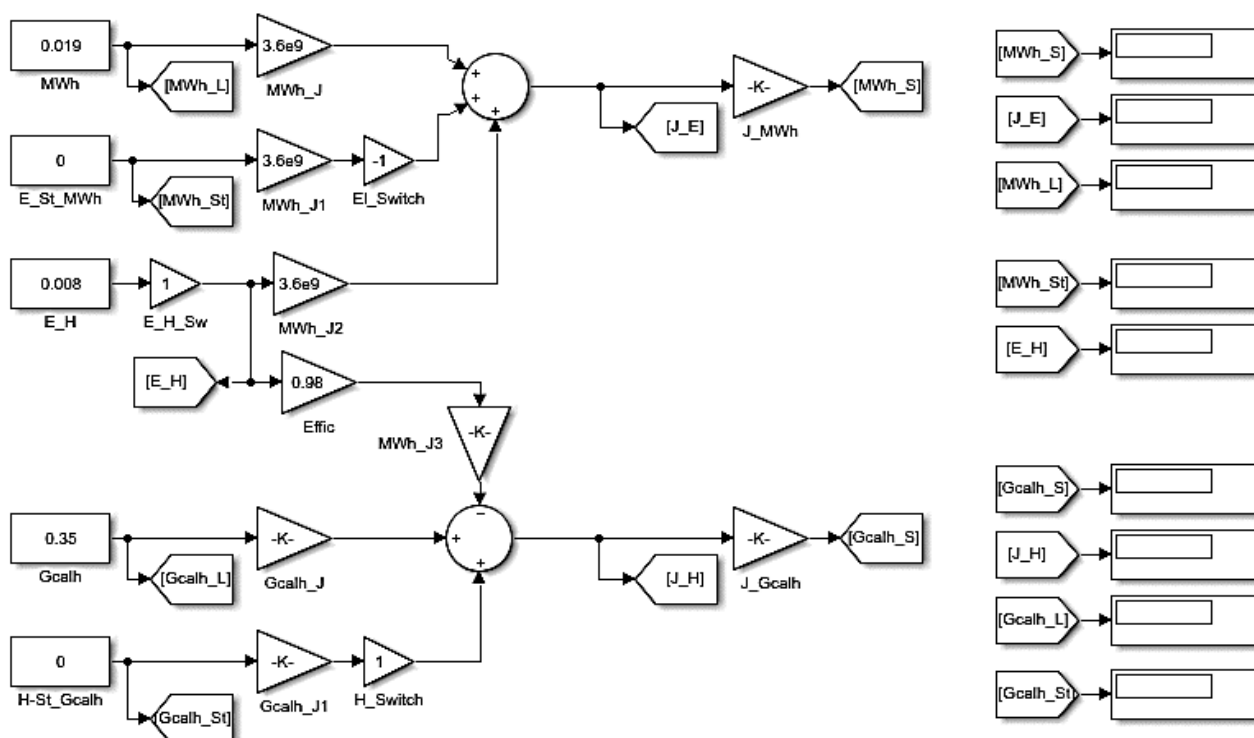


Рис. 3. Имитационная модель энергетического хаба по двум каналам энергоснабжения
Fig. 3. Simulation model of an energy hub by two power supply channels

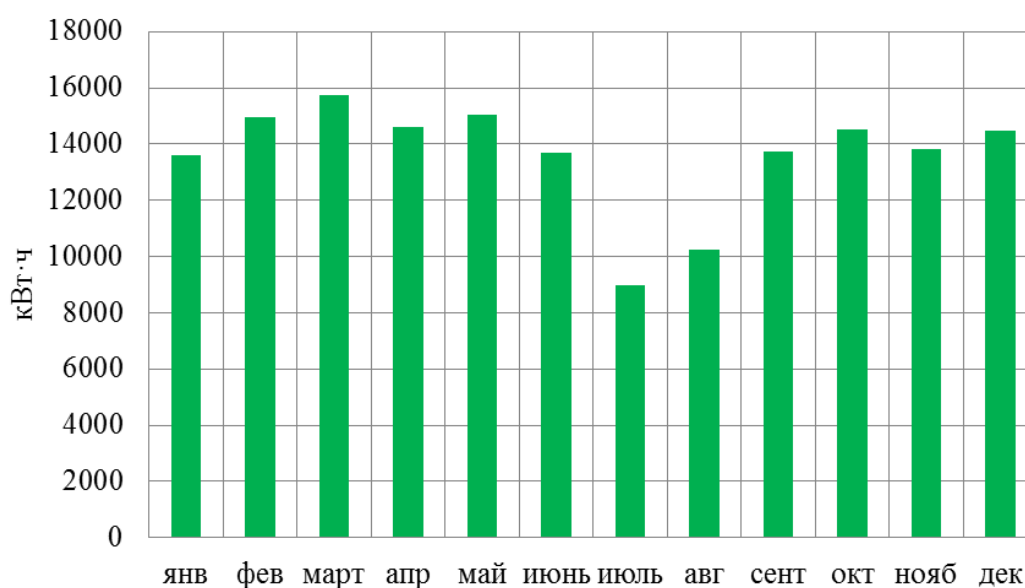


Рис. 4. Потребление электроэнергии
Fig. 4. Electric energy consumption

На рис. 8 приведены среднегодовые данные о перегрузках в пиковые часы (выделены красным (темным) цветом). Фактически, на рис. 9 показана средняя пиковая нагрузка потребляемой мощности в неделю.

Данные получены путем наложения месячных пиковых нагрузок. Таким образом, были идентифицированы характерные периоды перегрузки в течение дня. Стоит отметить, что в предложении мы учитывали рабочие и нерабочие дни.

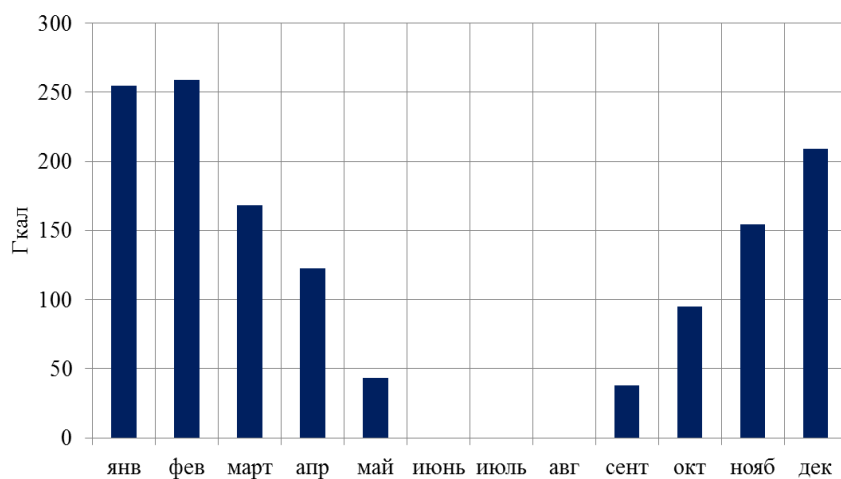


Рис. 5. Теплопотребление
Fig. 5. Heat consumption

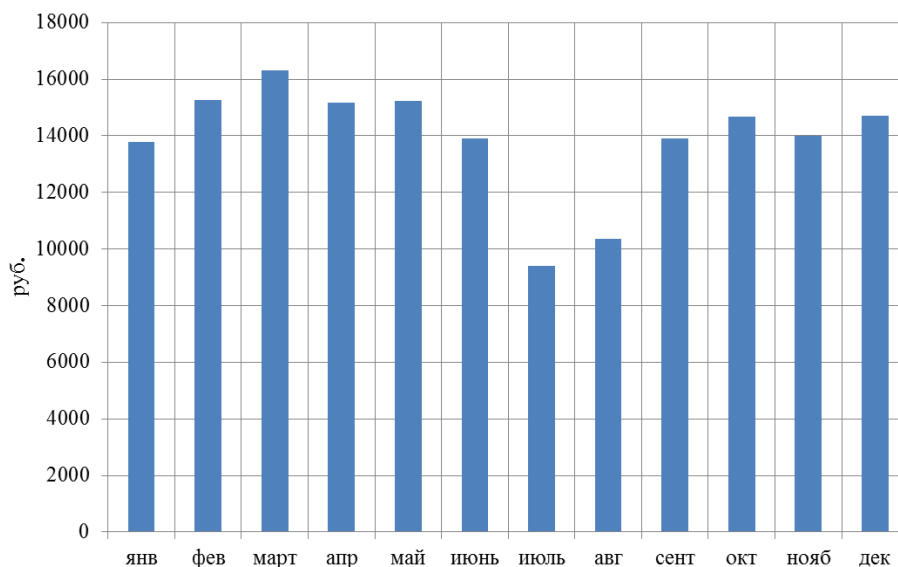


Рис. 6. Оплата за электропотребление
Fig. 6. Electricity billing

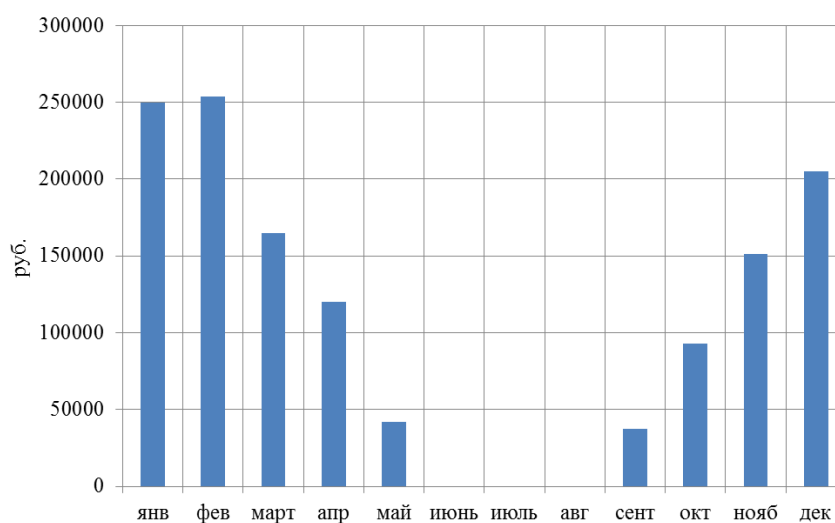


Рис. 7. Оплата за теплопотребление
Fig. 7. Heat billing



		Понедельник	Вторник	Среда	Четверг	Пятница	Суббота	Воскресенье
Время суток	0:00-5:00							
	5:00-6:00	x	x	x	x	x		
	6:00-7:00	x	x	x	x	x		
	7:00-8:00	x	x	x	x	x		
	8:00-9:00							
	9:00-10:00	x		x				
	10:00-11:00		x		x	x		
	11:00-12:00	x				x		
	12:00-13:00							
	13:00-14:00							
	14:00-15:00	x	x	x	x	x		
	15:00-16:00	x	x	x	x	x		
	16:00-17:00	x	x	x	x	x		
	17:00-18:00	x	x	x	x	x		
	18:00-00:00							

Рис. 8. Среднегодовые данные о перегрузке в часы пиковой нагрузки по дням эквивалентной недели
Fig. 8. Average annual data on overloading at the peak load hours by days of an equivalent week

Как показывает диаграмма, изображенная на рис. 8, расчет оплаты за электроэнергию включал два временных периода максимальных значений тарифов. Интересно оценить возможную оплату электроэнергии без учета дополнительной платы за пиковые периоды. Следует отметить, что в России оплата электроэнергии состоит из трех частей. Расчет оплаты за потребленную электроэнергию производился дифференцированным тарифом в трехчасовых зонах.

Тариф:

t_1 – пиковая зона (с 7 до 10 и с 17 до 21 ч) = 1,378 руб/кВт·ч;
 t_2 – полупиковая зона (с 10 до 17 и с 21 до 23 ч) = 1,06 руб/кВт·ч;
 t_3 – ночная зона (с 23 до 7 часов) = 0,705 руб/кВт·ч;

Целевая функция:

$$P_{\text{пик}} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $P_{\text{пик}}$ – пиковая нагрузка,

$$C \rightarrow \min, \quad (2)$$

где C – затраты на энергию.

Чтобы снизить пиковые нагрузки и уменьшить платежи за электроэнергию и тепло, предлагается использовать комплексную модель мультиэнергетической системы. Для этого предлагается преобразовывать электроэнергию в тепло в ночной период.

Для решения этой задачи производится расчет количества электроэнергии, потенциала для преобразования:

$$E_p = (E_{\text{max}} - E_{\text{min}}) \cdot 30, \quad (3)$$

где E_p – электроэнергии для преобразования и хранения; E_{max} – максимальное значение суточного расхода электроэнергии; E_{min} – минимальное ежедневное потребление электроэнергии.

Таким образом, величина E_p будет равна 1425, 24 кВт·ч.

Плата за электроэнергию для преобразования:

$$C_p = E_p \cdot t_3, \quad (4)$$

где t_3 – тариф на электроэнергию в ночное время.



В результате расчетов, с использованием (4), плата за электроэнергию (C_p) равна 1023,7 руб.

Первый вариант снижения затрат – использование системы хранения электроэнергии в ночное время и в часы пиковой нагрузки. Затраты на электроэнергию:

$$C = E_1 t_1 + E_2 t_2 + E_3 t_3, \quad (5)$$

где t_1 – тариф на электроэнергию в пиковой зоне; t_2 – тариф на электроэнергию в полупиковой зоне; t_3 – тариф на электроэнергию в ночное время.

Для этого предполагается накапливать электроэнергию в системах хранения, рассчитанных по формуле (3).

Оплата рассчитывается с помощью (4) и (5):

$$C_1 = E_p \cdot t_1. \quad (6)$$

При применении системы хранения электроэнергии в ночное время и использовании ее в дневное время можно значительно снизить затраты (рис. 9).

Таким образом, задача заключается в снижении пиковой нагрузки на электроэнергию с использованием возможностей интегрированных систем спроса на электроэнергию и тепло по различным тарифным сценариям на электроэнергию и тепло. Исследуем эту проблему с помощью имитационных экспериментов на основе имитационной модели энергетического хаба.

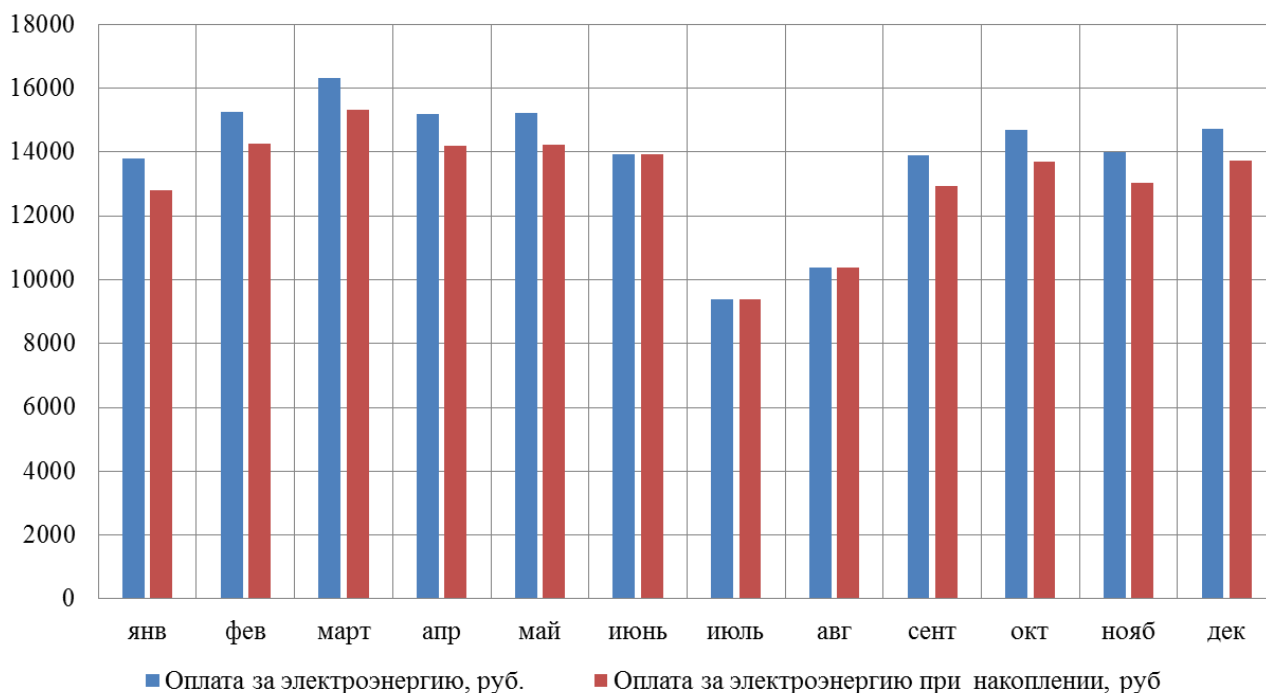


Рис. 9. Экономический эффект от накопления электроэнергии в ночной период
Fig. 9. Economic effect of electric energy accumulation in the night period

Имитационный эксперимент

В имитационных экспериментах рассматриваются следующие условия. Расчет преобразования электроэнергии в тепловую, учитывая коэффициент полезного действия, выполняется с использованием имитационной модели (рис. 3 и рис. 4) в раз-
мере:

1 кВт·ч = 0,00086 Гкал.

Таким образом, можно покрыть часть потребления тепловой энергии (рис. 10).

Экономический эффект от использования преобразования электроэнергии показан на диаграмме (рис. 11).

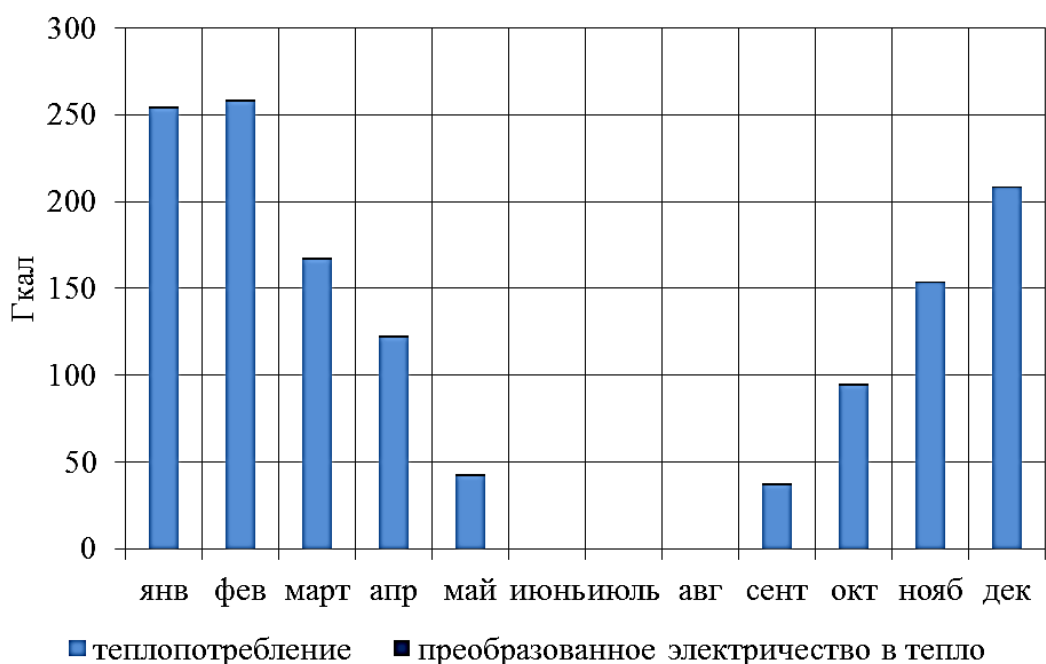


Рис. 10. Расход тепловой энергии отдается на преобразование электроэнергии
Fig. 10. Heat consumption given to electric energy conversion

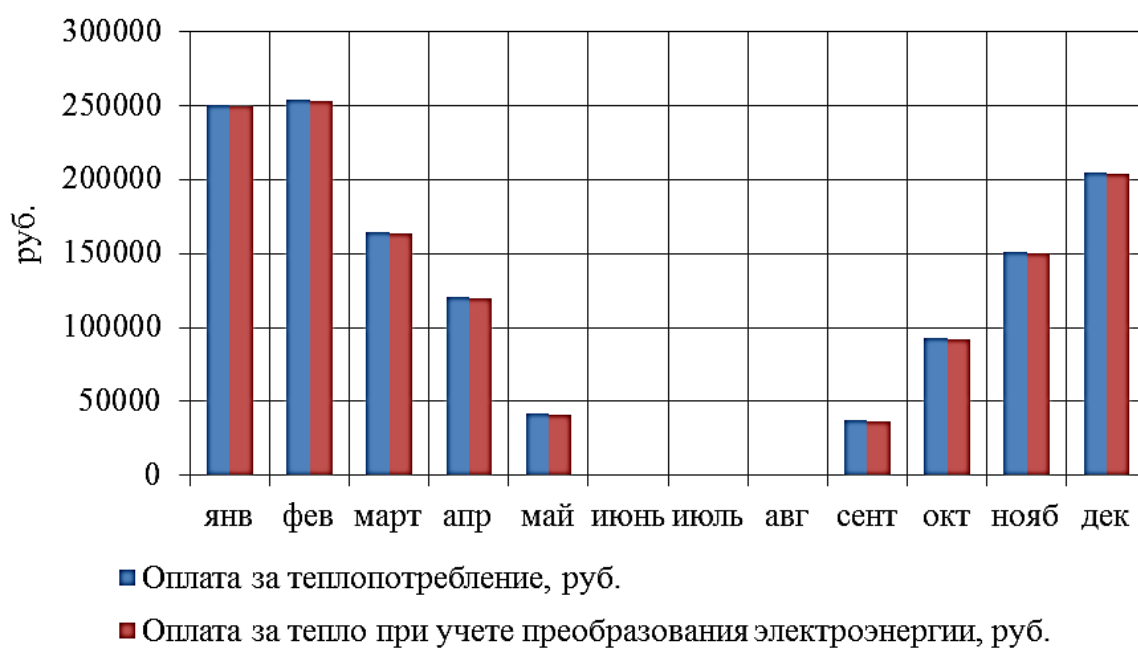


Рис. 11. Оплата за тепло при преобразовании электроэнергии
Fig. 11. Heat billing when converting electric energy

Выводы

Концепция энергетического хаба является очень конструктивным подходом к моделированию интегрированных комплексных энергетических систем. В этой статье вышеупомянутый подход разработан

путем формализации процесса моделирования для лучшего рассмотрения особенностей комплексной мультэнергетической системы при изучении ключевых проблем для таких систем. Тематическое исследование



показывает эффективность разработанного программного обеспечения моделирования энергетического хаба.

Необходимо отметить следующую актуальную проблему для будущей работы, которая касается построения имитационной модели с использованием моделей элементарных хабов для изучения сложных мультиэнергетических систем. Предлагаемый

подход открывает широкую перспективу для исследования многих значительных проблем в интегрированных энергосистемах с несколькими несущими, включая их свойства, особенности расширения и эксплуатации. Эта статья вносит первый небольшой вклад в обсуждаемое важное направление исследования.

Библиографический список

1. Geidl M., Koppel G., Favre-Perrod P., Klok B., Andersson G., Frohlich K., Energy hubs for the future // IEEE Power and Energy Magazine. 2007. Vol. 5. No. 1. P. 24–30.
2. Воропай Н.И., Стенников В.А. Интегрированные интеллектуальные энергетические системы // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2014. № 1. С. 64–73.
3. Le Blond S., Lewis T., Sooriyabandara M., Towards an integrated approach to building energy efficiency: Drivers and enablers // IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies, Manchester, UK. 2011. P. 1–8.
4. Krause T., Kienzle F., Liu Yang, Andersson G., Modeling interconnected national energy systems using an energy hub approach // IEEE Power Tech Conference, Trondheim, Norway. 2011. P. 1–7.
5. Mohammadi M., Noorollahi Y., Mohammadi-ivatloo B., Hosseinzadeh M., Torabzadeh Khorasani S. Optimal management of energy hubs and smart energy hubs – A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 89. June 2018. P. 33–50.
6. Vahid Davatgaran V., Mohsen Saniei M., Saeidollah Mortazavi S. Optimal bidding strategy for an energy hub in energy market // Energy. 2018. Vol. 148. P. 482–493.
7. Koppel G., Andersson G., Reliability modeling of multi-carrier energy systems // Energy. 2009. Vol. 34. P. 235–244.
8. Khorsand H., Reza Seifi A. Probabilistic energy flow for multi-carrier energy systems // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 94. P. 989–997.
9. Wang J., Zhong H., Ma Z., Xia Q., Kang C. Review and prospect of integrated demand response in the multi-energy system // Applied Energy. 2017. Vol. 202. P. 772–782.
10. Moeini-Aghtaie M., Abbaspour A., Fotuhi-Firuzabad M., Hajipour E., A decomposed solution to multiple energy carriers optimal power flow // IEEE Transactions on Power Systems. 2014. Vol. 29. No. 2. P. 707–716.
11. Xiaping Z., Shahidehpour M., Alabdulwahab A., Abu-sorrah A., Optimal expansion planning of energy hub with multiple energy infrastructures // IEEE Transactions on Smart Grid. 2015. Vol. 6. No. 5. P. 2302–2311.
12. Beccuti G., Demiray T., Batic M., Tomasevic N., Vranes S., Energy hub modeling and optimization: An analytical case study // IEEE Power Tech, Eindhoven, Netherlands, 2015. P. 1034–1040.
13. Tronchin L., Manfren M., Nastasi B. Energy efficiency, demand side management and energy storage technologies – A critical analysis of possible paths of integration in the built environment // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 95. P. 341–353.
14. А. с. 2018611255. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Программа для определения характеристик и оптимальных параметров функционирования мульти-энергетической системы / Герасимов Д.О., Суслов К.В., Уколова Е.В., Уколова Е.В.; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «ИРНИТУ» (РФ). № 2017662368; заявл. 30.11.17; опубл. 26.01.18. Реестр программ для ЭВМ. 1 с.

References

1. Geidl M., Koppel G., Favre-Perrod P., Klok B., Andersson G., Frohlich K., Energy hubs for the future. IEEE Power and Energy Magazine, 2007, vol. 5, no. 1, pp. 24–30.
2. Voropaj N.I., Stennikov V.A. Integrated intelligent power systems. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Energetika* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering], 2014, no. 1, pp. 64–73. (In Russian)
3. Le Blond S., Lewis T., Sooriyabandara M., Towards an integrated approach to building energy efficiency: Drivers and enablers. IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies, Manchester, UK, 2011, pp. 1–8.
4. Krause T., Kienzle F., Liu Yang, Andersson G., Modeling interconnected national energy systems using an energy hub approach. IEEE Power Tech Conference, Trondheim, Norway, 2011, pp. 1–7.
5. Mohammadi M., Noorollahi Y., Mohammadi-ivatloo B., Hosseinzadeh M., Torabzadeh Khorasani S. Optimal management of energy hubs and smart energy hubs – A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 89, June 2018, pp. 33–50.



6. Vahid Davatgaran V., Mohsen Saniei M., Saeidollah Mortazavi S. Optimal bidding strategy for an energy hub in energy market. *Energy*, 2018, vol. 148, pp. 482–493.
7. Koppel G., Andersson G., Reliability modeling of multi-carrier energy systems. *Energy*, 2009, vol. 34, pp. 235–244.
8. Khorsand H., Reza Seifi A. Probabilistic energy flow for multi-carrier energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 94, pp. 989–997.
9. Wang J., Zhong H., Ma Z., Xia Q., Kang C. Review and prospect of integrated demand response in the multi-energy system. *Applied Energy*, 2017, vol. 202, pp. 772–782.
10. Moeini-Aghaie M., Abbaspour A., Fotuhi-Firuzabad M., Hajipour E., A decomposed solution to multiple energy carriers optimal power flow. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, vol. 29, no. 2, pp. 707–716.
11. Xiaping Z., Shahidehpour M., Alabdulwahab A., Abu-sorrah A., Optimal expansion planning of energy hub

with multiple energy infrastructures. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015, vol. 6, no. 5, pp. 2302–2311.

12. Beccuti G., Demiray T., Batic M., Tomasevic N., Vranes S., Energy hub modeling and optimization: An analytical case study. *IEEE Power Tech*, Eindhoven, Netherlands, 2015, pp. 1034–1040.
13. Tronchin L., Manfren M., Nastasi B. Energy efficiency, demand side management and energy storage technologies – A critical analysis of possible paths of integration in the built environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 95, pp. 341–353.
14. Gerasimov D.O., Suslov K.V., Ukolova E.V., Ukolova E.V. *Programma dlya opredeleniya harakteristik i optimal'nyh parametrov funkcionirovaniya mul'ti-energetich-eskoj sistemy* [Program for determination the characteristics and optimal operation parameters of a multi-power system]. Patent RF, no. 2017662368, 2018.

Критерии авторства

Воропай Н.И., Уколова Е.В., Герасимов Д.О., Суслов К.В., Ломбарди П., Комарницки П., подготовили рукопись и несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Voropai N.I., Ukolova E.V., Gerasimov D.O., Suslov K.V., Lombardi P., Komarnicki P., prepared the manuscript for publication and bear the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.