

УДК 621.316:004.414.22

## ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ РЕАЛИЗУЕМОСТИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С НАКОПИТЕЛЯМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

**Белов В.Ф., Буткина А.А., Занкин А.И.**

*ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева», Саранск, e-mail: belovvf@mail.ru*

В настоящее время во многих развитых странах, провозгласивших курс на возобновляемую энергетику, широко распространен переход на использование микросетей, функционирование которых реализуется по технологии Smart Grid. В связи с этим все более актуальной становится задача проектирования систем электроснабжения на основе накопителей электроэнергии с автоматическим управлением потоками мощности. Для рабочего проектирования таких систем важно не только сформулировать технические требования, но также убедиться в наличии инструментов для их анализа и осуществимости с экономической точки зрения для планирования и управления при проектировании. В данной работе выявлены и сформулированы основные требования, предъявляемые к системе электроснабжения с накопителями электрической энергии, определены критерии их оценки, исследованы условия реализуемости требований в аспектах инструментального обеспечения проектирования и особенностей эксплуатации микросетей с накопителями электрической энергии.

**Ключевые слова:** проектирование, накопитель энергии, требования, архитектура, условия реализации требований

## INVESTIGATION OF FEASIBILITY CONDITIONS OF AN ELECTRIC POWER SUPPLY SYSTEM WITH ENERGY STORAGE CAPABILITY

**Belov V.F., Butkina A.A., Zankin A.I.**

*National Research Mordovia State University, Saransk, e-mail: belovvf@mail.ru*

Nowadays the usage of renewable energy is a priority for many developed countries. Therefore the using of micro grids realizing the Smart Grid technology is becoming more and more widespread. In this regard, designing problem of electric power supply systems based on electric energy storage device with automatic control of power flows becomes more and more urgent. For the working design of such systems, it is important not only to formulate technical requirements, but also to be convinced of the existence of tools for their analysis and feasibility from the economic point of view for planning and management in the design. In this paper, the main requirements for the electric power supply systems with energy storage capability are identified and formulated, the criteria for their evaluation are determined; the feasibility conditions of requirements from the point of view of instrumental support for design and the features of operation of micro grid with electric energy storage device are investigated.

**Keywords:** design, energy storage device, requirements, architecture, conditions for the implementation of requirements

В соответствии с «дорожной картой» «Энерджинет» Национальной технологической инициативы [1], принятой в сентябре 2016 г., интеллектуализация энергетики рассматривается как один из основных инструментов реализации Энергетической стратегии России. Приоритетными задачами «дорожной карты» являются разработка комплексных решений для микросетей, т.е. автономных электрических сетей, объединяющих несколько пользователей и источников электрической энергии, а также создание методов и технических средств интеллектуального управления конечным электропотреблением по экономическому критерию в режиме реального времени.

В работе [2] предложена концепция одного из комплексных решений для микросетей – система управления куплей-продажей электрической энергии владельцами частных домов. В зарубежной литературе примеры реализации микросетей описа-

ны в работах [3, 4]. Проблемы, связанные с продажей энергии в микросети, рассмотрены в работах [5–7]. В [8, 9] рассматривается комбинирование различных типов энергоустановок для повышения надежности всей микросети. Многообразие неисследованных проблем и нерешённых задач при реализации микросетей придаёт особое значение начальным этапам их разработки, когда формируются требования, от качества определения которых решающим образом зависит эффективность проектирования. Для перехода к рабочему проектированию системы электроснабжения на основе накопителей электроэнергии с автоматическим управлением потоками мощности (далее Система) важно не только сформулировать технические требования, но также убедиться в возможности их анализа на стадии проектирования и осуществимости с экономической точки зрения.

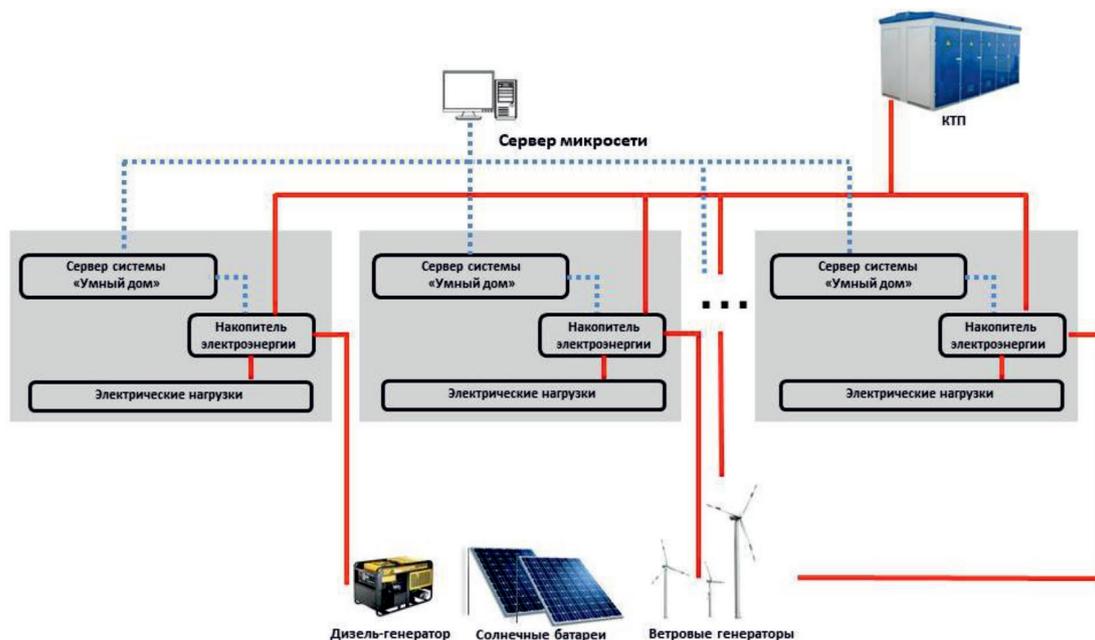


Рис. 1. Структура Системы

Структура Системы представляет собой интернет подобную сеть, показанную на рис. 1 и объединяющую аппаратную и информационную подсистемы. Аппаратная часть включает в себя: накопитель электрической энергии; сервер микросети; сервер системы «Умный дом»; собственные источники электрической энергии; комплектную трансформаторную подстанцию (КТП), обеспечивающую доступ к центральной сети электроснабжения. Информационная часть состоит из программного обеспечения сервера микросети и сервера системы «Умный дом».

Идентификация требований и определение их атрибутов являются ключевым фактором эффективности управления проектированием и производством Системы, а также успешности ее внедрения для широкого круга пользователей. В процессе проектирования требования могут изменяться, но чрезвычайно важно правильно сформулировать исходные требования на начальном этапе управления проектом.

С учётом структуры Системы для сетей низкого напряжения 0,4 кВ перечень базовых требований будет включать:

- способы и средства связи для информационного обмена между компонентами;
- эргономику и техническую эстетику;
- среду эксплуатации;
- функционал накопителя электрической энергии;

– доступность и экономическую эффективность.

Определим атрибуты базовых требований в порядке их перечисления.

Программно-технические средства компонентов Системы должны соответствовать стандартам интерфейса Ethernet с использованием протокола TCP/IP.

Взаимодействие пользователей с системой должно осуществляться посредством визуального графического интерфейса (GUI); ввод-вывод данных, прием управляющих команд и отображение результатов их исполнения должны выполняться в интерактивном режиме и в реальном масштабе времени; интерфейс должен соответствовать современным эргономическим требованиям и обеспечивать удобный доступ к основным функциям и операциям, выполняемым подсистемами.

Среда эксплуатации должна соответствовать следующим условиям:

– сеть высокопроизводительного взаимодействия вычислительных средств со скоростью обмена данными между конечными узлами серверного комплекса сети не менее 10 Мбит/сек (Fast Ethernet);

– электропитание технических средств от сети напряжением 220 В с частотой 50 Гц с глухозаземленной нейтралью;

– системы первичного электропитания по качеству электрической энергии должны соответствовать требованиям

ГОСТ 32144-2013, а по электромагнитной совместимости и устойчивости к электромагнитным помехам – ГОСТ Р 50628-2000 и ГОСТ 30804.3.2-2013.

Накопитель электрической энергии должен обеспечивать двухстороннее управление энергетическими потоками между подключенными к нему сетями электроснабжения и потребителями электроэнергии, работать в качестве источника бесперебойного питания, адаптера для подключения солнечных панелей, дизель-генератора и ветровых генераторов, выполнять роль регулятора напряжения и частоты, обеспечивать требуемое качество электрической энергии.

В соответствии с «дорожной картой» Система должна обеспечивать интеллектуальное управление конечным электропотреблением по экономическому критерию и, следовательно, должна окупать затраты на внедрение за приемлемый срок и приносить регулярную экономию денежных средств от ее использования.

Рассмотрим реализуемость этих требований в трёх аспектах:

1. Наличие математических моделей Системы для анализа технических требований (качество энергии, устойчивость к кондуктивным помехам, колебания напряжения и т.д.).

2. Наличие методологии построения и реализации сетевой архитектуры Системы.

3. Наличие экономических условий реализации Системы.

Ключевую роль в функционировании Системы играет накопитель электрической энергии, представляющий собой интеллектуальный AC/DC/AC преобразователь с аккумуляторной батареей (АБ). Такие накопители объединяются в энергоинформационную сеть с двухсторонним движением электрической энергии и информации. Из этого следует необходимость математического моделирования объединённых в энергосистему большого количества AC/DC/AC преобразователей, к каждому из которых подключена собственная нагрузка. Для решения этой задачи в [10] разработан специальный алгоритм моделирования, учитывающий каскадное построение AC/DC/AC преобразователей, а также их взаимодействие через сеть электроснабжения друг с другом и источниками электрической энергии. В [11] доказана возможность реализации модели AC/DC преобразователя с АБ в качестве элемента такой системы. Модель АБ представляется в виде RLC-цепи, что теоретически и экспериментально обосновано в работе [12].

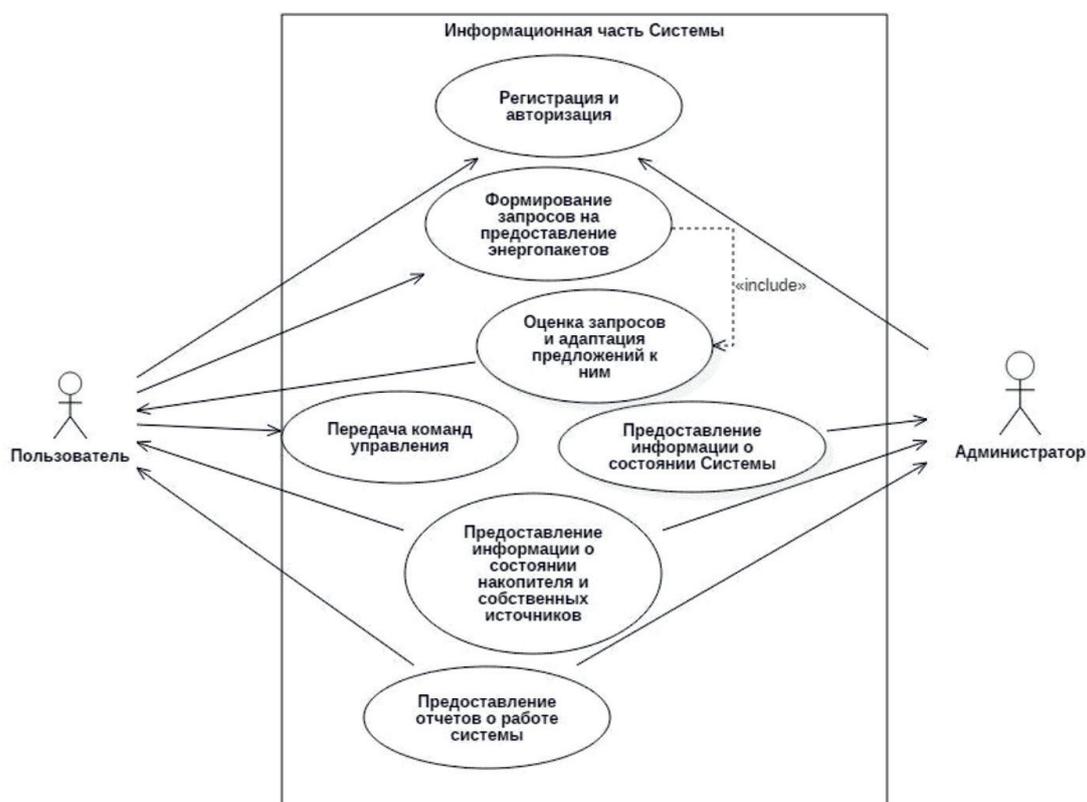


Рис. 2. Диаграмма вариантов использования

Рассмотрим разработку архитектуры Системы в соответствии с методологией UP (Unified Process) и с применением языка UML (Unified Modeling Language). Спецификация Системы будет состоять из следующих основных частей: концептуальная модель, модель размещения, модель реализации. Концептуальная модель описывает участников, основные сценарии и варианты (прецеденты) работы системы. Взаимоотношения участников и прецедентов представлены на диаграмме вариантов использования (рис. 2).

Модель размещения описывает варианты физического размещения элементов Системы (рис. 3).

Модель реализации отражает разделение Системы на отдельные компоненты, независимые задачи, подпрограммы, информационные и управляющие потоки и связи между элементами системы (рис. 4).

Таким образом, стандартное представление базовой спецификации системы набором UML-диаграмм создаёт возможности для дальнейшей проработки архитектуры на основе методологии UP вплоть до генерации кода при наличии математического обеспечения модулей.

Например, в [13] приведено описание математического обеспечения модуля прогнозирования потребления электроэнергии, как решение задачи оптимизации графика потребления электрической энергии в домохозяйстве.

Рассмотрим условия реализуемости экономических требований при внедрении Системы. На настоящий момент договор присоединения к электрическим сетям не предусматривает для частного лица возможности генерации электроэнергии в сеть, а лишь разрешает ее потребление. В соответствии с дорожной картой «Энерджинет» изменения в законодательство будут внесены к 2020 г.

К основным механизмам, стимулирующим использование альтернативных источников электрической энергии, можно отнести:

- беспрепятственное подключение солнечных и ветровых электростанций к сетям;
- компенсацию стоимости технологического подсоединения;
- специальные повышенные закупочные тарифы на электрическую энергию от солнечных панелей и ветровых генераторов.

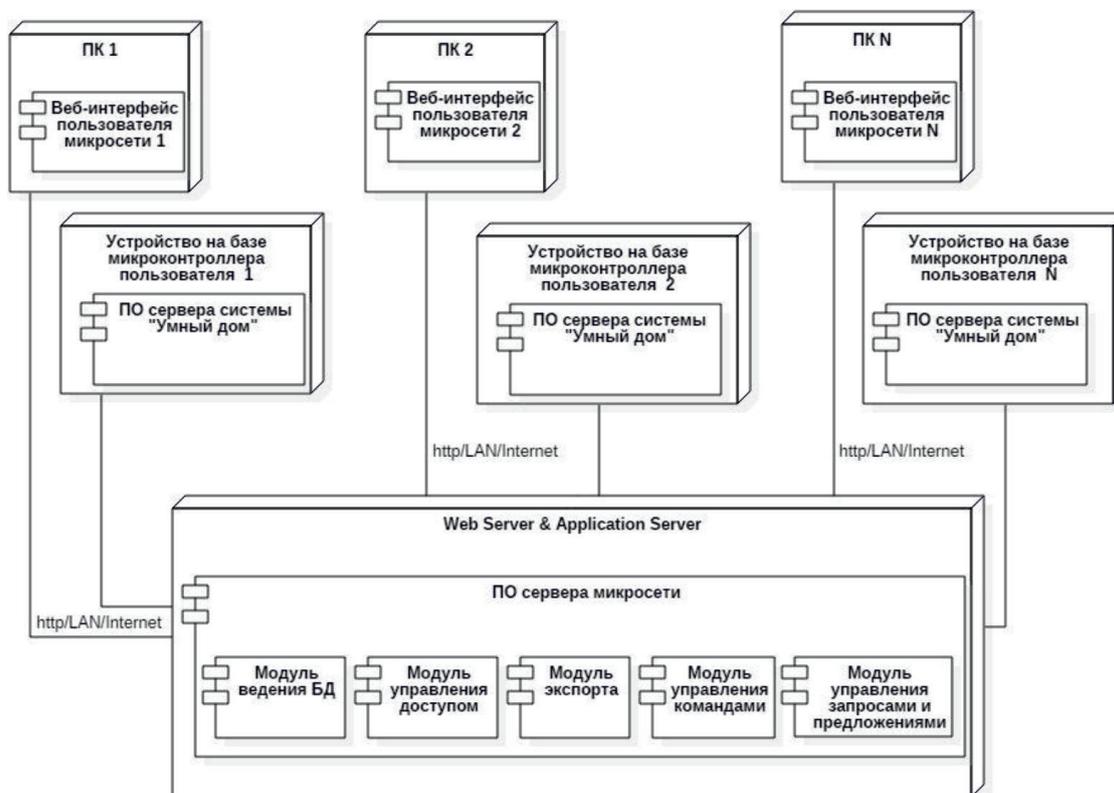


Рис. 3. Диаграмма развертывания Системы

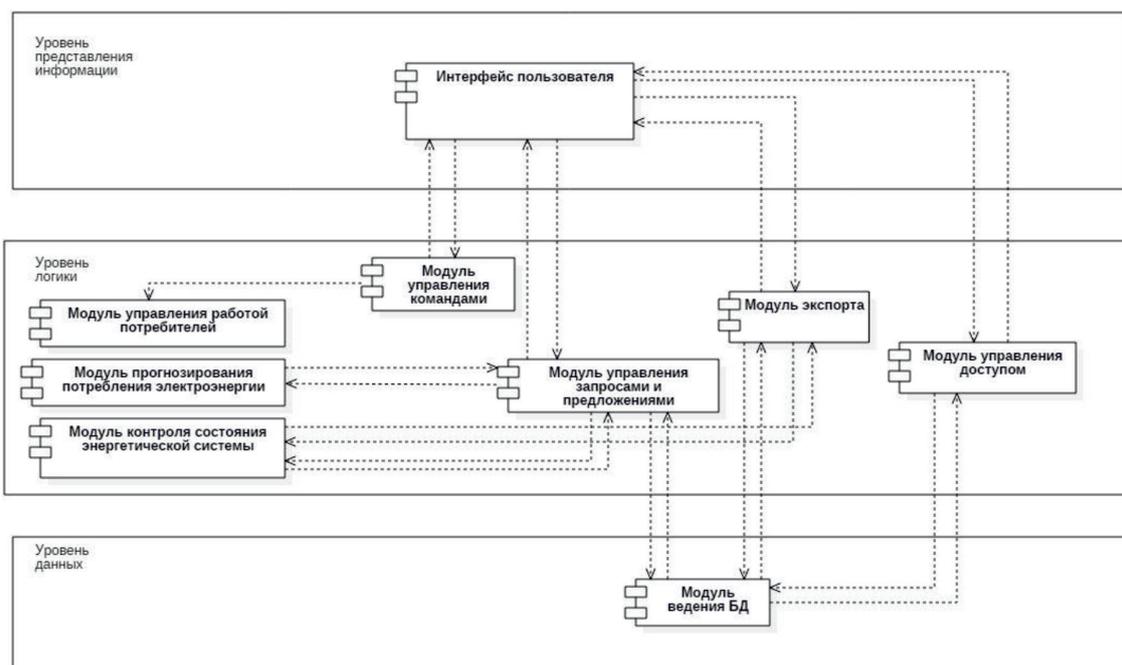


Рис. 4. Модель реализации Системы

Приведем краткий экономический анализ на примере внедрения Системы в Германии. В качестве исходных данных примем общедоступную статистику:

- среднее потребление электроэнергии домохозяйством в сутки составляет 30 кВт×ч;
- количество стабильно солнечных месяцев, с продолжительным световым днем – 6;
- средний объем продажи электроэнергии домохозяйством в сутки равен 6 кВт×ч;
- тариф на электроэнергию для среднестатистической семьи составляет в Германии от 0,3\$ за кВт×ч и более.

Следовательно, затраты домохозяйства на электроэнергию в год без установки Системы будут составлять  $30 \text{ кВт} \times \text{ч} \times 365 \times 0,3\$ = 3285\$$ .

Основные затраты, требуемые при внедрении Системы:

1. Затраты на приобретение основных конструктивных элементов (панели, крепеж, кабель), используемых при монтаже солнечных панелей – 4690\$.

2. Интеллектуальный AC/DC/AC преобразователь – 5000\$.

3. Оплата труда проектировщика, инженера и монтажников – 350\$.

Следовательно, общая стоимость по внедрению будет составлять 10040\$.

Рассмотрим расчет экономии домохозяйства от внедрения Системы:

1. Затраты домохозяйства на электроэнергию в год при наличии Системы без дополнительных функций:  $30 \text{ кВт} \times \text{ч} \times 183 \times 0,3\$ = 1647\$$ .

2. Годовой доход домохозяйства от реализации функции продажи электроэнергии (с учетом компенсации технологического подсоединения, специальных повышенных закупочных тарифов на электроэнергию от альтернативных источников энергии) составит:  $6 \text{ кВт} \times \text{ч} \times 183 \times 0,5\$ = 549\$$ .

3. Годовой доход домохозяйства от реализации функции покупки электроэнергии по выгодному тарифу при часовой тарификации, равному 10% от затрат:  $1647\$ \times 0,1 = 165\$$ .

4. Годовой доход домохозяйства от реализации, запасенных в накопителе излишков электроэнергии, купленной у централизованного поставщика и участников микросети по выгодному тарифу, равному 10% от затрат:  $1647\$ \times 0,1 = 165\$$ .

Следовательно, общий доход от функции «купля-продажа» составит  $549\$ + 165\$ + 165\$ = 879\$$ , а затраты домохозяйства на электроэнергию в год при наличии Системы с дополнительными функциями будут равны:  $1647\$ - 879\$ = 768\$$ . Таким образом, годовая экономия домохозяйства от внедрения Системы составит:  $3285\$ - 768\$ = 2517\$$ . Срок окупаемости затрат домохозяйства:  $10040\$ / 2517\$ \approx 4$  года.

### Выводы

1. Границы реализуемости систем электроснабжения с накопителями электрической энергии могут быть определены при многоаспектном подходе к анализу требований.

2. Современного инструментального обеспечения процессов параметрического, структурного и архитектурного проектирования систем электроснабжения с накопителями электрической энергии вполне достаточно для управления требованиями в процессе их реализации.

3. Условием реализуемости систем электроснабжения с накопителями электрической энергии являются компенсация стоимости технологического подсоединения и специальные повышенные закупочные тарифы на электрическую энергию от солнечных панелей и ветровых генераторов.

### Список литературы

1. ПЛАН мероприятий («дорожная карта») «Энерджинет» Национальной технологической инициативы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.nti2035.ru/markets/docs/DK\\_energynet.pdf](http://www.nti2035.ru/markets/docs/DK_energynet.pdf) (дата обращения: 07.07.2017).

2. Belov V., Butkina A., Bolschikov F., Leisner P., Belov I. Power quality and EMC solutions in micro grids with energy-trading capability // Proc. of the 2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (Gothenburg, Sweden, September 1–4, 2014). – P. 1203–1208.

3. Zhao B., Zhang X., Li P., Wang K., Xue M., and Wang C. Optimal sizing, operating strategy and operational experience

of a stand-alone microgrid on Dongfushan Island // Applied Energy. – 2014. – vol. 113. – P. 1656–1666.

4. Hatzigiorgiou N., Asano H., Iravani R., and Marnay C. Microgrids: an overview of ongoing research, development, and demonstration projects // IEEE Power and Energy Magazine. – 2007. – vol. 5, № 4. – P. 78–94.

5. Gregoratti D., Matamoros J. Distributed Energy Trading: The Multiple-Microgrid Case // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2015. – vol. 62, № 4. – P. 2551–2559.

6. Kahrobaee S., Rajabzadeh R. A., Soh L.-K., Asgarpoor S. A multiagent modeling and investigation of smart homes with power generation, storage, and trading features // IEEE Trans. Smart Grid. – 2013. – vol. 4, № 2. – P. 659–668.

7. Wang Y., Saad W., Han Z., Poor H. V., Bašsar T. A game-theoretic approach to energy trading in the smart grid // IEEE Trans. Smart Grid. – 2014. – vol. 5, № 3. – P. 1439–1450.

8. Hafez O., Bhattacharya K. Optimal planning and design of a renewable energy based supply system for microgrids // Renewable Energy. – 2012. – vol. 45. – P. 7–15.

9. Su W., Yuan Z., Chow M.-Y. Microgrid planning and operation: solar energy and wind energy // Proc. of the IEEE PES General Meeting (Minneapolis, July 25–29, 2010). – P. 1–7.

10. Belov V., Leisner P., Johansson A., Paldyaev N., Belov I. Mathematical modelling of a wind power system with an integrated active filter // J. Electric Power Systems Research. – 2009. – vol. 79, № 1. – P. 117–125.

11. Белов В.Ф. Математическое моделирование систем преобразования электрической энергии для микросетей / В.Ф. Белов, А.А. Буткина, А.В. Шамаев // Автоматизация процессов управления. – 2014. – № 2 (36). – С. 43–51.

12. Чупин Д.П. Параметрический метод контроля эксплуатационных характеристик аккумуляторных батарей: дис. ... канд. техн. наук (05.11.13) / Чупин Дмитрий Павлович; Омский государственный технический университет. – Омск, 2014. – 203 с.

13. Рожкова С.А. Построение оптимального графика потребления электрической энергии в микросетях / С.А. Рожкова, В.Ф. Белов, А.А. Буткина // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 9–11. – С. 2416–2420.