

УПРАВЛЕНИЕ ПОТОКАМИ МОЩНОСТИ В ЛОКАЛЬНЫХ СЕТЯХ

Четошникова¹ Л.М., Смоленцев² Н.И., Томских¹ Н.В., Гимгина¹ Д.А.,
Лаврентьева¹ Д.А.

¹Южно-Уральский государственный университет (НИУ), г. Челябинск, Россия

²Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики,
г. Новосибирск, Россия

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6483-4053>, chlm56@mail.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в разработке способов и методов подключения распределенных сетей с альтернативными источниками к централизованным систем электроснабжения. ЦЕЛЬ. Показать перспективы развития локальных электрических сетей с распределенной генерацией. Изменения, происходящие в последнее время в электроэнергетике, заставляют пересматривать требования как к инфраструктуре, так и объектам электроэнергетики. Показать, что подключение распределенных генераторов и потребителей электрической энергии к сети сопряжено с определенными сложностями. Решение задачи качественного и бесперебойного электроснабжения потребителей требует нового подхода, связанного с использованием современных технологий Smart Grid, в равной мере относящихся и к энергетике, и к информационно-технологической области. Отмечается, что для реализации такой масштабной задачи была разработана «дорожная карта» «Энерджинет» Национальной технологической инициативы, среди основных направлений которой указываются цифровизация инфраструктуры распределительных сетей и глубокая децентрализация производства электроэнергии. Рассмотреть в соответствии с выделенными направлениями сегменты рынка интеллектуальной энергетики, к которым относятся: надёжные и гибкие распределительные сети, интеллектуальная распределённая энергетика и потребительские сервисы. Предложить вариант решения задачи на примере локальной микросети низкого напряжения с распределенной генерацией МЕТОДЫ. Решение задачи предлагается на базе создания симуляционной модели, с помощью которой можно выполнить ряд тестов и получить оптимальный в пределах данной области ошибки режим сети, осуществить различные варианты структуры микросети, количества и вида генераторов, уровня нагрузки. Предложена структурная схема локальной сети. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье описан процесс управления потоками мощности между производителями (локальными распределенными источниками) и потребителями электроэнергии. Этот процесс осуществляется через единый управляющий центр, в который поступает информация о состоянии объектов микросети - уровне выработки электроэнергии генераторами и уровне текущей нагрузки потребителей. По результатам обработки информации в управляющем центре принимается решение о перераспределении мощности между объектами. Предложена схема, описывающая динамический процесс перемещения мощности для эффективного управления ресурсами в сети распределения мощности. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Рассмотренный алгоритм управления мощностью представляет собой простую реализацию классической балансировки нагрузки, и при этом позволяет обеспечить оптимальное распределение энергии в пределах заданной ошибки. Оптимальным, в данном случае, будет состояние системы, при котором все распределенные возобновляемые источники энергии, используются в полном объеме для удовлетворения потребностей локальной микросети, при этом снижая до минимума потребление от сети. При этом дополнительно необходимо ввести поправки на неравномерность и нестабильность выработки электроэнергии возобновляемыми источниками энергии.

Ключевые слова: Локальная электрическая сеть; распределенная генерация; управление потоками энергии; распределение мощности.

Благодарности: Работа выполнена в рамках Государственного задания 071-03-2023-001 от 19.01.2023 г.

Для цитирования: Четошникова Л.М., Смоленцев Н.И., Томских Н.В., Гимгина Д.А., Лаврентьева Д.А. Управление потоками мощности в локальных сетях // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 5. С. 74 – 82. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-5-74 – 82.

LOCAL POWER FLOW CONTROL

Chetochnikova¹ L.M., Smolentsev² N.I., Tomskich¹ N.V., Gimgina¹ D.A., Lavrentieva¹ D.A.

¹South Ural State University. National Research University, Chelyabinsk, Russia

²Siberian State University of Telecommunications and Information Sciences,
Novosibirsk, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6483-4053>, chlm56@mail.ru

THE PURPOSE. Show the prospects for the development of local electric networks with distributed generation. Recent changes in the electric power industry are forcing the revision of the requirements for both infrastructure and power facilities. Show that the connection of distributed generators and consumers of electrical energy to the network is fraught with certain difficulties. Solving the problem of high-quality and uninterrupted power supply to consumers requires a new approach associated with the use of modern Smart Grid technologies, equally related to energy and information technology. It is noted that for the implementation of such a large-scale task, the "road map" "Energynet" of the National Technology Initiative was developed, among the main directions of which are the digitalization of the infrastructure of distribution networks and the deep decentralization of electricity production. Consider, in accordance with the identified areas, the segments of the smart energy market, which include: reliable and flexible distribution grids, smart distributed energy and consumer services. Propose a solution to the problem using the example of a local low voltage microgrid with distributed generation. **METHODS.** The solution to the problem is proposed on the basis of creating a simulation model, with the help of which it is possible to perform a number of tests and obtain the optimal network mode within a given error area. implement various options for the structure of the microgrid, the number and type of generators, the load level. The structural diagram of the local network is proposed. **RESULTS.** The article describes the process of managing power flows between producers (local distributed sources) and consumers of electricity. This process is carried out through a single control center, which receives information about the state of the micro-grid objects - the level of electricity generation by generators and the level of the current load of consumers. Based on the results of information processing in the control center, a decision is made on the redistribution of power between objects. A scheme describing the dynamic process of power transfer for efficient resource management in the power distribution network is proposed. **CONCLUSION.** The considered power management algorithm is a simple implementation of classical load balancing, and at the same time allows for optimal energy distribution within a given error. Optimal, in this case, will be the state of the system, in which all distributed renewable energy sources are used in full to meet the needs of the local micro-network, while reducing to a minimum the consumption from the network. At the same time, it is also necessary to introduce corrections for the unevenness and instability of electricity generation by renewable energy sources.

Keywords: Local electrical network, distributed generation, energy flow control, power distribution.

Acknowledgements: The work was completed within the framework of the State assignment 071-03-2023-001 dated 01/19/2023.

For citation: Chetochnikova L.M., Smolentsev N.I., Tomskich N.V., Gimgina D.A., Lavrentieva D.A. Local power flow control. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2023; 25 (5): 74 – 82. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-5-74-82.

Введение (Introduction)

Энергосистема России представляет собой централизованную систему производства и распределения энергии. Выработка электроэнергии производится на крупных ТЭЦ, ГЭС, ГРЭС и далее, на повышенном напряжении, поступает в энергосистему, а затем – в распределительную сеть. На каждом этапе оперативный персонал контролирует, регулирует и управляет частотой, напряжением, перетоками активной и реактивной мощности и т.д. Такая традиционная схема работы энергосистемы существовала длительное время и существует сейчас. Но в последнее время в отечественной электроэнергетике наметилась тенденция внедрения в действующую энергосистему объектов распределенной генерации. Цель исследований заключается в разработке способа интеллектуального управления распределённой генерацией. Это вызвано необходимостью создания такой инфраструктуры, которая смогла бы обеспечить увеличивающийся рост энергопотребления с одновременным снижением нагрузки на окружающую среду.

Научная значимость исследования состоит в том, что вся информация о состоянии сети, узлах нагрузки, локальных источниках и передаваемой мощности сосредотачивается в коммуникационной инфраструктуре, которая основывается на коммуникационном протоколе, составленном согласно выбранной стратегии сетевого менеджмента. Создаваемая инфраструктура предполагает соединение в сети распределенных локальных источников энергии, в том числе и на возобновляемых источниках, микросетей, энергоёмких накопителей энергии, а также виртуальных электрических станций, способных обеспечить сглаживание пиков нагрузки и создавать резерв мощности в системе. Практическая значимость исследования заключается в том, что обеспечить функционирование такой инфраструктуры невозможно без современных технологий и устройств, без оперативного интеллектуального управления. Ожидаются изменения в способах производства, распределения и потребления электроэнергии, а также в образе жизни населения. Это станет возможным благодаря современным технологиям, развитию технологий накопления энергии, новой парадигме развития электроэнергетики «Энерджинет» и новым подходам к решению актуальных задач.

Литературный обзор (Literature Review)

Вопросы распределенной генерации в сетях низкого напряжения сейчас являются актуальными и обсуждаются на разных уровнях в стране и за ее пределами [1,2]. Связано это с тем, что некоторые предприятия стараются минимизировать затраты на электроэнергию и обеспечить энергетическую независимость за счет внедрения объектов собственной генерации. Такими объектами могут служить мини-ТЭЦ, дизель-генераторы, установки, использующие возобновляемые источники энергии. Все это оправдано до тех пор, пока не возникнет желание выдавать излишки произведенной энергии в централизованную сеть. Последствия такого шага могут быть неожиданными и, чаще всего, не способствующими устойчивой работе энергосистемы. Использование интеллектуального управления значительно уменьшает влияние распределенной генерации на сеть без ущерба надежности работы сети. Одной из проблем, которые необходимо решить при подключении распределенных генераторов к сети, является сложность внедрения единых стандартов из-за различия в типах используемых источников, режимах и мощности нагрузки, состояния местной сети и т.д.[3].

Вследствие этого при большом количестве подключаемых генераторов возникает необходимость в создании сложной системы расчета, телекоммуникационной сети и диспетчеризации. Особенно обостряется ситуация при авариях и ненормальных режимах, например, при отключении участка сети. Поэтому для подключения распределенных генераторов к сети потребуется установка специального оборудования, позволяющего осуществлять дистанционное управление. Решить такую непростую задачу на локальном уровне невозможно. Ее решение требует совершенно иного подхода, который будет связан с использованием современных технологий Smart Grid, в равной мере относящихся и к энергетике, и к информационно-технологической области [1]. Открытая сетевая архитектура, созданная для объектов разного уровня, станет платформой для комплексных систем и интеллектуальных сервисов новой энергетики. В этом случае все объекты, и потребители, и производители энергии должны иметь возможность просто подключаться и пользоваться энергосистемой по подобию использования Интернета [4]. Неизменно при этом встает задача определить, как влияет новая архитектура сети на стабильность и надежность сети. Можно ли через распределенную генерацию улучшить работу сети без каких-либо существенных изменений для текущей инфраструктуры сети.

Умная сеть (*Smart Grid*) рассматривается как альтернатива для улучшения эффективности, надежности и гибкости существующей сети. Для достижения этого необходимо выстраивать дополнительную инфраструктуру, внедрять передовые технологии, ведущие к фундаментальным изменениям в архитектуре сети [5].

Для реализации такой масштабной задачи Министерством энергетики Российской Федерации была разработана дорожная карта «Энерджинет» Национальной технологической инициативы [6]. Назначением «дорожной карты» является систематизация комплекса проектов и мероприятий для обеспечения выхода российских компаний с новыми продуктами и сервисами на глобальные рынки новой энергетики. Основными направлениями реализации дорожной карты заявлены: цифровизация инфраструктуры распределительных сетей и глубокая децентрализация производства электроэнергии.

В связи с этим повышенный интерес у энергетических компаний, ученых и просто потребителей электрической энергии вызывают именно умные локальные электрические сети (ЛЭС) низкого напряжения [7,8]. Иными словами, умной сетью можно считать процесс трансформации от текущей электросети к сети будущего.

Ключевыми задачами будущей сети являются мониторинг, защита и автоматическая оптимизация операций взаимосвязанных элементов. Эти элементы включают центральное и распределенное генерирование тока, промышленных потребителей, установки по накоплению энергии, а также конечных потребителей с их электробытовой техникой и приборами. Будущее поколение электрических сетей будет обеспечено системами локального и дистанционного контроля, способными быстро обрабатывать большое количество информации. Такая система способна отслеживать изменения и регулировать выработку электроэнергии локальными источниками, соединенными с микросетью и на основании информации, полученной от приборов со стороны спроса, обеспечивать электроэнергией узлы нагрузки. Кроме этого, в функцию системы контроля должен входить сбор информации о состоянии сети, работоспособности ее элементов, возникающих повреждениях и т.д. Поэтому на первом месте среди требований, предъявляемых к такой системе должны стоять надежность и быстродействие.

Использование в распределенных сетях в качестве генераторов возобновляемых источников энергии создает дополнительные сложности при создании системы контроля, технического и программного обеспечения. Эти сложности обусловлены случайностью и неравномерностью потоков солнечной и ветровой энергии. Поэтому дополнительно встает задача минимизации колебаний выработки энергии такими источниками, стабилизации и надежности работы сети.

Материалы и методы (Materials and methods)

Рассмотрена симуляционная модель как испытательного стенда интеллектуального управления (ИУЭ), позволяющая протестировать распределенные сети на предмет уязвимости при увеличении числа локальных генераторов энергии. Исследование модели проведено в программе *MATLAB - Simulink*.

Результаты (Results)

Вся информация о состоянии сети, узлах нагрузки, локальных источниках и передаваемой мощности сосредотачивается в коммуникационной инфраструктуре, которая основывается на коммуникационном протоколе, составленном согласно выбранной стратегии сетевого менеджмента [9]. Получение данных от распределенных сенсоров нагрузки сети станет основанием для формирования команды об отключении или включении элементов или участков сети, чтобы адаптировать структуру распределения к динамике генерации энергии и потребления.

Особое внимание следует обратить на то, как распределенная генерация влияет на вероятность каскадных повреждений, при которых отключения начинаются с первичного события, например, повреждения линии передачи, и затем распространяется внутри сети, приводя к катастрофическим отключениям сети в больших масштабах. Эту задачу можно решить путем разработки симуляционной модели, которая исследует уязвимость сети на каскадные повреждения при постепенном увеличении количества локальных генераторов. Применяя эту модель для нескольких тестовых случаев, можно выяснить, действительно ли локальная генерация тока может сокращать вероятность каскадных повреждений, даже когда происходит введение в сеть только небольшого количества локальных генераторов. С помощью такой модели можно также проследить эффект и выгоду при последовательном увеличении числа локальных генераторов [10,11,12].

На рисунке 1 представлена модель микросети (локальной электрической сети), как испытательного стенда интеллектуального энергетического управления (ИЭУ). Микросеть

– это распределительная сеть напряжением 6(10) кВ. В каждом ИЭУ – узле имеется трансформатор 6(10)/0.4 кВ, чья первичная обмотка соединена с источником питания микросети, а его вторичная обмотка – с нагрузкой, ВИЭ и накопителем энергии. На рисунке показаны три узла ИЭУ, установленные в моделируемой микросети.

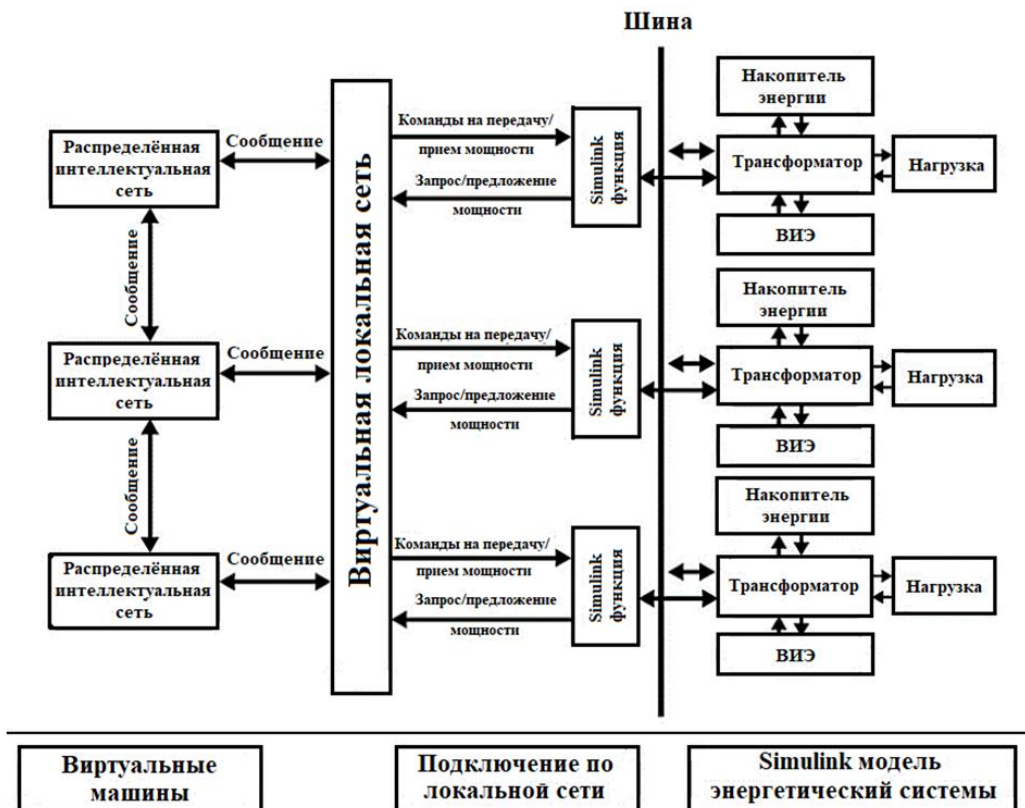


Рис. 1. Моделирование процесса управления энергией в распределенной интеллектуальной сети [14]

Fig. 1. Modeling of the energy management process in a distributed intelligent network [14].

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Силовой электрический трансформатор служит для:

- регулирования активных потоков мощности, отслеживающий сигналы от распределенной интеллектуальной сети;
- регулирования единичных энергетических параметров;
- сглаживания временных неравномерностей нагрузки и искажения напряжения;
- регулирования уровня напряжения с обеих сторон.

Типичный ВИЭ представлен в виде солнечных батарей или ветроэнергетической установки. Установка солнечных батарей регулируется в каждом узле ИЭУ в соответствии требованиями потребителя и системы. Одна солнечная батарея – набор солнечных модулей напряжением 200 В постоянного тока, мощностью 1,5 кВт при максимальном излучении.

Наиболее распространенный накопитель для локальной сети – стационарная свинцово-кислотная батарея выбрана из ряда других из-за относительной низкой цены и высокой надежности. Батарея на 120В постоянного тока, 35А·ч и может быть подобрана изменением числа аккумуляторов. В качестве более энергоемкого накопителя энергии можно использовать разрабатываемый в настоящее время накопитель на базе сверхпроводимости [13].

Все объекты микросети (нагрузка, источники и накопители энергии) в узлах ИЭУ могут быть выбраны в различных сочетаниях и конфигурациях для более полного изучения различных режимов.

Экспериментальная модель включает в себя окружение виртуальной машины, моделирующее передачу в распределительную интеллектуальную сеть от каждого узла, Simulink-модель и подсистемы энергетической системы, работающей на другом компьютере и S-функцию, которая связывает модель Simulink и процесс перемещения энергетических потоков [15]. Элементы модели взаимодействуют друг с другом по локальной сети на каждой машине. Каждый действующий узел посылает сигналы в модель через уникальные порты S-функции. В каждом узле процесс балансирования мощности получает основную

информацию о состоянии и параметрам нагрузки, возобновляемых источников, накопителей энергии и перемещаемым потокам от местного трансформатора в определенные промежутки времени. В экспериментальной модели *Simulink*-функция действует как микродиспетчер, который соединяет процесс передачи мощности с микросетью. При оценке параметров определяется состояние узла, как: «Нормальное», «Высокое» или «Низкое» и в результате происходит перераспределение и выравнивание мощности.

Адаптируя модель со схемой балансирования мощности, можно выполнить ряд тестов и получить оптимальный в пределах данной области ошибки режим сети. Оптимальный режим, предположительно, будет иметь место, когда все из распределенных возобновляемых источников энергии отвечают требованиям нагрузки в пределах микросети, минимизируя мощность потребления от сети. В этом случае, там могут существовать ИЭУ узлы с лишней генерируемой энергией (в Низком уровне), дефицитом энергии (в Высоком уровне), или ни тот, ни другой (в Нормальном уровне).

В каждом тесте различные значения мощности и энергетические изменения вводятся в *Simulink*-модель. Эти процессы определяют и отображают изменение локального состояния микросети, ВИЭ, накопителей энергии и потоков мощности, согласованную и выполненную передачу мощности

Пример экспериментальной локальной сети с распределенными источниками и узлами нагрузки показан на рисунке 2. Информация об уровне потребления энергии в отдельных узлах в режиме реального времени передается в управляющий центр. В таком же режиме собирается информация о выработанной в данный момент времени мощности производителями энергии (ПР). По результатам обработки запросов и предложений от объектов локальной сети осуществляется оптимальное регулирование и распределение мощности между потребителями (П).

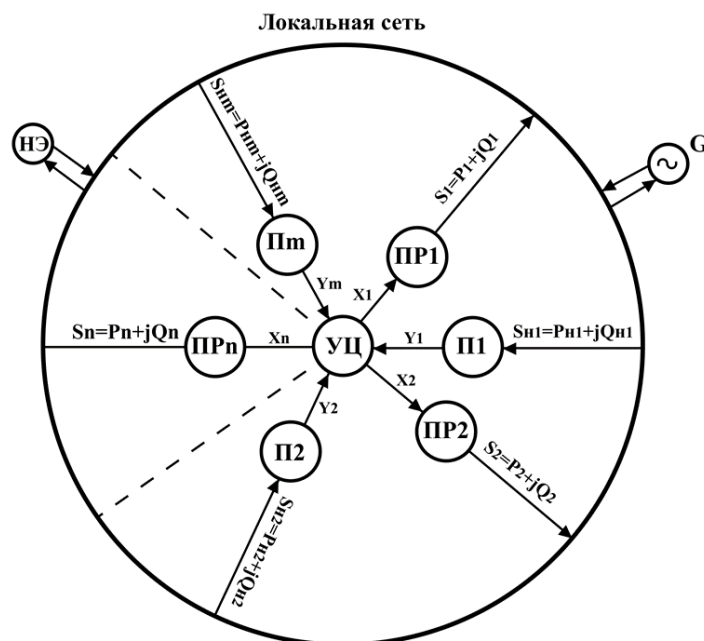


Рис. 2. Структурная схема локальной сети: $S_i = P_i + jQ_i$ – мощность, генерируемая i -м источником; $S_{nj} = P_{nj} + jQ_{nj}$ – мощность нагрузки j -го потребителя; x_i, y_j – управляющие сигналы (энергетические потоки); ПР и П – соответственно, производители и потребители электрической энергии, УЦ – управляющий центр

Fig. 2. Block diagram of the local network: $S_i = P_i + jQ_i$ – power generated by the i -th source; $S_j = P_{hj} + jQ_{nj}$ – load power of the j -th consumer; x_i, y_j – control signals (energy flows); PR and N – respectively, producers and consumers of electric energy, UC – management center

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В качестве источников электрической энергии, включенных в локальную распределительную сеть, могут служить ветроэнергетическая установка (ВЭУ), солнечные батареи (СБ), а также дизель- или бензогенераторная установка. Избыток вырабатываемой мощности отдается в сеть, откуда перераспределяется между потребителями, отправившими запрос на передачу недостающей мощности. В случае отсутствия запросов мощности от потребителей, источники обеспечивают питанием балластную нагрузку или зарядку накопителей энергии (НЭ). Накопители энергии вводятся в работу при отсутствии

ветра и солнца для бесперебойного электроснабжения потребителей электрической энергией.

Чтобы достигнуть экономической оптимизации и эффективного перемещения мощности через микросеть, необходимо в схему балансирования мощности включить функцию стоимости электроэнергии. Для этого следует установить цену энергии, накопленной батареей, производимой солнечными батареями и поступающей из резервной сети [16].

Заключение (Conclusions)

Рассмотренный алгоритм управления мощностью представляет собой простую реализацию классической балансировки нагрузки, и при этом позволяет обеспечить оптимальное распределение энергии в пределах заданной ошибки. Оптимальным, в данном случае, будет состояние системы, при котором все распределенные возобновляемые источники энергии, используются в полном объеме для удовлетворения потребностей локальной микросети, при этом снижая до минимума потребление от сети. Дополнительно необходимо ввести поправки на неравномерность и нестабильность выработки электроэнергии возобновляемыми источниками энергии.

Литература

1. Кобец Б.Б., Волкова И.О. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid. – М.: ИАЦ Энергия. – 2010. – 208 с.
2. Хохлов А., Мельников Ю., Веселов Ф., Холкин Д., Дацко К. Распределённая энергетика в России: потенциал развития. — М.: Энергетический центр Московской школы управления «Сколково», 2019. – 89 с.
3. Ерошенко С. А., Карпенко А. А., Кокин С. Е., Паздерин А. В. Научные проблемы распределённой генерации // Известия вузов: Проблемы энергетики, 2010. №11–12. С. 126–133.
4. Смоленцев, Н. И. Энернет. Состояние и перспективы / Н. И. Смоленцев, А. Н. Игнатов, Д. С. Иргибасва // Современные проблемы телекоммуникаций: Материалы Международной научно-технической конференции, Новосибирск, 22–23 апреля 2021 года. – Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2021.
5. Хохлов А. Развитие распределенной генерации приведет к кардинальным изменениям в архитектуре электроэнергетики России. Энергетика и промышленность России. 2017, № 11
6. «Дорожная карта» «ЭНЕРДЖИНЕТ» Национальной Технологической Инициативы. <https://minenergo.gov.ru/node/8916> (дата обращения 12.03.2021 г.).
7. Тягунов М. Г., Викулов А. Н. Возобновляемая энергетика в распределённых энергосистемах. Московский энергетический институт (НИУ) СОК №7. 2018 – Режим доступа: <https://www.c-o-k.ru/articles/vozobnovlyamaya-energetika-v-raspredeleennyh-energосistemah> (дата обращения 08.02.2021).
8. Цифровой переход в электроэнергетике России: экспертно-аналитический доклад. / под общ. ред. В.Н. Княгинина и Д.В. Холкина. М., ЦСР, 2017.
9. Ховалова Т.В., Жолнерчик С.С. Эффекты внедрения интеллектуальных электроэнергетических сетей. Стратегические решения и риск-менеджмент. 2018, (2): С. 92-101.
10. Integration of Distributed Energy Resources in Power Systems: Implementation, Operation, and Control. / Edited by Toshihisa Funabashi. - Elsevier Inc., 2016. – 313 p.
11. Planning for the Renewable Future: Long-term modelling and tools to expand variable renewable power in emerging economies, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. 2017.
12. Кубарьков Ю. П., Чивенков А. И., Вихорев Н. Н., Шалухо А. В., Липужин И. А. Способ регулирования тока линии электропередачи в узле нагрузки. Вестник самарского государственного технического университета. Серия: технические науки. 2019. № 1 (61). С. 128-138
13. Смоленцев Н.И., Кондрин С.А. Сверхпроводящий электрокинетический накопитель энергии для локальных электрических сетей // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017, Т.19, № 3-4. С.53-60.
14. Четошникова Л.М., Смоленцев Н.И., Четошников С.А., Дегтярев Д.В. Система управления в локальной электрической сети низкого напряжения. Ползуновский вестник, N1, 2015, стр. 105-107.
15. R. Akella, F. Meng, D. Ditch, B. McMillin, M. Crow. Distributed Power Balancing for the FREEDM System. 2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communication, 594 с.
16. Аракелов, В. Е. Методические вопросы экономии энергоресурсов / В. Е. Аракелов, А. И. Кремер. - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 192 с.

Авторы публикации

Четошникова Лариса Михайловна – д-р техн. наук, профессор кафедры автоматики ЮУрГУ (НИУ), Челябинск, Россия.

Смоленцев Николай Иванович – канд. техн. наук, доцент кафедры технической электроники СибГУТИ, Новосибирск, Россия.

Томских Наталья Валерьевна - студент ЮУрГУ (НИУ), г. Челябинск, Россия.

Гимгина Дарья Александровна – студент ЮУрГУ (НИУ), г. Челябинск, Россия.

Лаврентьева Дарья Алексеевна – студент ЮУрГУ (НИУ), г. Челябинск, Россия.

Reference

1. Kobets BB, Volkova I.O. Innovative development of the electric power industry based on the Smart Grid concept. - M.: IAC Energiya. - 2010.-- 208 p.
2. Khokhlov A., Melnikov Yu., Veselov F., Kholkin D., Datsko K. Distributed energy in Russia: development potential. - M.: Energy Center of the Moscow School of Management "Skolkovo", 2019. - 89 p.
3. Eroshenko S. A., Karpenko A. A., Kokin S. E., Pazderin A. V. Scientific problems of distributed generation // Izvestiya vuzov: Problems of power engineering, 2010. No. 11–12. S. 126-133.
4. Khokhlov A. Development of distributed generation will lead to dramatic changes in the architecture of the power industry in Russia. Energy and industry of Russia. 2017, no. 11
5. "Roadmap" "ENERGINET" of the National Technology Initiative. <https://minenergo.gov.ru/node/8916> (date of circulation 03/12/2021).
6. Tyagunov MG, Vikulov AN Renewable energy in distributed power systems. Moscow Power Engineering Institute (NRU) SOK №7. 2018 - Access mode: <https://www.c-o-k.ru/articles/vozobnovlyaemaya-energetika-v-raspredeennyh-energосистемах> (date of treatment 02/08/2021).
7. Digital transition in the electric power industry of Russia: expert and analytical report. / under total. ed. V.N. Knyagin and D.V. Kholkina. M., CSR, 2017.
8. Khovalova T.V., Zholnerchik S.S. Effects of introducing smart power grids. Strategic decisions and risk management. 2018, (2): S. 92-101.
9. Integration of Distributed Energy Resources in Power Systems: Implementation, Operation, and Control. / Edited by Toshihisa Funabashi. - Elsevier Inc., 2016.-- 313 p.
10. Planning for the Renewable Future: Long-term modeling and tools to expand variable renewable power in emerging economies, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. 2017.
11. Kubarkov Yu. P., Chivenkov AI, Vikhorev NN, Shalukho A. V, Lipuzhin IA Method of regulating the current of the power line in the load node. Samara State Technical University Bulletin. Series: technical sciences. 2019. No. 1 (61). S. 128-138
12. Smolentsev N.I., Kondrin S.A. Superconducting electrokinetic energy storage device for local electrical networks // News of higher educational institutions. Energy problems. 2017, Vol. 19, No. 3-4. S.53-60.
13. Chetoshnikova L.M., Smolentsev N.I., Chetoshnikov S.A., Degtyarev D.V. Control system in the local low voltage electrical network. Polzunovsky Bulletin, N1, 2015, pp. 105-107.
14. R. Akella, F. Meng, D. Ditch, B. McMillin, M. Crow. Distributed Power Balancing for the FREEDM System. 2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communication, 594 p.
15. Arakelov, V. E. Methodical issues of energy saving / V. E. Arakelov, A. I. Kremer. - M.: Energoatomizdat, 1990.-- 192 p.

Authors of the publication

Larisa M. Chetoshnikova - South Ural State University (NRU), Chelyabinsk, Russia.

Nikolai I. Smolentsev - Siberian State University of Telecommunications and Information Sciences, Novosibirsk, Russia.

© Четошникова Л.М., Смоленцев Н.И., Томских Н.В., Гимгина Д.А., Лаврентьева Д.А.

Natalia V.Tomskich - South Ural State University(NRU), Chelyabinsk, Russia.

Darya A. Gimgina - South Ural State University (NRU), Chelyabinsk, Russia.

Darya A. Lavrentieva - South Ural State University (NRU), Chelyabinsk, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.3. «Электроэнергетика»

Получено **24.03.2021 г.**

Отредактировано **30.06.2022 г.**

Принято **26.10.2023 г.**