

## ТОПОЛОГИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ И СПОСОБ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Н.И. Смоленцев<sup>1</sup>, Л.М. Четошникова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики,  
Новосибирск, Россия,

<sup>2</sup>Южно-Уральский государственный университет (НИУ),  
Челябинск, Россия

ORCID:<http://orcid.org/0000-0002-5775-2903>, [smolentsev@rambler.ru](mailto:smolentsev@rambler.ru)

**Резюме:** Цель работы – снижение потерь и повышение энергосбережения в электрических сетях. Задачи энергосбережения и энергоэффективности требуют не только снижения потерь на различных этапах передачи и преобразования электроэнергии, но и сохранения баланса энергии, генерируемой в электросистеме и потребляемой электроприемниками в различных режимах работы. С увеличением числа электроприемников и усложнением электроэнергетических систем произвести такое согласование в традиционных способах передачи электроэнергии достаточно сложно, что неизбежно приводит к потерям, снижению энергоэффективности таких систем. Для достижения данной цели предложена многоуровневая топология электрической сети и асинхронный способ передачи электрической энергии между узлами, включающими нагрузку, источники энергии, накопители энергии, присоединенные соответствующим образом. Математическим методом показано, что данная топология сети позволяет с помощью накопителей энергии, управляемых по определенному алгоритму, и телеинформационных технологий оптимизировать баланс электрической энергии в сети, добиваясь равенства выработанной и потребленной электроэнергии. Такая топология сети и способ передачи электрической энергии могут быть положены в основу цифровых технологий в энергетике (ЭНЕРНЕТ).

Ключевым элементом многоуровневой топологии и асинхронного метода передачи электрической энергии являются накопители энергии, управляющие энергетическими потоками в сети с помощью телеинформационных технологий. Данная топология сети и асинхронный способ передачи электрической энергии позволяют уменьшить дисбаланс выработанной и потребленной в сети энергии, что приводит к ряду положительных результатов.

**Ключевые слова:** локальная электрическая сеть, накопитель энергии, топология, ЭНЕРНЕТ.

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», идентификационный номер проекта RFMEFI57818X0265 (соглашение от 27.11.2018 г. № 075-02-2018-209 (14.578.21.0265)). Заказчик – Министерство образования и науки Российской Федерации.

**Для цитирования:** Смоленцев Н.И., Четошникова Л.М. Топология электрической сети и способ передачи электрической энергии // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. №4. С.95-103.[doi:10.30724/1998-9903-2019-21-4-95-103](https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-4-95-103).

## ELECTRIC NETWORK TOPOLOGY AND METHOD OF TRANSMISSION OF ELECTRIC ENERGY

N.I. Smolentsev<sup>1</sup>, L.M. Chetoshnikova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Siberian State University of Telecommunications and Informatics,

Novosibirsk, Russia,

<sup>2</sup>Branch of the South Ural State University (NRU) in Miass, Russia

ORCID:<http://orcid.org/0000-0002-5775-2903>, [smolenzev@rambler.ru](mailto:smolenzev@rambler.ru)

**Abstract:** The purpose of the work is to reduce losses and increase energy saving in electric networks. To achieve this goal, a multilevel topology of the electrical network and an asynchronous method for transferring electrical energy between nodes including a load, energy sources, energy storage devices connected in an appropriate manner are proposed. It is shown by the mathematical method that this network topology allows using energy storage devices controlled appropriately and using tele-information technologies to optimize the balance of electric energy in the network, achieving equality of the generated and consumed electricity. Such a network topology and a method of transmitting electrical energy can be the basis of digital technologies in the energy sector (ENERNET).

**Keywords:** local electric network, energy storage, topology, ENERNET.

**Acknowledgments:** This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as part of the implementation of the Federal Targeted Program "Research and Development in Priority Directions for the Development of the Scientific and Technological Complex of Russian Federation for 2014–2020", the project identification number is RFMEFI57818X0265 (agreement of 11.27.2018 № 075-02-2018-209 (14.578.21.0265)). The customer is the Ministry of Education and Science of the Russian Federation.

**For citation:** Smolentsev NI, Chetoshnikova LM. Electric network topology and method of transmission of electric energy. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019; 21(4):95-103. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2019-21-4-95-103.

## Введение

Развитие альтернативной энергетики ставит задачи разработки архитектуры и топологии электрической сети, получившей название ЭНЕРНЕТ [1]. Основу сети ЭНЕРНЕТ будут составлять локальные электрические сети, содержащие альтернативные источники энергии (ветрогенератор, солнечные панели и другие), накопители энергии, интеллектуальную систему управления (ИСУ), совмещенную физическую среду для передачи электрической энергии и цифровой информации. Данные локальные сети могут объединяться в сети следующего, более высокого уровня, а также могут подключаться к централизованной электроэнергетической сети, содержащей генерирующие мощности (ТЭЦ, ГЭС, АЭС). Цифровые «умные» датчики элементов системы сети должны контролировать как техническое состояние сети, так и обмен энергией в режиме реального времени между источниками энергии, накопителями энергии, потребителями [2].

Для практического применения данной концепции и разработки стандартов необходимо получить расчетные формулы, описывающие процесс переноса электрической энергии в локальной сети в зависимости от ее физических параметров, нагрузки сети, емкости накопителей и пространственной плотности источников альтернативной энергии и потребителей энергии. Все элементы системы должны быть стандартизованы, а локальная сеть открыта для установки новых элементов систем, изготовленных любым производителем при условии удовлетворения требованиям стандартов. Также как ИНТЕРНЕТ, ЭНЕРНЕТ должна удовлетворять принципу открытости.

Такой подход к электроэнергетическим сетям позволит уйти от передачи электроэнергии на большие расстояния и практически локально совместить источник энергии и потребителей электроэнергии. Это сократит потери электроэнергии, возникающие при ее транспортировке на большие расстояния. Применение накопителей энергии позволит снизить стоимость электроэнергии за счет разницы в тарифах при покупке электроэнергии в часы минимума нагрузок и ее продаже в часы максимума [3,4].

Другой эффект от внедрения такой сети, как показывает опыт ИНТЕРНЕТ, заключается в распределенной генерации, то есть в возможности включения в локальную сеть малых генерирующих мощностей на основе источников энергии альтернативной энергетики. Каждая локальная сеть будет частью сети следующего уровня, например,

территориального, объединяющего различные объекты территории. Территориальная может стать частью национальной электроэнергетической сети. Такая иерархия значительно повысит управляемость сети и позволит достичь максимального экономического эффекта.

Увеличение числа элементов сети, ее многоуровневая структура, потребует перехода на новые цифровые технологии для обеспечения процессов измерений и учета в режиме реального времени. Основные задачи измерительных систем будут заключаться в следующих функциях:

- оценка состояния оборудования;
- оптимизация (интеллектуальное управление) режимов сети;
- непрерывный мониторинг данных;
- прямой обмен информацией по системам телекоммуникаций с потребителями энергии;
- интеллектуальное управление на уровне клиента электрических сетей потребителями энергии;
- управление энергетическими потоками с помощью накопителей энергии.

Развитие архитектуры локальных электрических сетей потребует решения ряда проблем технологического порядка. Это создание экономических преобразователей альтернативной энергии (ветрогенераторы, солнечные батареи и т.п.), передача электроэнергии на постоянном токе при помощи сверхпроводников, силовая электроника на новых физических принципах, создание сверхпроводящих накопителей энергии на основе высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) [5–7]. Все это, в свою очередь, поможет сократить ежемесячные расходы на электроэнергию, снизить выбросы продуктов сгорания углеводородов в атмосферу и резко сократить потребление электричества в часы пиковой нагрузки. Кроме того, интеллектуальная сеть ЭНЕРНЕТ даст возможность более эффективно использовать возобновляемые источники энергии (например, солнечные батареи) и теплоэлектроцентрали, а также сократит зависимость местных потребителей от резервных генерирующих мощностей.

Стратегия в области сетевых технологий должна включать строительство хорошо защищенной комплексной электрической инфраструктуры, позволяющей управлять всей сетью энергоснабжения – от генерирующих станций до домашних и корпоративных потребителей – как единой целостной системой. Благодаря встроенным интеллектуальным функциям, такая сеть сможет активно распознавать колебания спроса и предложения и оперативно реагировать на них, повышая безопасность и надежность доставки электроэнергии и оптимизируя текущие расходы.

Управление электрическим током похоже на управление информационными потоками, поэтому принципы работы сетей ЭНЕРНЕТ сходны с принципами ИНТЕРНЕТА. Разница в том, что электрические сети могут включать в свой состав гораздо больше сетевых узлов. Здесь необходимо применить опыт интеграции, обработки важной информации, и с его помощью оптимизировать потребление электроэнергии. Технология *SmartGrid*, основанная на протоколе *IP*, представляет собой лучшее решение для потребителей, которые становятся частью интеллектуальной сети и получают возможность управлять генерацией и потреблением энергии, оптимизировать эти процессы с помощью интеллектуальных счетчиков. Эта технология дает реальные преимущества каждому пользователю.

Зарубежные исследования показали [8–10], что подобные технологии могут сократить потребление электроэнергии до 10 процентов. Более того, экономия может достигнуть 15 процентов и более, если бытовая техника (посудомоечные машины, стиральные машины и т.п.) будет программироваться на включение в наиболее выгодные промежутки времени. Со временем сокращение потребления энергии в часы пиковой нагрузки поможет избежать ожидаемого на отечественном энергетическом рынке дефицита генерирующих мощностей. Более того, те, кто сегодня потребляет электроэнергию, могут стать ее поставщиками. До сих пор электричество генерировалось, как правило, на тепловых электростанциях, работающих на нефти и газе. После развертывания сети ЭНЕРНЕТ резервные генерирующие мощности будут, по крайней мере, частично, предоставляться самими потребителями. Расходы в сетях электропередач снизятся, что принесет существенную выгоду как производителям, так и потребителям электроэнергии.

На основании вышесказанного можно дать следующую характеристику интеллектуальной электроэнергетической сети [11]. Это полностью интегрированная, саморегулирующаяся и самовосстанавливающаяся электроэнергетическая система, имеющая сетевую топологию и включающая в себя все генерирующие источники,

магистральные и распределительные сети, все виды потребителей электрической энергии, управляемой единой сетью информационно-управляющих устройств в режиме реального времени.

Основой ЭНЕРНЕТа является синергия развития цифровых и энергетических технологий, а также достижения в области силовой электроники, в области сверхпроводниковых технологий, альтернативных источников энергии, а также в области обработки больших баз данных (*BigData*), в области электроники и нанoeлектроники, создания на этой базе интеллектуальных датчиков анализа и учета работы элементов и частей энергосистемы.

С развитием сетевой многоуровневой структуры электрических сетей неизбежно возрастут потери, связанные с передачей электрической энергии между ее уровнями. Поэтому возникает вопрос о выборе оптимальной топологии сети и способе передачи электрической энергии между ее элементами сети таким образом, чтобы снизить потери.

Рассмотрим традиционные способы передачи электрической энергии от источника энергии (ИЭ) к потребителю электрической энергии (ПЭ). Для передачи электрической энергии используются следующие основные элементы: электрогенераторы (ЭГ), распределительные устройства высшего и низшего напряжения (РУ ВН, РУ НН), линии электропередач воздушные или кабельные (ВЛ, КЛ), повышающие и понижающие трансформаторные подстанции (ТП) [12–14].

В этих способах электрическую энергию на высоком напряжении передают от источников энергии к трансформаторным подстанциям, а затем к распределительным сетям на низком напряжении. Распределительные сети подключают к узлам нагрузки, от которых электрическая энергия передается электроприемникам. С целью снижения токов короткого замыкания, повышения надежности электропитания, снижения потерь электрической энергии распределительные сети включают на параллельную работу, снабжают устройством автоматического включения резерва (АВР), устанавливают главную понижающую подстанцию (ГПП) в центре электрических нагрузок (ЦЭН).

Задачи энергосбережения и энергоэффективности требуют не только снижения потерь электрической энергии на различных этапах передачи и преобразования электроэнергии, но и сохранения баланса энергии, генерируемой в электросистеме и потребляемой электроприемниками в различных режимах работы. С увеличением числа электроприемников и усложнением электроэнергетических систем произвести такое согласование в традиционных способах достаточно сложно, что неизбежно приводит к потерям энергии, снижению энергоэффективности таких систем.

Характерной особенностью существующих способов передачи электрической энергии является одновременность или синхронность процессов генерации, распределения и потребления электрической энергии. Такие способы передачи энергии могут быть названы синхронными. Это связано с электромагнитным характером процессов, происходящих в электрических генераторах, линиях электропередачи и электроустановках потребителей.

С увеличением числа электроприемников возрастает количество электростанций, усложняется распределительная сеть, усложняются требования к управлению работой электроэнергетических систем. Электростанции должны вырабатывать столько электрической энергии, сколько требуется электроприемникам в текущий момент времени. Эту задачу решают диспетчерские службы энергосистемы путем планирования графика нагрузок на предстоящий период и регулирования объема вырабатываемой мощности на электрических станциях. Планирование осуществляется по результатам статистического анализа графиков нагрузок за предшествующие периоды времени. При этом ставится задача достижения следующих целей в работе энергосистемы:

- выполнение плана выработки и распределения электрической энергии с покрытием максимумов нагрузки;
- бесперебойная работа электрооборудования и систем энергоснабжения;
- обеспечение необходимого качества отпускаемой потребителям электроэнергии по напряжению и частоте.

Несмотря на комплектование диспетчерских пунктов управления работой энергосистем средствами контроля, управления, связью, четкой мнемонической схемой расположения электростанций ЛЭП и подстанций, достичь баланса вырабатываемой и потребляемой при синхронном способе передачи энергии невозможно. Причины следующие:

- невозможно учесть реальную нагрузку в текущий момент из-за большого количества электроприемников и отсутствия информации их состояния в любой текущий

момент времени, следовательно, невозможно определить объем необходимой электроэнергии в текущий момент времени;

- данная конфигурация электрических сетей не соответствует принципу распределенной генерации и принципу приближения источников электроэнергии к потребителю;

- большие потери электроэнергии на трансформаторных подстанциях на различных уровнях напряжения;

- технически сложно согласовать работу электросистем с локальными электрическими сетями, использующими альтернативные источники энергии.

Все это приводит к неизбежным потерям электрической энергии из-за нарушения баланса выработанной электроэнергии при уменьшении электропотребления или к дефициту электрической энергии при возрастании электропотребления. К тому же возникают дополнительные затраты, поскольку отношение себестоимости энергии в базовой и пиковой части графика нагрузок достигает более 400 [15].

С целью повышения надежности и снижения потерь, в работе [12] предложен способ передачи электрической энергии, согласно которому, электрическую энергию передают через линии электропередачи и по кабелям распределительных сетей к узлам нагрузки, причем каждый узел нагрузки имеет питающую электрическую линию, резервную электрическую линию, транзитную электрическую линию. Узлы нагрузки соединены между собой и образуют в пространстве вершины шестиугольника, расположенного на обслуживаемой территории. Электроприемники присоединены к узлам нагрузки с минимальным приближением к источникам энергии, что соответствует принципу адаптивно-распределенных сетей. Данная электрическая сеть выполняется многоуровневой:

- в сети первого уровня располагают узлы нагрузки, представляющие распределительные пункты на напряжение 10–20 кВ;

- в сети второго уровня – распределительные пункты на напряжение 110–220 кВ;

- сети третьего уровня напряжения и выше – распределительные пункты на 220 кВ и выше.

Хотя по своей сути данный способ передачи электрической энергии остается синхронным, поскольку процессы генерации, распределения и потребления происходят одновременно, данная топология электрической сети позволяет повысить надежность и снизить потери.

Существенным недостатком рассмотренного способа передачи энергии является дисбаланс объема выработанной и потребленной энергии при случайных непредсказуемых изменениях нагрузки электроприемников электрической энергии, невозможность достижения баланса энергии.

Задачи энергосбережения и энергоэффективности требуют не только снижения потерь электрической энергии на различных этапах передачи и преобразования электроэнергии, но и сохранения баланса энергии, генерируемой в электросистеме и потребляемой электроприемниками в различных режимах работы.

### **Методы**

Предметом исследования является локальная электрическая сеть, имеющая многоуровневую топологию в форме связанных многоугольников, равномерно распределенную по обслуживаемой территории и предназначенной для применения в цифровой энергетике ЭНЕРНЕТ. Целью исследований является определение условий баланса электрической энергии в сети с данной топологией. Поставленная цель решается теоретическим методом путем анализа энергобаланса в модели электрической сети, имеющей топологию шестиугольников в вершинах которых расположены узлы нагрузки, питающие линии, резервные линии и накопительные линии.

### **Результаты**

С целью снижения дисбаланса между объемами выработанной и потребленной энергии рассмотрим способ, позволяющий достичь нового технического результата в предложенной топологии сети. Таким техническим результатом является повышение энергоэффективности и энергосбережения при передаче электрической энергии от ее источников к потребителю, повышение надежности электроснабжения.

Указанный технический результат достигается тем, что в предлагаемом способе передачи электрической энергии узлы нагрузки, расположенные в вершинах шестиугольников, образующих равномерно распределенную по обслуживаемой территории многоуровневую электрическую сеть, кроме питающих, транзитных, резервных электрических линий имеют дополнительно накопительную электрическую линию. Накопительная линия соединяет каждый из узлов нагрузок шестиугольника с накопителем

энергии, регулирующим энергетические потоки через узлы шестиугольника, что обеспечивает постоянный баланс между вырабатываемой и потребляемой электроэнергией в шестиугольниках и, соответственно, во всей многоуровневой электрической сети. Способ поясняется схемой, показанной на рисунках.

На рис. 1 изображен общий вид распределенной электрической сети, на рис. 2 – часть распределенной электрической сети.

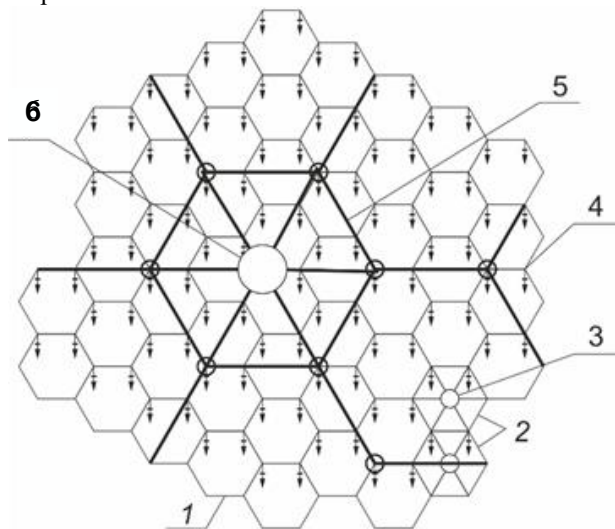


Рис. 1. Общий вид распределенной электрической сети: 1 – распределительная сеть; 2 – связанные шестиугольники; 3 – накопители энергии первого уровня; 4 – узлы нагрузки; 5 – связанные многоугольники второго уровня; 6 – накопители энергии второго уровня

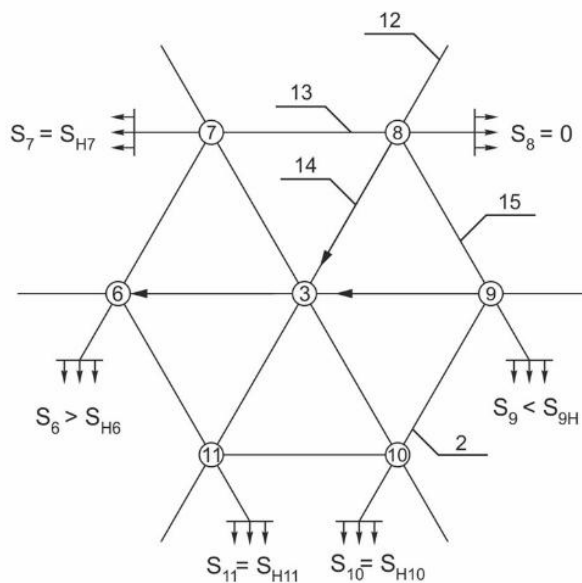


Рис. 2. Часть распределительной сети: 6–11 – узлы нагрузки; 12 – питающая линия; 13 – накопительная линия; 14 – резервная линия

Так на рис. 1 распределительная сеть 1 имеет двухуровневую конфигурацию связанных шестиугольников 2, в вершинах которых располагаются узлы нагрузки 4, соединенные с накопителями энергии первого уровня 3; связанные многоугольники второго уровня 5 соединены с накопителем 6 второго уровня. Остальные шестиугольники первого и второго уровня имеют аналогичные соединения (на рис. 1 не указаны).

На рис. 2 к узлам нагрузок 6–11 подсоединены электроприемники с потребляемой мощностью  $S_6$ – $S_{11}$  и номинальной мощностью  $S_{H6}$ – $S_{H11}$  соответственно. Каждый из узлов нагрузки 6–11 содержит питающую 12, транзитную 13, накопительную 14 и резервную 15 линии.

Распределительная сеть является инвариантной. Питающая линия может стать, при необходимости, транзитной или резервной, транзитная – питающей, резервная – транзитной.

Также, на рис. 2 в центре шестиугольника расположен накопитель энергии 3, который соединен с каждым из узлов нагрузки 6–11 при помощи накопительных линий 14.

Способ осуществляют следующим образом. Электрическую энергию передают через линию электропередачи и по кабелям распределительных сетей к узлам нагрузки 6–11 (см. рис. 2) в текущий момент времени. Узлы нагрузки 6–11 находятся под напряжением и являются источниками энергии для электроприемников с мощностями  $S_6$ – $S_{11}$ .

Предположим, например, что для данного текущего момента времени потребляемые мощности  $S_6$ – $S_{11}$  в узлах нагрузки 6–11 шестиугольника 2 равны номинальной мощности  $S_{H6}$ – $S_{H11}$  и удовлетворяет следующим условиям:

$$S_6 > S_{H6}; S_7 = S_{H7}; S_8 = 0; S_9 < S_{H9}; S_{10} = S_{H10}; S_{11} = S_{H11}.$$

Таким образом, в шестиугольнике 2 образовался избыток мощности, равный  $S_8 + (S_{H9} - S_9)$ , который поступает (на рис. 2 показано стрелками) в накопитель энергии 3. Накопитель энергии 3 аккумулирует избыточную энергию и распределяет ее затем в узел нагрузки, который испытывает дефицит энергии. В нашем случае энергия распределяется к узлу нагрузки 6, т.к. потребляемая мощность  $S_6$  превышает номинальную мощность  $S_{H6}$  (в соответствии с условием  $S_6 > S_{H6}$ ). Направление передаваемой энергии из накопителя энергии 3 в узел нагрузки 6 показано стрелкой.

На других уровнях напряжения распределительной электрической сети происходит аналогичное накопление и перераспределение электрической мощности. Избыточная энергия, возникающая в распределительной сети, в один отрезок времени сохраняется в накопителе энергии, а в другой, при необходимости, отдается электроприемникам, где потребляемая мощность возросла.

Таким образом, в этом способе передачи электрической энергии возникает временной интервал, равный циклу «заряд-разряд» накопителя энергии, в течение которого нарушается принцип одновременности циклов генерации, распределения и потребления электрической энергии, характерный для способов, отнесенных выше к синхронным.

Такой способ передачи электрической энергии может быть назван асинхронным. Асинхронный способ передачи электрической энергии позволяет достичь баланса между вырабатываемой и потребляемой электроэнергией. Реализация предлагаемого способа передачи энергии позволит:

- снизить потери энергии, возникающие при дисбалансе вырабатываемой и потребляемой энергии;
- увеличить надежность электроснабжения электроприемников за счет дополнительной накопительной электрической линии;
- уменьшить затраты на электроэнергию путем уменьшения отношения себестоимости энергии в базовой и пиковой части графика нагрузок;
- увеличить срок службы электрооборудования.

#### **Обсуждение**

Многоуровневая топология электрической распределительной сети в виде связанных многоугольников, в вершинах которой размещены узлы нагрузки, а также питающая, резервная и накопительная линии, соединяющие накопитель энергии с узлами нагрузок, позволяет, путем управления энергетическими потоками с помощью накопителей энергии на всех уровнях сети, уменьшить дисбаланс выработанной и потребленной в сети энергии. Это приводит к ряду положительных результатов. Для обеспечения управления энергетическими потоками необходима телеинформационная сеть, которая обеспечивает получение информации о состоянии генерации, потребления и состояния накопителей энергии. Для получения информации потребуется большое количество дешевых датчиков и средства коммуникации. Эта задача решается с помощью возможностей сети ИНТЕРНЕТ. Хранение и обработка большого количества данных решается с помощью «облачных технологий» и технологий искусственного интеллекта (*BigData*).

#### **Заключение**

В работе рассмотрена многоуровневая топология электрической распределительной сети в виде связанных многоугольников и асинхронный способ передачи электрической энергии между узлами, содержащими нагрузку, источники энергии, накопители энергии, соединенные и управляемые на всех уровнях сети соответствующим образом. Такая топология электрической сети может быть положена в основу цифровых технологий в энергетике (ЭНЕРНЕТ). Данная топология сети позволяет уменьшить дисбаланс выработанной и потребленной в сети энергии, что приводит к ряду положительных результатов.

#### Литература

1. Старченко А.Г., Дзюбенко В.В., Ряпин И.Ю. Интернет энергии: Будущее электроэнергетики уже наступило // Цифровая энергетика. 2018. №5. С.17–24.
2. Белов В.Ф., Рожкова С.А., Фарафонов Д.В. Экспериментальная оценка модели оптимального управления накопителем электрической энергии // Modern HIGH Technologies. 2016. №5. С.20–26.
3. Кобец Б.Б., Волкова И.О. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции SmartGrid. М.: ИАЦ Энергия, 2010. 208с.
4. 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.
5. Experimental Setup and Efficiency Evaluation of Zero-Field-Cooled (ZFCYBCO) Magnetic Bearings // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2017.V. 27.N. 4.
6. Lin X., Lei Y., Zhu Y.A. Novel Super conducting magnetic Energy Storage system design based on a Three-Level T-type Converter and ITS Energy-Shaping Control Strategy. Electric Power Systems Research. 2018.V. 162. pp. 64-73.
7. Smolentsev N.I., Kondrin S.A., Bondarev Y.L., Gilmetdinov M.F., et al. Some Issues of development and mathematical Modeling of superconducting electrokinetic Energy Storage Unit. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Ser. "Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering - Power Supply of Mining Companies" 2017.
8. Bayat H. Energy management system for smart house with multi-sources using pi-ca controller. Afrakhte P. 4th Iranian Conference on Renewable Energy and Distributed Generation, ICREDG 2016. V.4. pp. 24-31.
9. Sun Q., Zhang Y., Ma Zhang A. Novel Energy Function-Based Stability Evaluation and Nonlinear Control Approach for Energy Internet, H.D. 2017. IEEE Transactions on Smart Grid. 2017.V.8. N.3. pp.1195-1210
10. Rastegar M., Fotuhi-Firuzabad M., Moeini-Aghaie M., et al. Probabilistic Energy Management Scheme for Renewable-Based Residential Energy Hubs // IEEE Transactions on Smart Grid. 2017. V. 8. N.5. pp. 2217-2227.
11. Smart Power Grids – Talking about a Revolution // IEEE Emerging Technology Portal, 2009 .
12. Лоскутов А.Б., Соснина Е.Н., Лоскутов А.А. «Способ передачи электрической энергии» Патент на изобретение РФ № 2475918, МПК H02J4/00; RU. Оpubл. 20.02.2013, Бюл. № 5.
13. Чивенков А.И., Крахмалин И.Г. «Способ передачи электрической энергии трехфазного напряжения на переменном токе и система для его реализации». Патент на изобретение РФ № 2337451, МПК H02J3/00, опубл. 27.10.2008; RU. Бюл. №30.
14. Бекерманн Йенс, Хайнбокель Штефан. «Устройство и способ для формирования, накопления и передачи электрической энергии». Патент на изобретение РФ № 2496208, МПК H02J7/34, опубл. 20.10.2013 г. RU. Бюл. № 29.
15. Рауль Е.В. Перспективы применения накопителей энергии для сетей электроснабжения 0,4 кВ // Вестник МЭИ. 2013. № 3.

#### Авторы публикации

**Смоленцев Николай Иванович** – канд. техн. наук, доцент кафедры технической электроники Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики. E-mail: smolentzev@rambler.ru.

**Четошников Лариса Михайловна** – д-р техн. наук, профессор кафедры автоматики филиала ЮУрГУ (НИУ). E-mail: chlms56@mail.ru.

#### References

1. Farafontov DV. Experimental evaluation of the model of optimal control of an electric energy. Internet Energy: The Future of the Electricity Industry Has Come. *DigitalEnergy*. 2018;5:17-24.
2. Belov VF., Rozhkova storage. *Modern HIGH Technologies*. 2016;5:20–26.
3. Kobets BB., Volkova IO. *Innovative development of the electric power industry based on the SmartGrid concept*. M. IAC Energy, 2010.
4. Smolentsev NI., Kondrin SA. Superconducting electrokinetic energy storage for local electric networks. *Proceedings of the higher educational institutions. Energy sector problems*. 2017;19(3-4):53-60.
5. AJ. Arsenio Experimental Setup and Efficiency of Zero-Field-Cooled ZFCYBCO Magnetic Bearings. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2017;27(4):3601105.
6. Lin X., Lei Y., Zhu Y A Novel Super conducting magnetic Energy Storage system design based



on a Three-Level T-type Converter and ITS Energy-Shaping Control Strategy. *Electric Power Systems Research*. 2018;162:64-73.

7.Smolentsev NI., Kondrin SA., Bondarev YL., Gilmetdinov MF., Kazantsev AM., Sirekanyan VV. Some Issues of development and mathematical Modeling of superconducting electrokinetic. Energy Storage Unit. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Ser. "Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering Power Supply of Mining Companies"* 2017.

8.Bayat H. Energy management system for smart house with multi-sources using pi-ca controller. *Afrakhte 4th Iranian Conference on Renewable Energy and Distributed Generation CREDG* 2016;4:24-31.

9.Sun Q., Zhang Y., Ma. Zhang, H.D. A Novel Energy Function-Based Stability Evaluation and Nonlinear Control Approach for Energy Internet. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2017;8(3):1195-1210.

10.Fotuhi-Firuzabad M., Moeini-Aghaie M., Zareipour HA. Probabilistic Energy Management *Grid* 2017;8(5):2217-2227.

11.Smart Power Grids - Talking about a Revolution. *IEEE Emerging Technology Portal*, 2009.

12.Loskutov AB., Sosnina EN., Loskutov AA. "Method for the transmission of electrical energy", Patent for the invention of the Russian Federation N. 2475918, IPC H02J4/00 RU. Publ. 02.20.2013, Bull. N. 5.

13.Chivenkov AI., Krakhmalin IG. "A method for transmitting electrical energy of three-phase AC voltage and a system for its implementation". Patent for the invention of the Russian Federation N. 2337451, IPC H02J3/00, publ. 10/27/2008; RU. Bull. N.30.

14.Beckermann Jens, Heinbockel Stefan. "Device and method for the formation, storage and transmission of electrical energy". Patent for the invention of the Russian Federation N. 2496208, IPC H02J7/34, publ. 10.20.2013, RU. Bull. N. 29.

15.Raul EV. *Prospects for the use of energy storage for 0.4 kV power supply networks. Vestnik MPEI*. 2013.

#### Authors of the publication

**Nikolai I. Smolentsev** -Siberian State University of Telecommunications and Informatics, Novosibirsk, Russia. smolentsev@rambler.ru

**Larisa M. Chetoshnikov** -Branch of the South Ural State University (NRU) in Miass, Russia. smolentsev@rambler.ru.

*Поступила в редакцию*

*27 августа 2019 г.*