

УДК 621.311

**Савина Наталья Викторовна**

Амурский государственный университет

г. Благовещенск, Россия

*E-mail: nataly-savina@mail.ru***Юй Хан**

Амурский государственный университет

г. Благовещенск, Россия

*E-mail: yuhang0630@126.com***Savina Natalya Viktorovna**

Amur State University

Blagoveshchensk, Russia

*E-mail: nataly-savina@mail.ru***Yu Hang**

Amur State University

Blagoveshchensk, Russia

*E-mail: yuhang0630@126.com***ПРИМЕНЕНИЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ  
В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СЕТЯХ****RESEARCH ON RENEWABLE ENERGY APPLICATION IN SMART GRID**

*Аннотация. В работе приведены структура и условия применения возобновляемых источников энергии в интеллектуальных электрических сетях. Выявлены особенности функционирования интеллектуальных сетей и приведена их характеристика. Показано с помощью каких инновационных и цифровых технологий обеспечить оптимальную интеграцию возобновляемых источников энергии в сеть. Приведены основные направления развития интеллектуальных сетей, включающих возобновляемые источники энергии.*

*Abstract. The paper presents the structure and conditions for the use of renewable energy sources in smart grids. The features of the functioning of smart grids are identified and their characteristics are given. It is shown with the help of which innovative and digital technologies to ensure the optimal integration of renewable energy sources into the grid. The main directions of development of smart grids, including renewable energy sources, are given.*

*Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, интеллектуальная сеть, управление, спрос, гибкость, потребитель, инновационные технологии, оптимизация, рынок.*

*Key words: renewable energy, smart grid, management, demand, flexibility, consumer, innovative technologies, optimization, market.*

### Введение

В последние годы, в условиях постоянного роста глобального спроса на энергию и все более серьезных экологических проблем, потребление электроэнергии растет быстрее ее генерации. Развитие генерации идет двумя путями – развитие централизованной и децентрализованной генерации, в том числе на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Возобновляемая энергия как чистая, эффективная и устойчивая энергетика получила в мире широкое применение. Интеллектуальная сеть обеспечивает техническую поддержку для эффективного использования возобновляемых источников энергии и решения энергетических проблем.

В работе рассмотрены методы интеллектуального управления режимами электрической сети. Возобновляемая энергия является важной частью энергетического перехода 4.0 и устойчивого развития электроэнергетики. Интеллектуальные сети могут лучше интегрировать возобновляемую энергию и управлять ею, повышают эффективность и надежность ее использования, а также способствуют устойчивому развитию энергетики.

Исследования применения возобновляемых источников энергии в интеллектуальных сетях направлены на оптимизационное планирование функционирования энергосистемы. Посредством прогнозирования, распределения и управления возобновляемой энергией можно уменьшить зависимость от традиционной энергетики, сократить выбросы углекислого газа, повысить эффективность и надежность энергосистемы.

Нестабильность и неопределенность при работе возобновляемых источников энергии, обусловленных климатическими характеристиками, создают проблемы для энергосистемы. Исследования по применению возобновляемой энергии в интеллектуальных сетях могут сбалансировать нестабильность генерации электроэнергии ВИЭ, повысить устойчивость и гибкость электроэнергетической системы (ЭЭС) за счет интеллектуальной диспетчеризации, технологии хранения энергии и адаптивного реагирования на спрос.

### Виды возобновляемой энергетики

Для оценки влияния ВИЭ на работу ЭЭС необходимо рассмотреть принципы их работы и основные характеристики.

Принцип работы гидроэлектростанции (ГЭС) заключается в использовании кинетической энергии потока воды для преобразования ее в механическую энергию, а затем механической в электрическую с помощью генератора. Производство электроэнергии ГЭС обычно требует строительства водохранилища, расход воды и выработка электроэнергии контролируются путем регулирования в нем уровня воды. Когда необходима электроэнергия, вода из водохранилища направляется на турбины электростанции через водоотводную систему. В систему водоотведения входят водные каналы, водоводы и т.п., направляющие поток воды на вход в турбину. Вода течет через лопасти турбины, заставляя турбину вращаться. Кинетическая энергия потока воды преобразуется в механическую энергию, которая приводит во вращение турбину. Вращение турбины вызывает вращение генератора, в котором генерируется индуцированный ток в магнитном поле. При этом механическая энергия преобразуется в электрическую. Это эффективный возобновляемый источник энергии с высоким к.п.д.

В интеллектуальных сетях энергия воды является источником энергии первого уровня, на ее долю приходится 30-50%, при этом для генерации электроэнергии должны выпол-

няться следующие условия: скорость потока воды должна быть больше 1 м/с, а высота потока воды – больше 10 м.

Источниками энергии второго уровня являются энергия солнца и энергия ветра.

Принцип работы солнечных электростанций основан на преобразовании энергии солнечного света в электрическую. Солнечные панели (фотоэлектрические элементы) являются основными компонентами производства солнечной энергии. Они состоят из нескольких полупроводниковых материалов. Когда солнечный свет падает на фотоэлектрический элемент, фотоны взаимодействуют с атомами полупроводниковых материалов. Возбужденные электронно-дырочные пары образуют электрическое поле внутри фотоэлектрического элемента, заставляя электроны и дырки разделяться. Это создает электрический ток. Электрический ток, генерируемый солнечными панелями, представляет собой постоянный ток (DC), но большинство энергосистем и электрооборудования используют переменный ток (AC). Поэтому мощность постоянного тока необходимо преобразовать в мощность переменного тока. Этот шаг обычно выполняется с помощью инвертора, который преобразует мощность постоянного тока в необходимую мощность переменного тока.

Преимуществами солнечной энергии являются отсутствие загрязнения окружающей среды и богатые ресурсы. В интеллектуальных сетях солнечная энергия является источником энергии второго уровня, на ее долю приходится 20-30%. Для генерации солнечной энергии интенсивность света должна быть не менее 4-6 кВт·ч/м<sup>2</sup>.

Принцип работы ветровых электроустановок основан на преобразовании кинетической энергии ветра в электрическую. Когда ветер обдувает ротор ветряной турбины, тот начинает вращаться. Вращающееся ветровое колесо передает механическую энергию генератору через главный вал. Главный вал соединяет ветроколесо и генератор так, что вращение ветроколеса преобразуется во вращение генератора и в генераторе образуется наведенный ток. Применение ветровой энергии широко распространено в мире, а такие источники являются возобновляемыми и экологически чистыми. В интеллектуальных сетях энергия ветра является вторым уровнем энергии, на ее долю приходится 20-30%. Ветровые электрические установки эффективны при силе ветра 300–500 Вт/м<sup>2</sup> и скорости ветра 5-8 м/с.

Если ни один из перечисленных источников энергии не может обеспечить достаточную мощность в ЭЭС, можно включить источник энергии третьего уровня – биоэлектростанцию.

Производство электроэнергии из биомассы – это метод, в котором используется химическая энергия биомассы (древесина, отходы сельхозкультур, отходы жизнедеятельности животных, растения и т.д.) для преобразования ее в электрическую энергию. Электроэнергию обычно получают за счет сжигания биомассы. Биомасса подается в печь для сжигания или котел и вступает в реакцию с воздухом или кислородом в условиях высокой температуры с образованием тепловой энергии, выделяющейся при горении. Тепловая энергия, образующаяся в процессе сгорания, используется для нагрева воды, превращая ее в пар. Пар может генерироваться путем прямого или косвенного сжигания биомассы за счет передачи тепловой энергии воде через теплообменник. Произведенный пар высокого давления приводит в движение паровой турбиной или двигателем. Высокоскоростное вращение пара приводит во вращение ротор турбины. Ротор паровой турбины или двигателя соединен с ротором

генератора, заставляя генератор вращаться. Внутри генератора индуцируется ток в магнитном поле, преобразуя механическую энергию в электрическую.

Такие источники отличаются углеродной нейтральностью и эффективны при энергии биомассы от 15-20 МДж/кг.

В настоящее время, по данным Международного энергетического агентства, производство электроэнергии за счет нетрадиционных возобновляемых источников энергии оценивается более чем в 2000 млрд. кВт-ч, что составляет около 2% от общего ее производства, и эта доля постоянно увеличивается [1]. Структура и условия использования ВИЭ в интеллектуальных электрических сетях приведены на рис. 1.

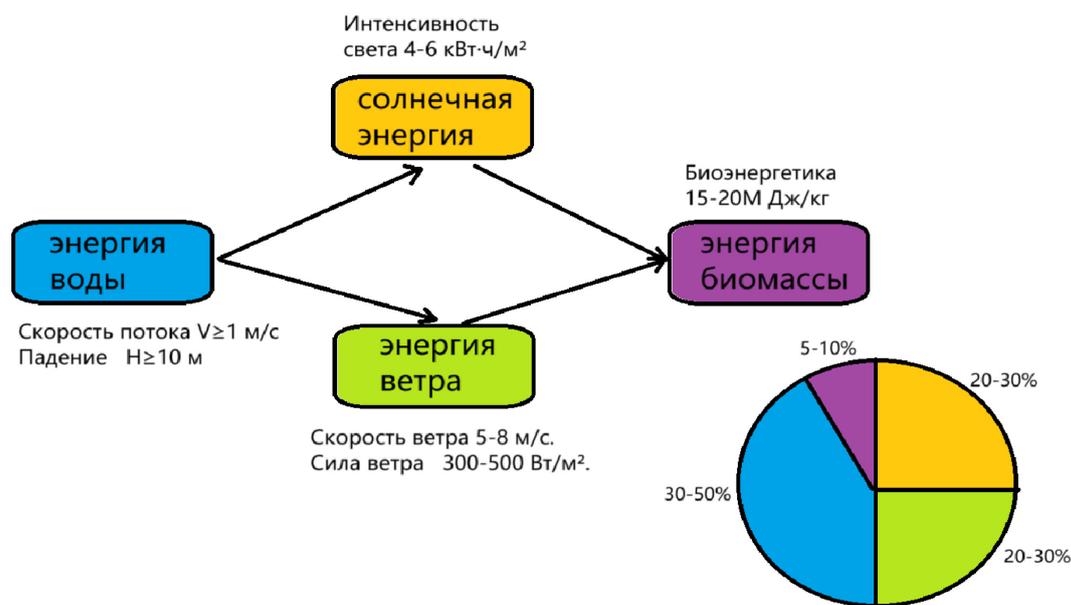


Рис. 1. Условия использования и доля возобновляемой энергии в интеллектуальных сетях.

### Особенности функционирования интеллектуальной сети

Smart Grid – это концепция интеллектуальной электроэнергетической системы, которая базируется на внедрении инновационных технологий и решений [2].

Интеллектуальная сеть – новый тип электрической сети, в которой используются информационные технологии и технологии силовой электроники для достижения интеллектуального управления и оптимизации ее работы. Интеллектуальная сеть обладает такими характеристиками как способность к самовосстановлению, интерактивность, совместимость и устойчивость. По сравнению с традиционными электрическими сетями интеллектуальные сети обладают более высокой надежностью, экономичностью и энергетической эффективностью.

Основная концепция интеллектуальной сети заключается в применении информационных и коммуникационных технологий в ЭЭС для обеспечения мониторинга, контроля и оптимизации всех параметров в реальном времени. Благодаря цифровым технологиям интеллектуальные устройства в системах учета и измерения параметров электроэнергии, сбора и анализа данных обеспечивают оценку состояния ЭЭС и ее объектов в режиме реального времени, а также анализируют схемно-режимные ситуации и на их основе принимают решения. Это позволяет ЭЭС активнее реагировать на изменения спроса и предложения по элек-

троэнергии, оптимизировать ее использование, улучшать качество и стабильность. Интеллектуальная сеть может отслеживать потребление электроэнергии пользователями в режиме реального времени с помощью интеллектуальных устройств учета, включающих модели потребления электроэнергии. Эти данные можно использовать для прогнозирования электрической нагрузки, анализа электропотребления и оптимизации ЭЭС. Также поддерживаются доступ и управление системами распределенного производства и хранения энергии. Эти системы преобразуют возобновляемую энергию в электрическую и сохраняют избыточную для экстренных ситуаций в ЭЭС. В интеллектуальной сети применяется управление выработкой и хранением энергии в распределенных энергетических системах в режиме реального времени, это позволяет оптимизировать ее использование и обеспечивать балансы энергии и мощности.

В интеллектуальных сетях обеспечиваются мониторинг, управление и оптимизация энергетической нагрузки в соответствии с условиями работы ЭЭС и потребностями пользователя в реальном времени, что повышает эффективность и устойчивость энергосистемы. Контролируя и анализируя состояние ЭЭС в режиме реального времени, интеллектуальные сети могут своевременно обнаруживать и устранять неисправности, технологические нарушения и аварии, повышая безопасность и отказоустойчивость системы. За счет автоматизированных устройств и автоматизированных систем управления снижается количество ошибок персонала и повышается надежность электроснабжения.

Для интеграции возобновляемой энергетики в интеллектуальную сеть могут быть применены инновационные технологии последнего поколения – распределенные системы управления энергией (DERMS) и микросети. Они обеспечивают автоматический доступ к возобновляемым источникам энергии и управления ими в составе ЭЭС. Рабочее состояние ЭЭС можно определять и контролировать в режиме реального времени с помощью системы управления энергопотреблением (EMS). Микросети решают проблему дефицита электрической энергии в экстренных условиях и могут применяться в городах с плотной застройкой зданий различного назначения [3].

Рассмотрим основные функции интеллектуальной сети.

Такая сеть является сенсорной и характеризуется развертыванием датчиков в каждом звене энергосистемы для мониторинга ее состояния в режиме реального времени. В ней применяются технологии Big Data, искусственного интеллекта для анализа данных при прогнозировании спроса и сбоев и отказов электроустановок. Отличительной особенностью таких сетей является оптимизированная диспетчеризация, при которой на основе данных в реальном времени оптимизируются распределение электроэнергии и управление нагрузкой для повышения эффективности работы сети.

В интеллектуальной сети применяется система управления объектами распределенной генерации для автоматического выбора того или иного источника энергии и его подключения к сети не только для соблюдения баланса активной мощности, но и для реализации оптимального режима в сети. При этом в часы минимума нагрузок в ЭЭС избыточная энергия ВИЭ накапливается в системах хранения энергии с дальнейшей ее выдачей на рынок энергии и в периоды пикового потребления. Таким образом, осуществляется управление нагрузкой. Схематично интеллектуальная сеть показана на рис. 2.

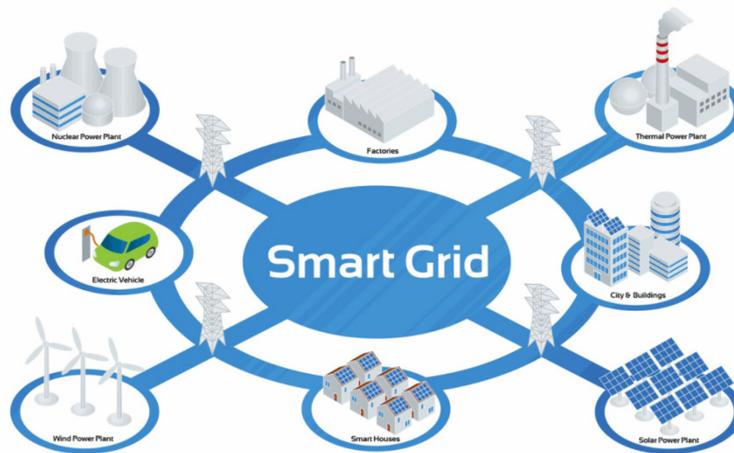


Рис. 2. Структурная схема интеллектуальной сети.

Рассмотрим принцип использования распределенной генерации на примере города. Вначале используется электроэнергия, вырабатываемая ГЭС, для его электроснабжения. Если выработка электроэнергии на ГЭС снизится или электропотребление увеличится, то интеллектуальная сеть включит солнечные и ветряные электроустановки или электростанции в часы максимума нагрузки ЭЭС для прохождения пика или покрытия дефицита мощности. Если интенсивность света или ветра недостаточны, то автоматически подключатся установки, вырабатывающие электроэнергию из биомассы. Биоэлектростанции могут производить большое количество электроэнергии и обеспечить требуемое количество электроэнергии в периоды пикового электропотребления.

### Реакция спроса и гибкое использование энергии

Интеллектуальные сети способны прогнозировать энергетические нагрузки и управлять ими с помощью таких технологий как анализ данных и машинное обучение. Прогнозируя потребности пользователей электроэнергии, можно разумно планировать выработку и распределение энергоресурсов.

Благодаря гибкому механизму реагирования на спрос интеллектуальная сеть может корректировать цены на электроэнергию и прогнозы электропотребления в зависимости от условий электроснабжения и потребностей пользователей. Когда резервов распределенной генерации недостаточно, интеллектуальные сети могут стимулировать пользователей снижать пиковое электропотребление за счет повышения цен на электроэнергию или переноса использования энергоемкого оборудования, – например, стиральных машин и электросушилок, в другие часы, чтобы сбалансировать энергоснабжение и спрос и оптимизировать использование энергии.

На рис. 3 показаны изменения цен на электроэнергию в режиме реального времени, а также соотношение спроса и предложения в китайских городах. Из рисунка видно, что в периоды высокого спроса на электроэнергию соответственно растут и цены на нее. Цены на электроэнергию регулируются по времени суток: они выше в периоды пиковой нагрузки и ниже в периоды низкой нагрузки. Такой механизм ценообразования стимулирует пользователей потреблять электроэнергию в периоды минимума нагрузок, что позволяет снижать пи-

ковое потребление электроэнергии, балансировать спрос на электроэнергию и снижать общую нагрузку на энергосистему.



Рис. 3. Динамика цен на электроэнергию в китайских городах в режиме реального времени.

Для тех пользователей, которые могут гибко организовывать время своего электропотребления, изменение цены на электроэнергию по времени позволяет использовать электроэнергию в непиковые часы и за счет более низких цен снижать затраты на электроэнергию, что особенно актуально для домохозяйств или предприятий с высоким потреблением энергии.

Изменение цены на электроэнергию по времени может корректироваться в зависимости от поставок возобновляемой энергии. Когда возобновляемая энергия имеется в достаточном количестве, цены на электроэнергию могут быть ниже, что побуждает пользователей потреблять ее в это время, способствуя повышению коэффициента использования возобновляемой энергии.

За счет цены на электроэнергию можно регулировать график электрической нагрузки энергосистемы, обеспечивая его сглаживание путем перераспределения потребления электроэнергии по времени суток. Это повышает надежность и устойчивость ЭЭС.

Таким образом регулируя цены на электроэнергию по времени, можно сбалансировать пики и провалы мощности, повысить энергоэффективность, снизить затраты пользователей на электроэнергию, способствовать потреблению возобновляемой энергии и сгладить кривую электрической нагрузки. Такой механизм ценообразования положительно влияет на работу энергосистемы и дает экономическую выгоду потребителям.

В часы, когда наблюдается избыток возобновляемой энергии в интеллектуальной сети, ее используют для зарядки электромобилей, зарядки систем хранения энергии или применяют для других способов повышения энергоэффективности за счет мониторинга электропотребления и управления выработкой и хранением энергии в распределенных энергетических системах в режиме реального времени. Это обеспечивает оптимальное использование энергии и балансирует спрос и генерацию.

### Направления развития интеллектуальных сетей, включающих ВИЭ

Исследования по использованию возобновляемых источников энергии в интеллектуальных сетях – сложная и многоаспектная проблема с широкими перспективами развития.

По прогнозам Исследовательского института Чжунъянь Пухуа, интеллектуальные сети имеют широкие перспективы развития и огромный рыночный потенциал. Масштабный доступ к возобновляемым источникам энергии и развитие распределенной энергетики будут способствовать дальнейшему строительству и применению интеллектуальных сетей.

Глубокая интеграция интеллектуальных сетей с информационными технологиями нового поколения – такими как Интернет вещей, большие данные и облачные вычисления – улучшит их интеллект и позволит качественнее осуществлять мониторинг, прогнозирование и оптимизацию энергосистемы в реальном времени. Применение новых технологий искусственного интеллекта и блокчейн обеспечит более точное управление генерацией и электрической нагрузкой и оптимальное распределение электрической энергии. Здесь основной преградой является нестабильный режим работы ВИЭ, что создает технические проблемы для ее эффективного использования в интеллектуальных сетях.

Другое направление развития интеллектуальных сетей – обеспечение информационной безопасности, кибербезопасности, сетевой безопасности, конфиденциальности данных и совместимости устройств. Третьим направлением их развития является стандартизация совместимости устройств и улучшение взаимодействия между ними. Необходимо развивать также управление рынком электроэнергии и мощности, чтобы обеспечить стабильную рыночную среду для развития интеллектуальных сетей [4].

### Заключение

Таким образом, в статье показано, что интеллектуальные сети обеспечивают эффективное и надежное управление всеми видами ВИЭ, определяют в реальном времени долю генерируемой энергии от каждого источника и ее транспорт по сети – так, чтобы сохранять оптимальный режим и адаптироваться к потребностям пользователей электроэнергии, к требованиям надежности и устойчивости энергосистемы.

Проведенные исследования показывают, что интеллектуальные сети, включающие ВИЭ, обеспечивают не только эффективность их использования, но и регулируют электропотребление, сохраняя баланс мощности в системе, необходимые надежность и устойчивость. За счет применения инновационных методов анализа данных и машинного обучения, интеллектуального прогнозирования и управления ошибками прогнозов реализуется точное прогнозирование генерации электроэнергии ВИЭ с учетом ее нестабильности.

Создание гибкого рынка электроэнергии и механизмов продажи электроэнергии, стимулирование потребителей обеспечивают эффективную интеграцию ВИЭ в интеллектуальные сети.

---

1. Асланян, Г.С., Молодцов, С.Д. Возобновляемые источники энергии на мировой сцене // Электронный журнал энергосервисной компании «Экологические системы», 2003. URL: [http://escoscosys.narod.ru/20035/art\\_07.htm](http://escoscosys.narod.ru/20035/art_07.htm). (дата обращения: 05.09.2024).

2. Воропай, Н.И. Интеллектуальные электроэнергетические системы: концепция, состояние, перспективы // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2011. – №3 (20). – С.11-16.

3. Nikkhajoei, H., Lasseter, R.H. Microgrid Protection, Power Engineering // Society General Meeting, 2007. IEEE. – 2007 – P. 1-6.

4. Лю Сянцзэн. Исследование развития сетевого маркетинга электроэнергии в рамках интеллектуальных сетей. // China Electric Power Education (12). – P. 190-191.