

## Математические, информационные и интеллектуальные технологии в энергетике

УДК 004.413.4

DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.008

### Применение облачных и граничных технологий при развитии интеллектуальной энергосистемы

Колосок Ирина Николаевна, Коркина Елена Сергеевна

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,  
Россия, Иркутск, [kolosok@isem.irk.ru](mailto:kolosok@isem.irk.ru)

**Аннотация.** Процесс создания интеллектуальных энергосистем (ИЭС) сопровождается широким использованием информационных технологий, среди них важное место занимают технологии обработки данных: облачные технологии, применяемые для обработки больших объемов данных, а также граничные вычисления, позволяющие быстро и эффективно обрабатывать данные локально (на местах). В статье проведено сравнение этих технологий по различным критериям, определены области их применения при развитии ИЭС. Рассмотрены примеры применения этих технологий при реализации функций управления новыми объектами и структурами, создаваемыми и функционирующими в рамках цифровой трансформации и интеллектуализации энергетики, такими, как умный дом, активная распределительная сеть, тренажер диспетчера, виртуальная электростанция и др.

**Ключевые слова.** Интеллектуальная энергосистема, распределенные энергетические ресурсы, облачные технологии, граничные вычисления, безопасность данных

**Цитирование:** Колосок И.Н. Применение облачных и граничных технологий при развитии интеллектуальной энергосистемы / И.Н. Колосок, Е.С. Коркина // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2024. – № 4(36). – С. 73-84. – DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.008.

**Введение.** Создание и функционирование интеллектуальной энергосистемы (ИЭС) (англоязычный термин Smart Grid) осуществляется на основе применения новых технологий, включающих применение интеллектуальных счетчиков, автоматического считывания показаний счетчиков, сети датчиков и исполнительных механизмов; усовершенствованной измерительной инфраструктуры (AMI), интеллектуальных электронных устройств (IED) и блоков синхронизированных измерений (PMU); сети коммуникаций, включающих облако, глобальную вычислительную сеть (WAN), системы измерения больших площадей (WAMS), сеть соседства (NAN), сеть домашнего доступа (HAN) и локальную вычислительную сеть (LAN) [1, 2]. Эти технологии дают возможность осуществлять сбор и обработку измерительной информации, необходимой для управления функционированием новых приложений, создаваемых в рамках ИЭС, включая распределенные энергетические ресурсы (DER), виртуальные электростанции (ВЭС, VPP) и Агрегатор управления спросом на электроэнергию (Demand Response (DR)), Активных потребителей, автоматизацию зданий, подстанций и фидеров и др. [3]. Сбор и обработка в реальном времени множества постоянно меняющихся и взаимосвязанных данных о параметрах режима, поступающих от различных измерительных устройств географически распределенных объектов, требует существенных по объемам мощностей вычислительных центров, хранилищ данных большой ёмкости, при этом обеспечения безопасного доступа и конфиденциальности информации.

Облачные технологии предлагают вычислительные услуги и ресурсы пользователям, не имеющим своих собственных достаточных вычислительных ресурсов – вычислительных мощностей, хранилищ данных, программного обеспечения (ПО) и др. [4]. Облачные технологии имеют достаточно широкий опыт применения в различных областях электроэнергетики как за рубежом, так и в России: при создании цифровых двойников энергообъектов, мультиагентных систем управления и диагностики, системы

автоматизированного контроля энергообъектами в период эксплуатации, а также в сервисных системах, базирующиеся на технологиях «Интернета вещей», таких, как системы учета энергоресурсов, зарядки электромобилей, электроснабжения умных домов и др. [5].

К основным недостаткам облачных технологий, наиболее значимым при их использовании в задачах мониторинга и управления объектами ИЭС, относятся существенные задержки при передаче данных и угроза нарушения их конфиденциальности, при этом по мере того как растут объёмы данных, собираемых с различных датчиков, растут и риски, связанные с конфиденциальностью информации. Еще одна проблема состоит в том, что в условиях санкций российские потребители сталкиваются с ограничениями на приобретение и продление лицензий на зарубежное ПО.

Для преодоления этих недостатков было предложено использовать граничные (пограничные, периферийные) технологии (в англоязычной литературе чаще используется термин граничные вычисления - Edge Computing), которые появились позднее облачных, но имеют ряд преимуществ по сравнению с ними, включая меньшую задержку, большую безопасность и большую эффективность [6].

Граничные вычислительные ресурсы расположены ближе к источнику данных или конечному пользователю, это снижает задержку и позволяет обрабатывать данные непосредственно на объекте управления. Это особенно важно в Smart Grid, где управление должно выполняться в реальном времени, т.е. в темпе ведения технологического процесса.

В статье будут рассмотрены возможности применения облачных и граничных технологий при функционировании и управлении новыми объектами, создаваемыми в рамках цифровой трансформации и интеллектуализации энергетики, проведено сравнение этих технологий по различным критериям, определены области их применения при развитии ИЭС. Рассмотрены примеры использования облачных и граничных технологий для вновь создаваемых объектов и структур энергетики, таких как виртуальная электростанция, Активная распределительная сеть (АРС), умный дом и др.

**2. Вычислительные технологии при развитии ИЭС.** Процессы цифровизации энергетики и создания интеллектуальных энергосистем (ИЭС) сопровождаются широким использованием информационных технологий (ИТ), среди которых важное место занимают облачные технологии, применяемые для обработки больших объемов данных [7].

**2.1. Облачные технологии** представляют собой программно-аппаратное обеспечение, доступное пользователю через локальную сеть или сеть Интернет, для целей удаленного доступа к определенным ресурсам, включая, прежде всего, вычислительные мощности, хранилища данных и программное обеспечение.

Облачная система, состоящая из нескольких устройств, компьютеров и серверов, соединенных между собой через Интернет, может быть разделена на две части:

- Внешний интерфейс – устройства клиента (компьютеры, планшеты, мобильные телефоны);
- Внутренний интерфейс – хранение данных и обрабатывающие системы, которые могут быть отдалены от устройств клиента и самого облака.

Технология облачных вычислений предоставляет различные виды услуг, которые делятся на три группы [8]:

- Услуги инфраструктуры (IaaS) – удаленный центр обработки данных (ЦОД) с такими ресурсами как: вместимость хранения данных, вычислительная мощность, и сети;
- Платформа как услуга (PaaS) – развитие платформы с устройствами и компонентами для создания, тестирования и запуска приложений

- Услуги программного обеспечения (SaaS) – готовое ПО, соответствующее производственным потребностям.

Две последние модели облачных вычислений чаще всего используются в задачах электроэнергетики.

Только в 2022 году спрос на облачные сервисы и услуги в России вырос на 45%. В 2023 году российские предприятия планировали увеличить потребление облачных услуг еще на 28% [8]. Возрастающий спрос на облачные технологии в энергетике объясняется предоставляемыми ими преимуществами, среди которых важнейшим является качественный уровень развития компании: гибкость программных продуктов (необходимый набор модулей), возможность оперативного энергетического контроля, хранение истории передачи данных (полный архив по проекту в энергетике), и, наконец, сокращение бюрократических проволочек.

Однако использование облачных технологий в энергетике сопровождается и рядом проблем:

1. относительно большие затраты на создание собственных облаков;
2. зарубежные разработки, не всегда учитывающие потребности российской энергетической отрасли;
3. необходимость выполнения требований безопасности передачи данных;
4. сложности интеграции облачных технологий с внутренней ИТ-системой компании;
5. обеспечение доступа к облачным технологиям только при наличии доступа к Интернету, что означает их зависимость от канала связи;
6. требование адаптации персонала к новым принципам организации работы.

Как считают специалисты по применению облачных технологий в энергетике [5, 9], часть из этих проблем надумана, а действительные сложности – решаемы.

**2.2. Граничные (периферийные) вычисления (Edge Computing)** – это парадигма распределенных вычислений. В отличие от облачных вычислений, сбор и анализ данных проводится не в централизованной вычислительной среде, такой, как ЦОД (центр обработки данных), а в том месте, где происходит генерация потоков данных. Циркулирует и другой термин: **Fog Computing** («туманные» вычисления). И тот, и другой термин отображают процесс выхода функции обработки информации за пределы ЦОД.

**Edge (Fog) Computing** можно трактовать, как все вычисления вне облака, происходящие на границе сети, и более конкретно, в самих точках получения информации, в приложениях, где требуется обработка данных в реальном масштабе времени. Это сокращает задержку в критически важных по времени процессах, поскольку решения принимаются вблизи физического местоположения объекта, что подходит для локальных контроллеров в энергосистемах.

**Периферийные вычисления** – характеризуются целым рядом преимуществ и потенциальных возможностей [6]:

- позволяют анализировать и фильтровать данные ближе к датчикам; более того, в облако отправляются только релевантные данные;
- малое время отклика, измеряемое в миллисекундах, критично для послеаварийного восстановления в ЭЭС, так как задержка в производственном процессе может быть губительной, если случается авария;
- при необходимости конфиденциальные данные можно обрабатывать на месте, где они защищены от прямых сетевых подключений; это обеспечивает более высокий уровень контроля над безопасностью и конфиденциальностью информации;
- наконец, уменьшаются требования к емкости облачных хранилищ данных и пропускной способности сети, сокращаются соответствующие затраты, поскольку вместо отправки в

облако большой объем данных с датчиков можно обрабатывать непосредственно на периферии.

Слабые стороны Edge computing — недостаточная интероперабельность протокольного стека и отсутствие промышленных стандартов. Как следствие, на сегодняшний день устройства и приложения, которые работают на границе сети, представляют из себя набор автономных Edge-экосистем, а разнообразие интерфейсов препятствуют взаимодействию устройств друг с другом.

Edge Computing работает на «мгновенных данных», то есть на текущих данных, генерируемых датчиками или контролируемые системами. Источниками данных Edge computing служат сами обрабатывающие цифровые устройства (не обязательно находящиеся в одной локации), которые затем передают обработанные и систематизированные пакеты данных в точку центрального накопления (или хранят), и если Cloud technologies – это скорее статистика и бизнес-обеспечение процессов, то Edge (Fog) Computing ближе к обеспечению нужд АСУ ТП.

Развертывание Edge-инфраструктуры предусматривает два сценария [10]:

1. Обработка данных, которые генерируют устройства, осуществляется локально, без отправки в корпоративное облако или удаленный ЦОД, тем самым обеспечивая требования реального времени.
2. Обработка чувствительных к пропускной способности данных осуществляется на границе сети (Edge Computing), а данные, необходимые для решения задач off-line (аналитика, планирование, прогноз), передаются в облачные системы.

Более перспективным для применения в ИЭС является второй подход, который позволяет сократить объемы данных, передаваемых в облако, а, соответственно, и уровень трафика.

В таблице 1 приведено сравнение облачных и граничных технологий по критериям, наиболее значимым при их использовании в энергетике [11, 12].

**Таблица 1.** Сравнение облачных и граничных технологий по различным критериям

Требование Критерий	Облачные вычисления	Граничные вычисления
<b>Задержка при передаче и обработке данных</b>	Высокая задержка: обработка должна выполняться через сетевое соединение.	Практически нет: обработка выполняется локально, без сетевых задержек.
<b>Масштабируемость</b>	Высокая масштабируемость: облачные серверы могут обрабатывать большие объемы данных.	Ограниченная масштабируемость: граничные устройства имеют ограниченную вычислительную мощность.
<b>Работа с облаком</b>	Обязательно	Не всегда
<b>Надежность</b>	Высокая надежность: облачные серверы рассчитаны на высокую доступность и могут справиться с аппаратными сбоями, но облачная система может разрушиться при сбоях в сети Интернет: хранилища, серверы, сети, программное обеспечение и многое другое.	Высокая надежность вычислений. Данные обрабатываются даже в отсутствие подключения к интернету.
<b>Кибербезопасность</b>	В публичном облаке личная информация передается через глобально связанные каналы - возможна потеря данных, система уязвима к кибератакам, поэтому оператор облачных сервисов должен отвечать за сохранность данных: обеспечивать шифрование, защиту от атак и аварийное восстановление.	Высокая. Вся информация остается на устройстве. Её не обязательно передавать в публичное облако, но требуется надежный план безопасности, включающий расширенные методы аутентификации и активную защиту от атак.

<p><b>Цена</b></p>	<p>Сложная и дорогая инфраструктура. Если компания не хочет использовать публичное облако, то выбирает частное или гибридное, но установить и поддерживать большой дата-центр на производстве – затратная задача.</p>	<p>Затраты на оборудование и сотрудников. Пользователю технологии придется купить и настроить оборудование, привлечь специалистов. Это сложнее, чем подключить публичное облако.</p>
--------------------	---	--

Таким образом, каждая из этих технологий имеет свои преимущества и недостатки, уровень надежности и кибербезопасности, поэтому для сбора и обработки данных при управлении новыми объектами в ИЭС следует применять ту технологию, которая обеспечит необходимое быстродействие обмена данными при требуемом уровне кибербезопасности и надежности объекта при его функционировании.

**3. Примеры использования облачных и граничных технологий при создании новых объектов и структур в ИЭС.** Облачные технологии нашли широкое применение в сервисных системах, базирующихся на технологиях «Интернета вещей», таких, как системы учета энергоресурсов, зарядки электромобилей, интеллектуальные системы управления умными домами и умными городами и др.

**3.1. Умный дом.** Интернет вещей (IoT) играет ключевую роль в умном доме, благодаря ему происходит обмен данными между устройствами и интернетом. Устройства умного дома могут быть подключены к облаку или локальной сети, что позволяет пользователю управлять ими удаленно через мобильные приложения или веб-интерфейсы. Интернет вещей также позволяет устройствам получать обновления ПО и взаимодействовать с другими сервисами и платформами [13].

Как только данные покидают Умный дом – защита этих данных выходит из-под контроля владельца, поэтому требуется найти эффективные решения для шифрования и защиты передаваемых и находящихся в состоянии покоя данных или же обрабатывать зашифрованные данные, не выходя за пределы сети "умный дом". Эти требования соответствуют реализации возможностей **граничной** обработки, но относительно дешевые потребительские устройства, чаще всего устанавливаемые в настоящее время в Умных домах, не способны выполнять модели Machine Learning или другие сложные задачи, необходимые для реализации технологии граничных вычислений, поэтому для использования этих технологий с целью сбора данных и реализации функций управления в Умных домах необходимо внедрение интеллектуальных счетчиков (AMI), контроллеров, и другого оборудования с функциями искусственного интеллекта (ИИ).

**3.2. Автоматизированная система коммерческого учета электроэнергии (АСКУЭ).** АСКУЭ предназначена для сбора показаний с приборов учета как на предприятиях (на розничном рынке электроэнергии), так и на объектах бытового сектора – в жилых многоквартирных домах. Система предоставляет пользователям достоверную информацию о фактическом потреблении электроэнергии и может быть реализована с применением различных каналов связи, которые обеспечивают своевременную и достоверную передачу информации о потреблении, о внештатных ситуациях, позволяют выявить факты хищений электроэнергии и дистанционно отключить неплательщиков.

В настоящее время на рынке предлагается большое количество коммерческих разработок АСКУЭ, среди них появились системы, построенные на использовании облачного ПО для доступа к показаниям приборов учета через Интернет, например, облачная АСКУЭ TIME2SAVE [14]. Предлагаемое облаком ПО (Software As A Service, **SaaS**) используется для обработки показаний энергопотребления. Данные со счетчиков поступают в ЦОД, шифруются, подаются Интернет-провайдеру, оттуда поступают на сервер Энергосетевой компании, дешифруются и обрабатываются. Прозрачность энергопотребления дает

возможность потребителям регулировать уровень своего потребления, а Электросетевой компании – фиксировать случаи хищения электроэнергии и бороться с кражами.

Подобный подход дает возможность существенной экономии, поскольку в этом случае не требуется приобретать дорогостоящее, как правило, ПО и серверы и производить настройку всего комплекса. Достаточно за небольшую абонентскую плату арендовать место в «облаке» на необходимое количество электросчетчиков.

**3.3. Управление активной распределительной сетью (АРС).** Цифровизация сети привела к значительному прогрессу в технологиях измерений, вычислений и интеллектуальном управлении, повысив эффективность и отказоустойчивость Активных распределительных сетей (АРС) [8].

АРС включают в себя интеллектуальные устройства на базе Интернета вещей (IoT), такие, как контроллеры реагирования на запросы, распределенные источники энергии (DER), системы хранения энергии и другие интеллектуальные устройства, повышающие гибкость системы [15]. Эти устройства Интернета вещей теперь могут выполнять локальные вычисления на периферии сети, предоставляя услуги пользователям.

Распределенные источники энергии (DER) в АРС могут использоваться для предоставления вспомогательных услуг, частично заменяя загрузку/разгрузку централизованных электростанций, при реализации которых реакция АРС не должна превышать допустимых временных значений (от нескольких секунд до нескольких минут).

Координация и управление DER в АРС могут осуществляться либо с помощью управляющих сигналов, передаваемых по сети связи, либо с помощью автономных контроллеров DER, которые действуют исключительно на основе локальных измерений. Оптимальным с точки зрения координации принятия решений и гибкости является первый подход. В этом случае контроллеры, а также коммуникационная сеть вместе представляют информационно-коммуникационную систему. Как показано в [16], для обеспечения максимально допустимой задержки при передаче данных через информационно-коммуникационную сеть, не оказывающей негативного влияния на качество управления, необходимо использовать локальную обработку данных на базе граничных вычислений либо комбинированный подход, при котором данные, полученные с датчиков и сенсоров, оперативно обрабатываются на граничном устройстве (контроллере); в случае фиксации аномальных значений поступает соответствующая команда на исполнительные устройства или оповещение оператору, и только часть данных передается для обработки и хранения в облако. Такой подход позволяет обеспечить требуемую задержку и снизить затраты на передачу данных.

**3.4. Создание и сопровождение единой информационной модели для решения задач управления режимами крупных энергообъединений.** Традиционный подход к моделированию ЭЭС основывается на применении математических моделей, которые должны быть адекватны решаемым задачам. Как правило, эти расчеты проводят различные подразделения центров диспетчерского управления, и в каждом из них используются свои математические модели различной степени подробности одной и той же физической сети, что приводит к снижению точности моделирования и качества управления.

Для решения этой проблемы Системным оператором (СО) ЕЭС России с 2012 по 2016 год в рамках проекта «Трехуровневая автоматизированная система формирования физических и эквивалентных моделей для расчетов и оценивания электрических режимов» разрабатывалась Единая информационная модель ЕЭС России [17].

Использование Единой информационной модели позволило упорядочить информационные потоки в АО «СО ЕЭС», повысить качество используемых данных, снизить разнородность и разновременность обновления технологических сведений, обеспечить

совместимость информационных продуктов различных производителей и сократить сроки и стоимость внедрения новых автоматизированных систем.

Аналогичные разработки выполняются за рубежом, так, для управления энергообъединением Среднего континента в США была создана и выполняется сопровождение единой сетевой модели [18]. Энергообъединение Среднего континента включает энергосистемы 15 штатов в США и канадской провинции Манитоба.

Независимый системный оператор энергообъединения (MISO) осуществляет диспетчерское управление, рыночное регулирование и планирование в ЭЭС Среднего континента. Тройная роль MISO требует точных моделей энергосистем, что становится все более сложной задачей по мере увеличения объема данных, ускорения частоты их изменений из-за интеграции распределенных возобновляемых ресурсов и динамического уточнения модели. ISO получает данные модели несколько раз в разных форматах. В результате этого существует большая вероятность возникновения расхождений между онлайн- и оффлайн-моделями, что может привести к ошибкам в управлении.

Новое решение, которое MISO внедряет для управления сетевой моделью, построено на базе общедоступных облачных сервисов AWS [19]. Решение поставляется MISO от ее поставщика Siemens в формате SaaS, что обеспечивает ISO масштабируемую инфраструктуру, стабильную производительность приложений, снижение потребности в ИТ-поддержке, а также гарантии безопасности.

Использование современных облачных технологий обеспечивает MISO точность, синхронизацию и постоянное обновление моделей энергосистем в рамках всех задач, решаемых ISO, а также предоставление их с более короткими циклами обновления и меньшим количеством ошибок.

MISO серьезно относится к безопасности облачных систем. Требования к безопасности, которые необходимо соблюдать при их использовании, охватывают следующие области: контроль доступа, аудит и подотчетность, информирование и обучение, управление конфигурацией, планирование на случай непредвиденных обстоятельств, идентификация и аутентификация, реагирование на инциденты, техническое обслуживание, защита средств массовой информации, безопасность персонала, физическая защита и защита окружающей среды, оценка рисков, защита систем и коммуникаций, целостность систем и информации.

**3.5. Тренажер диспетчера [20].** Тренажер диспетчера – это сложный программно-технический комплекс, предназначенный для проведения противоаварийных тренировок оперативного персонала объединений энергосистем, энергосистем и электрических сетей. В настоящее время разработан ряд различных тренажеров, каждый из которых предназначен для решения определенных задач, требует специальных технических и программных средств, и, как правило, распространяется на коммерческой основе. К сожалению, упоминаний об использовании облачных технологий в отечественных разработках тренажеров авторам найти не удалось, поэтому была рассмотрена зарубежная разработка Power Simulator.

Компании IncSys и PowerData совместно разрабатывают обучающее ПО Power Simulator [18], которое помогает тестировать и повышать квалификацию системных операторов ЭЭС в выполнении своих задач в обычных и аварийных условиях, а также моделировать наиболее разрушительные системные события и тестировать планы их восстановления.

Power Simulator предлагается своим клиентам в виде SaaS-модели. Обычно он предоставляется в общедоступном облаке, где для создания этого облачного решения используются такие сервисы, как сеть, вычисления, хранилище и безопасность. Он также может быть размещен в частном облаке, но общедоступное облако дает ряд преимуществ по сравнению с другими платформами: быструю доступность, масштабируемость, надежность и

безопасность инфраструктуры, основанную на соблюдении лучших практик обеспечения безопасности приложений на облачном уровне.

Облако позволяет участвовать в симуляциях с любого сайта, имеющего доступ в Интернет, и современный браузер. Обеспечивается реалистичность учений и тренировок, поскольку участники получают доступ к ПО со своего обычного рабочего места, используя те же средства коммуникации, что и в реальной чрезвычайной ситуации. Все участники работают в интерактивном режиме реального времени, выполняя свои реальные роли. Действия каждого оператора и их влияние на систему отслеживаются в режиме реального времени.

**3.6. Агрегация данных и управление ими.** Проблема агрегации данных возникла в связи с появлением в рамках создания ИЭС большого количества распределенных источников генерации и активных потребителей, имеющих свои собственные избыточные энергоресурсы, но которые в силу своей небольшой единичной мощности не могут быть подключены к оптовому рынку электроэнергии и мощности (ОРЭМ). Компании-агрегаторы объединяют регулировочные возможности таких субъектов в блок (кластер), удовлетворяющий требованиям рынка по величине разгрузки, и являются посредниками между ними и инфраструктурой рынка [21]. К структурам агрегации данных и управления ими относятся Виртуальные электростанции (ВЭС, VPP) и Агрегатор управления спросом на ЭЭ (Demand Response (DR-агрегатор))

Виртуальная электростанция – это централизованная платформа, использующая ИКТ и устройств IoT для объединения возможностей разнородных распределенных источников генерации (DER), которые сами по себе не могут участвовать в оптовом рынке ЭЭ.

Традиционная модель функционирования ВЭС – модель энергосбытовой компании: компания, работающая на энергорынке (например, энергосбытовая), создает сеть, контролирующую различные объекты распределенной генерации и гибкой мощности своих потребителей.

Агрегатор УС – это координирующий центр в механизме управления спросом (УС), созданный для объединения не вовлеченных в ОРЭМ субъектов электроэнергетики – Активных потребителей (АП), имеющих свои собственные избыточные энергоресурсы и возможность снижения энергопотребления из централизованной энергосистемы в определенные часы суток. Основная цель управления спросом на электроэнергию в ЕЭС России – уменьшение пиковой нагрузки в энергосистеме, необходимое как для снижения цен на рынке ЭЭ, так и для оптимизации управления энергосистемой и интеграции ВИЭ.

Агрегатор УС имеет распределенную структуру, он принимает заявки от потребителей, которые без ущерба для технологического цикла способны изменять потребление ЭЭ, разрабатывает оптимальные алгоритмы участия в программах DR, оснащает таких АП необходимыми средствами автоматизации и учета.

Традиционное управление ВЭС и структурой Агрегатора УС выполняется централизованно, информация собирается и передается на устройства в центр управления через коммуникационную среду с использованием беспроводных сотовых технологий (4G, 5G). Технологии связи создают проблемы с конфиденциальностью в централизованной среде, поэтому были предложены методы распределенного управления, базирующиеся на использовании ИКТ: облачных и периферийных (пограничных) вычислений.

Британская Компания Centrica уже 10 лет является поставщиком решений для мониторинга и управления распределенными активами в энергосистемах Германии, Великобритании, Бельгии, Франции и др. [22]. Платформа Centric VPP управляет 1,7 ГВт DERs. Специально разработанные сервисы, такие, например, как IoT Core, позволяют подключенным устройствам безопасно взаимодействовать с облачными приложениями и другими устройствами. IoT Core может поддерживать миллиарды устройств, на которых

создаваемые ими данные обрабатываются локально; облако используется для управления, аналитики и долговременного хранения данных.

Centrica защищает все коммуникации, хранимые данные и постоянно следит за целостностью системы:

- платформа VPP недоступна из общедоступного Интернета;
- любой авторизованный доступ требует двухфакторной аутентификации;
- все коммуникации между пользователями и платформой зашифрованы с использованием надежной криптографии;
- данные, связанные с управлением DERs, хранятся в защищенных ЦОДах, сертифицированных по стандарту ISO 27001\$;
- доступ к данным строго ограничен в зависимости от личности пользователя и соответствующих прав доступа.

Для усовершенствования механизма безопасности сетевой структуры VPP была предложена новая концепция VPP на базе граничных (периферийных) вычислений, оптимизируя тем самым производительность.

Архитектура VPP, ориентированная на периферию, содержит четыре основных компонента: облачную архитектуру, граничный уровень, операторов VPP и конечных потребителей/просьюмеров VPP. Введение в действие граничного уровня изменяет компоненты и динамику фундаментальной архитектуры, при этом пограничный уровень становится ядром, поскольку он может координироваться с различными VPP, выступая в качестве связующего звена между пользователями и облаком.

При рассмотрении аспектов безопасности возникают серьезные проблемы. Например, пользователь может войти в систему либо с оконечного устройства, которое является надежным и защищенным, либо с ненадежного устройства. Второй аспект заключается в том, что потребитель может быть не осведомлен о безопасности или не обладать достаточными знаниями для управления инфраструктурой, что может привести к повышению потенциального риска.

**Заключение.** Процессы интеллектуализации и цифровизации электроэнергетики неуклонно ведут к тому, что любое энергетическое предприятие будет со временем управляться "...компьютерными программами, которые могут размещаться в "облаках".

Облака обеспечивают огромные ресурсы для сложных вычислений и огромных объемов данных, но по мере масштабирования и распространения ИИ задержки, проблемы конфиденциальности, ограничения на подключение и пропускную способность сети лимитируют максимально возможное применение облачных технологий.

Периферийные вычисления компенсирует некоторые из этих ограничений, особенно для приложений, требующих немедленной обработки данных, со строгими ограничениями по задержкам и требованиями к доступности. Кроме того, оно решает проблемы конфиденциальности и безопасности, сохраняя конфиденциальные данные локализованными.

Для наилучшей производительности необходимо правильное сочетание периферийных и облачных приложений. **Будущее применения технологий ИИ в энергетике за гибридными облачно-периферийными приложениями.** Распределяя задачи между периферией и облаком, можно оптимизировать приложения с точки зрения скорости, эффективности, безопасности и конфиденциальности.

**Благодарности.** Исследование проводится в рамках проекта государственного задания (№ FWEU-2021-0001) программы фундаментальных исследований Российской Федерации на 2021-2030 годы (рег. № АААА-А21-121012190027-4).

## Список источников

1. Цифровизация энергетики // Институт энергетики Высшей школы экономики, 2020. – URL: <https://energy.hse.ru/digitalization> (дата обращения: 04.04.2023).
2. Emmanuel M., Rayudu R. Communication technologies for smart grid applications: a survey. Journal of Network and computer applications, 2016, no. 74, pp. 133-148.
3. Воропай Н.И. Направления и проблемы трансформации электроэнергетических систем / Н.И. Воропай // Электричество, 2020. – № 7. – С. 12-21.
4. Red Hat. Cloud vs. Edge. Available at: <https://www.redhat.com/en/topics/cloud-computing/cloud-vs-edge> (accessed: 06/27/2024)
5. Гаджиев М. Облачные технологии в энергетике / М. Гаджиев, Д.Кравец, И. Мурзаханов и др. // ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение, 2016. – № 6. –С. 52-58.
6. Edge Computing (вычисления на границе). – URL: <http://cons-systems.ru/edge-computing-vychisleniya-na-granitse> (дата обращения: 27.06.2024)
7. Массель Л.В. Современный этап развития искусственного интеллекта (ИИ) и применение методов и систем ИИ в энергетике / Л.В. Массель // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2021. – № 4 (24). – С. 5-20.
8. Wagdy Anis Aziz, Eduard Babulak, David Al-Dabass. Network function virtualization over Cloud-Cloud computing as business continuity solution. Available at: <https://www.intechopen.com/chapters/76746> (accessed: 06/27/2024)
9. Бараблин М. Российские облака: как менялся рынок облачных решений за последние годы. – URL: <https://www.comnews.ru/content/229540/2023-10-19/2023-w42/1013/rossiyskie-oblaka-kak-menyalsya-rynok-oblachnykh-resheniy-za-poslednie-gody> (дата обращения: 27.06.2024)
10. Tadviser. Периферийные вычисления. – URL: <https://www.tadviser.ru/index.php/> (дата обращения: 27.06.2024)
11. Хрисанфова Е. Облачные, туманные и граничные вычисления: отличия и перспективы развития технологий. – URL: <https://rb.ru/story/edge-computing/> (дата обращения 24.06.2024)
12. Сравнение облачных и туманных вычислений для создания проектов интернета вещей. – URL: <https://oncloud.ru/blog/2019/06/05/oblachnye-i-tumannye-vychisleniya-dlya-IoT>. (дата обращения: 27.06.2024)
13. Dunne R., Morris T., Harper S. A survey of ambient intelligence. ACM computing surveys, 2021, vol. 54, no. 4, DOI:10.1145/3447242.
14. Торопыно И. Облачная АСКУЭ TIME2SAVE / И. Торопыно // Control Engineering, 2016. – URL: <https://controleng.ru/avtomatizatsiya-zdanij/askue-time2save/> (дата обращения: 27.06.2024)
15. Tianming Zheng, Ming Liu, Deepak Puthal et al. Smart grid: cyber-attacks, critical defense approaches, and digital twin, available at: <https://www.arxiv-vanity.com/papers/2205.11783/> (accessed: 06/27/2024)
16. Narayan A., Klaes M., Lehnhoff S., Rehtanz C. Analyzing the propagation of disturbances in cpes considering the states of ict-enabled grid services. 2021 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC). IEEE, 2021, pp. 522–529.
17. Беляев Н.А., Богомолов Р.А. СИМ в России: опыт АО «СО ЕЭС» по внедрению и сопровождению Единой информационной модели ЕЭС России в иерархической структуре диспетчерского управления, планы и перспективы / Н.А. Беляев, Р.А. Богомолов // Сборник докладов всероссийской научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи», Иркутск, Россия, 16-20 сентября 2019 г. – Т. 1. – С. 38-43.
18. Song Zhang, Amritanshu Pandey, Xiaochuan Luo et al. practical adoption of cloud computing in power systems–drivers, challenges, guidance, and real-world use cases. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, vol. 13, iss. 3, pp. 2390 – 2411.
19. Amazon Web Services. Navigating GDPR Compliance on AWS, 2020. Available at: [https://d1.awsstatic.com/whitepapers/compliance/GDPR\\_Compliance\\_on\\_AWS.pdf](https://d1.awsstatic.com/whitepapers/compliance/GDPR_Compliance_on_AWS.pdf). (accessed: 06/27/2024)
20. Тянь Р.Л. Особенности режимных тренажеров диспетчера энергосистем, разработанных в России, Европе и США / Р.Л. Тянь, В.П. Будовский // Энергетик, 2013. – № 9. – С. 47-51.
21. Бык Ф.Л. Агрегатор - элемент цифровой трансформации региональной сети / Ф.Л. Бык, Л.С. Мышкина // Методические вопросы исследования надежности БСЭ: в 2-х книгах. Ответственный редактор Воропай Н.И Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2019. – Т.1. – вып. 70. – С.144-152.
22. Centrica. Available at: <https://www.centrica.com/who-we-are/> (accessed: 06/27/2024)

*Колосок Ирина Николаевна. Д.т.н., ст.н.с., ИСЭМ СО РАН, вед.н.с. Математические модели, методы и алгоритмы для решения комплекса задач информационного обеспечения для мониторинга и диспетчерского управления интеллектуальной энергосистемой (ИЭС) на базе современных средств измерений и новых*

информационных технологий, кибербезопасность и киберфизическая устойчивость ИЭС и ее объектов. AuthorID: 48007871, ORCID: 0000-0002-2843-4455, kolosok@isem.irk.ru, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 130.

**Коркина Елена Сергеевна.** К.т.н., с.н.с., ИСЭМ СО РАН, с.н.с. Основные направления исследований: кибербезопасность объектов электроэнергетики, синхронизированные векторные измерения, оценивание состояния электроэнергетических систем, кибер-физические системы. AuthorID: 24577537100, SPIN: 8084-7363, ORCID: 0000-0001-6488-5774, korkina@isem.irk.ru. 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 130.

UDC 004.413.4

DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.008

## Application of cloud and edge technologies in the development of intelligent energy system

**Irina N. Kolosok, Elena S. Korkina**

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,  
Russia, Irkutsk, kolosok@isem.irk.ru

**Abstract.** The process of creating intelligent energy systems (IES) is accompanied by the widespread use of information technologies, among them data processing technologies occupy an important place: cloud technologies used to process large amounts of data, as well as edge computing, which allows you to quickly and efficiently process data locally. The article compares these technologies according to various criteria, and identifies the areas of their application in the development of the IES. Examples of using these technologies in the implementation of control functions for new facilities and structures created and functioning within the framework of digital transformation and intellectualization of power industry such as a smart home, an active distribution network, a dispatcher simulator, a virtual power plant, etc. are considered.

**Keywords:** intelligent energy system, distributed energy resources, cloud technologies, edge computing, data security

**Acknowledgements:** This study was carried out within the framework of the state assignment project (No. FWEU-2021-0001) of the program of fundamental research of the Russian Federation for 2021-2030 (Reg. No. AAAA-A21-121012190027-4).

### References

1. Cifrovizaciya energetiki [Digitalization of Energy]. Institut energetiki Vysshej shkoly ekonomiki [Institute of energy of the Higher school of economics], 2020, available at: <https://energy.hse.ru/digitalization> (accessed: 04/04/2024)
2. Emmanuel M., Rayudu R. Communication technologies for smart grid applications: a survey. *Journal of Network and computer applications*, 2016, no. 74, pp. 133-148.
3. Voropaj N.I. Napravleniya i problemy transformacii elektroenergeticheskikh system [Directions and problems of transformation of electric power systems]. *Elektrichestvo [Electricity]*, 2020, no 7, pp. 12-21.
4. Red Hat. Cloud vs. Edge, available at: <https://www.redhat.com/en/topics/cloud-computing/cloud-vs-edge> (accessed: 06/27/2024)
5. Gadzhiev M., Kravec D., Murzahanov I. et al. Oblachnye tekhnologii v energetike [Cloud technologies in energy]. *ELEKTROENERGIYA. Peredacha i raspredelenie [ELECTRIC POWER. Transmission and distribution]*, 2016, no 6, pp.52-58.
6. Edge Computing (vychisleniya na granitse) [Edge Computing (calculations at the border)]. Available at: <http://cons-systems.ru/edge-computing-vychisleniya-na-granitce> (accessed: 06/27/2024)
7. Massel' L.V. Sovremennyyj etap razvitiya iskusstvennogo intellekta (II) i primeneniye metodov i sistem II v energetike [The current stage of development of artificial intelligence (AI) and the application of AI methods and systems in energy]. *Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management]*, 2021, no (24), pp. 5-20.
8. Wagdy Anis Aziz, Eduard Babulak, David Al-Dabass. Network function virtualization over Cloud-Cloud computing as business continuity solution. Available at: <https://www.intechopen.com/chapters/76746> (accessed: 06/27/2024)

9. Barablin M. Rossijskie oblaka: kak menyalsya rynek oblachnyh reshenij za poslednie gody [Russian clouds: how the cloud solutions market has changed in recent years]. Available at: <https://www.comnews.ru/content/229540/2023-10-19/2023-w42/1013/rossijskie-oblaka-kak-menyalsya-rynek-oblachnykh-resheniy-za-poslednie-gody> (accessed: 06/27/2024)
10. Tadviser. Periferijnye vychisleniya [Edge\_computing], available at: <https://www.tadviser.ru/index.php/> (accessed: 27/06/2024)
11. Hrisanova E. Oblachnye, tumannye i granichnye vychisleniya: otlichiya i perspektivy razvitiya tekhnologij [Cloud, fog and edge computing: differences and prospects for technology development]. Available at: <https://rb.ru/story/edge-computing/> (accessed: 06/27/2024)
12. Sravnenie oblachnyh i tumannyh vychislenij dlya sozdaniya proektov interneta veshchej [Comparison of cloud and fog computing for building IoT projects]. Available at: <https://oncloud.ru/blog/2019/06/05/oblachnye-i-tumannye-vychisleniya-dlya-IoT>. (accessed: 06/27/2024)
13. Dunne R., Morris T., Harper S. A survey of ambient intelligence. ACM computing surveys, 2021, vol. 54, no. 4, DOI:10.1145/3447242.
14. Toropyno I. Oblachnaya ASKUE TIME2SAVE [Cloudy ASKUE TIME2SAVE]. Control Engineering, 2016, available at: <https://controleng.ru/avtomatizatsiya-zdaniy/askue-time2save/> (accessed: 06/27/2024)
15. Tianming Zheng, Ming Liu, Deepak Puthal et al. Smart grid: cyber-attacks, critical defense approaches, and digital twin, available at: <https://www.arxiv-vanity.com/papers/2205.11783/> (accessed: 06/27/2024)
16. Narayan A., Klaes M., Lehnhoff S., Rehtanz C. Analyzing the propagation of disturbances in cpes considering the states of ict-enabled grid services. 2021 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC). IEEE, 2021, pp. 522-529.
17. Belyaev N.A., Bogomolov R.A. CIM v Rossii: opyt AO "SO EES" po vnedreniyu i soprovozhdeniyu Edinoj informacionnoj modeli EES Rossii v ierarhicheskoy strukture dispetcherskogo upravleniya, plany i perspektivy [CIM in Russia: experience of JSC "SO UES" in the implementation and maintenance of the Unified Information Model of the Unified Energy System of Russia in the hierarchical structure of dispatch control, plans and prospects]. Sbornik dokladov vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii "Elektroenergetika glazami molodezhi" [Collection of reports of the All-Russian scientific and technical conference "Electric Power Industry through the Eyes of Youth", Irkutsk, Russia, September 16-20], Irkutsk, 2019, vol. 1, pp. 38-43.
18. Song Zhang, Amritanshu Pandey, Xiaochuan Luo et al. practical adoption of cloud computing in power systems—drivers, challenges, guidance, and real-world use cases. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, vol. 13, iss. 3, pp. 2390-2411.
19. Amazon Web Services. Navigating GDPR Compliance on AWS, 2020, available at: [https://d1.awsstatic.com/whitepapers/compliance/GDPR\\_Compliance\\_on\\_AWS.pdf](https://d1.awsstatic.com/whitepapers/compliance/GDPR_Compliance_on_AWS.pdf). (accessed: 06/27/2024)
20. Tyan R.L., Budovskij V.P. Osobennosti rezhimnyh trenazherov dispetchera energosistem, razrabotannyh v Rossii, Evrope i SSHA [Features of power system dispatcher simulators developed in Russia, Europe and the USA]. Energetik [Power engineer], 2013, no 9, pp. 47-51.
21. Byk F.L., Myshkina L.S. Agregator - element cifrovoj transformacii regional'noj seti [Aggregator - an element of digital transformation of the regional network]. Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti BSE: v 2-h knigah. Tom 1, vypusk 70. Otvetstvennyj redaktor Voropaj N.I Irkutsk: ISEM SO RAN [Methodological issues in studying the reliability of TSB: in 2 books. Executive editor Voropai N.I. Irkutsk: ISEM SB RAS], 2019, pp.144-152.
22. Centrica. Available at: <https://www.centrica.com/who-we-are/> (accessed: 06/27/2024)

**Kolosok Irina Nikolaevna.** Doctor of Sciences, Senior Researcher, MESI SB RAS, leading researcher. *Mathematical models, methods and algorithms for solving complex tasks of information support for monitoring and dispatching control of an intelligent power system (IES) based on modern measuring instruments and new information technologies, cybersecurity and cyberphysical stability of the IES and its objects.* AuthorID 48007871, ORCID 0000-0002-2843-4455. kolosok@isem.irk.ru. 664033, Irkutsk, Lermontov str.,130.

**Korkina Elena Sergeevna.** PhD, researcher, MESI SB RAS, senior researcher. *The main areas of research: cybersecurity of electric power facilities, synchronized vector measurements, assessment of the state of electric power systems, cyber-physical systems.* AuthorID 24577537100, SPIN 8084-7363, ORCID 0000-0001-6488-5774. korkina@isem.irk.ru. 664033, Irkutsk, Lermontov str.,130.

Статья поступила в редакцию 02.09.2024; одобрена после рецензирования 28.11.2024; принята к публикации 17.12.2024.

The article was submitted 09/02/2024; approved after reviewing 11/28/2024; accepted for publication 12/17/2024.