

Краевые вычисления для цифровизации энергетики. Аналитический обзор.

Б.Н. Чигарев

Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия.

Аннотация

Данная статья посвящена выявлению актуальной задачи исследования в рамках темы «Краевые вычисления для цифровизации энергетики». Связанность краевых вычислений с задачами энергетики показана на основе краткого библиометрического анализа данных следующих платформ: Scopus, dimensions.ai, IEEE Xplore, The Lens. Доминирующим применением краевых вычислений является цифровизация интеллектуальных энергетических сетей. Краевые технологии направлены на перенос части облачных вычислений в непосредственную близость к краевым устройствам, генерирующим исходные данные. Краевые вычисления могут способствовать улучшению параметров энергопотребления, конфиденциальности и использованию полосы пропускания систем Интернета вещей. Исследования в области краевых вычислений для задач энергетики в основном финансируются китайскими и европейскими организациями. В данной работе выявление перспективной задачи исследования проводилось только по авторским ключевым словам. По результатам анализа публикаций, представленных в Scopus, перспективной задачей применения краевых вычислений является трансактивная энергетика, которая использует экономические и регулятивные механизмы для динамического балансирования спроса и предложения в электрической сети. Нарождающимся трендом является тема краевых энергетических сетей и формирование децентрализованных энергетических сообществ.

Введение

Мотивация и постановка задачи

Мотивация поиска и решения актуальных задач заключается в том, что если их вовремя не решить, то их решат другие. Решение будет внедрено, освоено и займет свою нишу. Ниша будет занята и освоена, привлечь активных сотрудников и средства на развитие такой задачи будет сложно.

Поиск актуальной проблемы исследования в рамках заданной темы в некотором смысле является обратной задачей по отношению к составлению систематического обзора. Написание систематического обзора можно рассматривать как прямую задачу анализа проверки обоснованности актуального для науки тезиса, например, обоснованность утверждения, что такой-то метод устойчиво работает в широком диапазоне параметров. Для этого по результатам запросов к реферативным базам отбираются публикации, относящиеся к использованию данного метода. Далее из этих публикаций выбираются те, в которых представлены: детальное описание выборки, к которым применялся рассматриваемый метод, условия применения метода и результаты, полученные авторами.

При выявлении актуальной задачи исследования мы не можем заранее составить полный запрос к реферативной базе публикаций. В этом случае можно сначала по широкому запросу собрать библиометрические данные, раскрывающие содержание темы. На втором этапе, проанализировав собранный материал, выявить актуальную задачу и

описать ее ключевыми терминами, которые в дальнейшем будут использованы для составления запроса к реферативным базам публикаций и сбора материалов, раскрывающих текущее состояние дел по решению выбранной актуальной задачи.

В рамках данной статьи будет рассмотрена только общая концепция описанного выше подхода (методики) на примере выявления актуальной задачи научных исследований по теме использования граничных/периферийных вычислений¹ в области «Энергетика и энерготехнология»² (Energy Engineering and Power Technology, код области знаний 2102, используемый Scopus: Subject Areas and All Science Journal Classification Codes (ASJC)).

В классификации Scopus используются следующие коды, относящиеся к энергетике: General Energy, Energy (miscellaneous), Energy Engineering and Power Technology, Fuel Technology, Nuclear Energy and Engineering, Renewable Energy, Sustainability and the Environment. Учитывая, что в рамках данного исследования в первую очередь интересовали инженерные задачи энергетики, не входящие в область атомной и возобновляемой энергетики, выбор был сделан в пользу кода Energy Engineering and Power Technology.

Актуальность

В данной работе тема краевых вычислений для задач энергетики анализировалась по библиометрическим данным платформы Scopus.

Актуальность темы «edge computing» можно проиллюстрировать тем, что по данным Scopus по ней в 2014 году было проиндексировано 14 публикаций, в 2015 — 40, а в 2021 уже — 5696 и в 2022 — 6127 публикаций.

Чтобы снизить возможную предвзятость актуальности рассматриваемой темы приведем краткий анализ публикационной активности по ней по результатам запросов к другим реферативным базам. При этом, мы не будем ограничивать актуальностью краевых вычислений для энергетики, а будем использовать запрос Edge Computing без дополнительной фильтрации по области применения. Это позволит показать, в каких областях исследования чаще всего встречаются задачи применения краевых вычислений.

Платформа dimensions.ai позиционирует себя как самую полную базу данных грантов на исследования, которая связывает гранты с миллионами итоговых публикаций, клинических испытаний и патентов. Т.е. позиционирование отличается от платформы Scopus, которая является библиографической и реферативной базой данных рецензируемой научной литературы. В dimensions.ai индексируются не только рецензируемые статьи.

Приведем список результатов запроса «edge computing» в заголовках и аннотациях публикаций к платформе app.dimensions.ai в формате год (число публикаций):

2022 (5919); 2021 (5371); 2020 (4312); 2019 (3001); 2018 (1754); 2017 (690); 2016 (191); 2015 (33); 2014 (9). В 2014 году было опубликовано только 9 работ, с 2015 года по 2020 год число публикаций возросло с 33 до 4312, а уже в 2021—2022 годах рост числа публикаций замедлился (5371 и 5919 публикаций). За пять лет (2014—2018) число публикаций выросло почти в 195 раз. Можно утверждать, что за 2014—2022 год актуальность темы «edge computing» успела сформироваться.

¹ Устоявшегося перевода термина edge computing на русский язык нет, наиболее часто употребляются термины периферийные вычисления и граничные вычисления.

² Перевод взят в самой системе Scopus:
https://ru.service.elsevier.com/app/answers/detail/a_id/19279/supporthub/scopus/

Распределение числа публикаций по категориям ANZSRC³, используемых платформой dimensions.ai, составило:

Information and Computing Sciences (19280); Engineering (7371); Commerce, Management, Tourism and Services (451); Built Environment and Design (334). Т.е. в теме доминируют инженерные задачи в области информатики и компьютерных наук.

Из результатов данного запроса следует, что большое число публикаций размещено в виде препринтов arXiv (1633); и работ, опубликованных в журналах IEEE: IEEE Access (802); IEEE Internet of Things Journal (725).

IEEE имеет свою открытую библиометрическую платформу ieeexplore.ieee.org, что позволяет оценить актуальность темы «edge computing» в другом измерении, например, оценив число публикаций представленных на конференциях, проводимых IEEE.

Так, по данным платформы ieeexplore.ieee.org, в 2018 году число трудов конференций составило 1300, а в 2022 году — 2186.

Интерес к теме «edge computing» сохраняется и в 2023 году. Так, согласно ресурсу conferenceindex.org⁴ на 2023 год запланировано 38 международных конференций, в названии которых содержится термин edge computing.

Платформа The Lens (lens.org) позиционирует себя как система, которая «предоставляет глобальные патентные и научные знания в качестве общественного блага для информационного обеспечения решения проблем в области науки и техники».

Данную платформу отличает огромный охват библиометрических данных научных публикаций (более 250 миллионов записей на момент написания данной статьи). Значительная часть работ размещена в журналах, не индексируемых ни Scopus, ни Web of Science.

За 2018—2022 годы данная платформа содержит библиометрические данные 14966 журнальных статей и трудов конференций, удовлетворяющих запросу встречаемости термина «edge computing» в заголовках, аннотациях, ключевых словах и в поле области исследования (Field of Study). Данные актуальны на 19.01.2023. Из них в 2018 году опубликовано 738 трудов конференций и 507 журнальных статей. В 2022 году — 1128 трудов конференций и 2904 статей. То, что число статей стало больше, чем трудов конференций указывает на стабилизацию интереса к теме «edge computing».

Распределение числа публикаций по областям исследований по классификации платформы The Lens представлено в таблице 1.

Таблица 1. Распределение числа публикаций за 2018—2022 годы по областям исследований.

Field of Study	Document Count
Computer science	13885
Edge computing	9552
Enhanced Data Rates for GSM Evolution	5510
Distributed computing	5464
Cloud computing	5221
Computer network	4663
Mobile edge computing	4212

³ <https://www.abs.gov.au/statistics/classifications/australian-and-new-zealand-standard-research-classification-anzsrc/latest-release> — Australian and New Zealand Standard Research Classification (ANZSRC)

⁴ <https://conferenceindex.org/search?query=edge+computing>

Server	3388
Artificial intelligence	3148
Operating system	2345
Edge device	1782
Telecommunications	1777
Energy consumption	1585

В данной таблице термин Energy consumption отражает область для оптимизации которой применяется Edge computing.

Согласно данным The Lens, абсолютное большинство публикаций представлено изданиями IEEE, на втором месте — Elsevier. Рецензируемые публикации данных издательств хорошо представлены в системе Scopus, что служит подтверждением обоснованности выбора данной системы для выявления примера актуальной задачи научных исследований по теме краевых вычислений для энергетики. В дальнейшем целесообразно проанализировать актуальные задачи краевых вычислений по публикациям издания IEEE, учитывая их доминирование в данной тематике и наличие открытого доступа к платформе IEEE Xplore, не ограничиваясь энергетикой как областью применения, а сконцентрировавшись, например, на выявлении используемых алгоритмов. Отправной точкой актуальности подобного исследования может служить тот факт, что запрос в GOOGLE: "edge computing" site: github.com, актуальный на 19.01.2023, выдал примерно 12500 результатов. А поиск в самой системе github дает 1080 записей в репозитории.

В дополнение к вышеприведенному анализу дадим ссылки и краткую аннотацию нескольких обзоров, качественно раскрывающих тематику краевых вычислений. В качестве примеров выбраны публикации с открытым доступом за 2021—2022 годы.

В обзоре [10.1016/j.dcan.2022.10.016] объясняется разница между тремя концепциями краевых технологий: краевые устройства, краевые вычисления и краевая аналитика. Кроме того, в статье обсуждается внедрение краевой аналитики для решения проблем и применения в различных областях: розничной торговле, сельском хозяйстве, промышленности и здравоохранении. Краевые технологии направлены на перенос части облачных вычислений в непосредственную близость к пограничным устройствам, то есть интеллектуальным устройствам, на которых формируются и потребляются данные. Эти устройства не могут выполнять продвинутое и сложные аналитические алгоритмы из-за таких причин, как малое энергообеспечение, небольшой объем памяти, ограниченные вычислительные ресурсы и т. д.

Целью статьи [10.1016/j.asej.2021.05.018] было исследование применения краевых вычислений в Smart Grid. Проведен всесторонний анализ проблем использования краевых вычислений в системе Prosumer Smart Grid. Подробно рассмотрены некоторые методы и методологии, раскрывающие работу системы Prosumer Smart Grid. Показано, что интеграция технологии Интернета вещей в интеллектуальные сети является важнейшим способом ускорения цифровизации энергосистемы и способствует эффективной работе ее инфраструктуры. Огромный объем данных — одна из самых больших проблем Интернета вещей. Чтобы решить эту проблему, краевые вычисления обрабатывают данные вблизи подключенных датчиков, где они собираются и обрабатываются.

Авторы публикации [10.1016/j.iot.2020.100346] провели систематическое исследование 98 статей, чтобы выяснить, какие атрибуты качества использовались в литературе для оценки систем Интернета вещей с использованием краевых вычислений.

Анализ показал, что поведение во времени и использование ресурсов являются наиболее часто используемыми атрибутами качества; кроме того, время отклика, время ожидания и потребление энергии являются наиболее используемыми метриками для количественной оценки этих атрибутов качества. Моделирование является основным инструментом, используемым для анализа, а рассмотренные параметры балансировки в основном связаны только с двумя атрибутами качества. Краевые вычисления могут способствовать улучшению систем Интернета вещей в отношении таких параметров, как энергопотребление, конфиденциальность и использование полосы пропускания. Однако выбор места для развертывания различных компонентов приложения — это непростая задача.

В статье [10.1016/j.adapen.2020.100006] представлен всеобъемлющий обзор междисциплинарных исследований по применению краевых вычислений в интеллектуальных сетях. Проведен глубокий анализ проблем краевых вычислений, включая определение архитектуры, характеристик и ключевых технологий, в плане требований к приложениям для интеллектуальных сетей. Кроме того, в данной работе систематически исследуются сценарии применения краевых вычислений в интеллектуальных сетях в зависимости от их характеристик. Оценивается синергетический эффект от интеграции краевых вычислений в интеллектуальные сети для достижения устойчивости системы. Авторы делают вывод, что краевые вычисления — это новая вычислительная парадигма, обладающая большим потенциалом для цифровизации интеллектуальных сетей.

Краевые вычисления и Интернет вещей представляют новую возможность применения методов машинного обучения для ограниченных в ресурсах встроженных устройств на границе сети. В статье [10.1016/j.jksuci.2021.11.019] авторы представили подробный обзор возможностей TinyML⁵, перечислили наборы инструментов для поддержки TinyML, перечислили ключевые факторы для улучшения систем TinyML, предоставили актуальную информацию о фреймворках для TinyML, определили ключевые проблемы и наметили будущую дорожную карту для решения ряда исследовательских задач TinyML.

Приведенный выше анализ публикаций показывает актуальность темы краевых вычислений для цифровизации интеллектуальных энергетических сетей. Анализ, проведенный в основной части данной статьи, направлен на выявление конкретной, актуальной задачи исследований в рамках обозначенной темы. В данной статье поиск актуальной задачи ограничен выявлением авторских ключевых слов, которыми можно описать данную задачу и на основе которых можно сформулировать запрос для сбора публикаций, показывающих как решается данная задача.

Материалы и методы

Для всестороннего исследования по выявлению и анализу актуальной задачи использования граничных вычислений в области энергетики и энерготехнологий необходимо провести сбор публикаций по различным источникам, включая, например, труды отраслевых конференций, патентов и т.д. В рамках данной статьи акцент сделан на демонстрации предлагаемого подхода по выявлению актуальной задачи научного исследования в стиле «подтверждение концепции» (proof of concept), поэтому ограничились только запросом к системе Scopus.

⁵ <https://www.tinyml.org/> — ultra-low power machine learning at the edge

Несмотря на то, что по запросу TITLE-ABS-KEY ("edge computing") только в 2022 году в Scopus было проиндексировано 6127 публикаций, сужение запроса до отрасли знаний SUBJTERMS (2102) сужает выборку до 630 документов. Чтобы сделать выборку более однородной, ограничимся публикациями на английском и их типами: статьи и доклады конференций. В итоге по запросу SUBJTERMS (2102) AND TITLE-ABS-KEY ("edge computing") AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "cp") OR LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE, "English")) были экспортированы библиометрические данные 553 публикаций, которые и составили выборку для дальнейшего анализа.

Результаты запроса актуальны на 15.12.2022.

Для проведения библиометрического анализа использовалась бесплатная программа VOSviewer [10.1007/s11192-009-0146-3], а для построения графиков — Scimago Graphica [10.3145/epi.2022.sep.02]. Также использовались утилиты для работы со строками и SQL запросами.

Основные характеристики выборки из 553 документов

Интересной особенностью данной выборки документов является то, что доминируют труды конференций — 438 публикаций, а журнальных статей только 115. Такое соотношение характерно для нарождающихся тем, когда исследователи стремятся быстрее заявить на конференциях о своей включенности в новую тематику, но прошло еще мало времени для получения данных, достаточных для написания статьи, да и сам процесс публикации может занимать существенное время.

Подтверждением сказанному может служить тот факт, что наибольшее число статей размещено в журналах издательства MDPI, известного оперативностью проведения рецензирования и публикации статей только в электронном виде. Бумажная печать задерживает выход статей. Журналы: *Energies* — 25 статьи, *Sustainability Switzerland* — 24 статьи. Далее идут труды конференций в основном проводимые IEEE. При этом доминируют работы китайских институтов: State Grid Corporation of China (16), Tsinghua University (14), China Electric Power Research Institute (12), Chinese Academy of Sciences (12), Zhejiang University (10). То, что State Grid Corporation of China — китайская электросетевая компания, являющаяся крупнейшей в данной отрасли в мире, лидирует по числу публикаций, указывает на важность рассматриваемой тематики для индустрии.

Основные темы 553 публикаций представлены в таблице 2.

Таблица 2. Распределение числа публикаций (N) в рабочей выборке по предметным областям (Subject area)

Subject area	N
Energy	553
Engineering	422
Computer Science	356
Mathematics	173
Decision Sciences	139
Physics and Astronomy	88
Social Sciences	75
Environmental Science	32
Materials Science	25

Все публикации в нашей выборке по данным Scopus относятся к области энергетики.

Доминируют инженерные задачи, компьютерные науки, математические и задачи принятия решения, что хорошо согласуется с запросом, включающим ключевой термин краевые вычисления (edge computing) и область исследования «Энергетика и энерготехнология»⁶ (SUBJTERMS 2102 Energy Engineering and Power Technology).

Тематику публикаций можно также описать ключевыми словами, результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3. 20 ключевых слов, наиболее часто встречаемых в публикациях согласно данным Scopus

KEYWORD	N
Edge Computing	404
Internet of Things	179
Electric Power Transmission Networks	83
Smart Power Grids	64
Deep Learning	60
Mobile Edge Computing	60
Energy Utilization	58
Digital Storage	57
Smart City	51
Data Handling	46
Cloud Computing	44
Energy Efficiency	41
5G Mobile Communication Systems	39
Fog Computing	39
Machine Learning	39
Network Architecture	39
Computer Architecture	38
Quality of Service	38
Smart Grid	36
IoT	35

Следует учитывать, что в системе Scopus поле Keywords включает как авторские, так и индексные ключевые слова. В файлах Scopus_exported_refine_values приводятся сводные данные по полученной выборке, поэтому данные, приведенные в таблице 3 можно трактовать как то, что Scopus относит 404 публикаций как преимущественно относящиеся к категории Edge Computing, 179 к Internet of Things и т.д.

Термин Edge Computing встречается 186 раз в заголовках 553 публикаций, 384 раза в аннотациях, 242 раз в авторских ключевых словах и 52 раза в индексных ключевых словах.

В целом, ключевые слова, представленные в таблице 3, хорошо отражают тематику нашей выборки. Термины: Edge Computing, Internet of Things, Electric Power Transmission Networks, Smart Power Grids, Mobile Edge Computing, Data Handling, Cloud Computing отражают инженерную сторону рассматриваемой темы. Energy Utilization, Energy Efficiency — наряду с Smart Power Grids и Smart City, говорят что публикации относятся к области энергетики, а Deep Learning, Machine Learning — характеризуют основные методы анализа. Социально-экономический аспект исследований отражен в термине Quality of Service.

⁶ Перевод Energy Engineering and Power Technology как Энергетика и энерготехнология дан по Scopus

По числу публикаций доминируют страны с технологически развитой промышленностью, или страны, не имеющие достаточных природных ресурсов: China (260), United States (63), India (51), Italy (24), United Kingdom (20), South Korea (17), Germany (13), Japan (13), Taiwan (13). Россия занимает в этом списке 26 место, находясь с четырьмя публикациями между Австралией, Ираком и Сингапуром. Такое положение можно объяснить тем, что значительная часть результатов российских исследований печатается на русском языке, и тем, что исследования по оптимизации энергопотребления не столь активно продвигаются на политическом уровне в сравнении со странами имеющими развитый технологический сектор и дефицит энергоресурсов. Все это хорошо понимают, но мотивация не столь выражена, как например в Китае и Европе.

Сказанное подтверждается списком фондирующих организаций, представленных в таблице 4.

Таблица 4. Список ведущих фондирующих организаций для рассматриваемой выборки публикаций согласно данным Scopus.

FUNDING SPONSOR	N
National Natural Science Foundation of China	65
National Key Research and Development Program of China	22
Fundamental Research Funds for the Central Universities	14
Horizon 2020 Framework Programme	14
National Science Foundation	11
European Commission	10
State Grid Corporation of China	9
Bulgarian National Science Fund	8
National Research Foundation of Korea	7
Science and Technology Project of State Grid	7
Ministry of Science and ICT, South Korea	6
Deutsche Forschungsgemeinschaft	5
Ministry of Education and Science	5
Ministry of Science and Technology, Taiwan	5
Special Project for Research and Development in Key areas of Guangdong Province	5
European Regional Development Fund	4

Из вышеприведенной таблице следует, что исследования в области краевых вычислений для задач энергетики в основном финансируются китайскими и европейскими организациями. Далее следуют южнокорейские и тайваньские структуры. Отметим, что данные поля FUNDING SPONSOR следует рассматривать как оценочные ввиду его не системной заполняемости.

Результаты исследования

В данном исследовании мы ограничимся выявлением перспективной задачи исследования только по авторским ключевым словам. Как указывалось выше, термин Edge Computing встречается 242 раз в авторских ключевых словах и 52 раза в индексных ключевых словах.

Использование текстов заголовков и аннотаций требует их предобработки, т.е. формирования набора слов, по которым будет проводится дальнейший анализ (например,

в виде bag of words). Данную работу целесообразнее провести в рамках отдельного исследования.

Для выявления тематик исследований на основе анализа ключевых слов по их совместной встречаемости использовалась программа VOSviewer. Чтобы показать непредвзятость нашего выбора, сравним частоту использования программ, аналогичных нами выбранной.

Учитывая, что Scopus стал недоступен в январе 2023 года, оценка частоты использования программ для библиометрических исследований проведена на открытом ресурсе ScienceDirect. Так, за 2021—2022 годы программа VOSviewer использовалась в 1540 публикациях, CiteSpace — 903, а Bibliometrix в 458 публикациях.

Для авторских ключевых слов характерно различное написание близких по смыслу терминов, что существенно сказывается на их кластеризации на основе совместной встречаемости. Поэтому VOSviewer использовалась в нескольких итерациях. На первом этапе выявлялись термины с различным написанием, далее составлялся список приведения разного написания терминов к базовой форме. Итоговый список включал 33 замены. Приведем некоторые примеры замен: edge calculation → edge computing; edge devices → edge device; fault location → fault detection; internet-of-things → internet of things.

Второй особенностью авторских ключевых слов является их относительное разнообразие. Так, в нашей выборке (без проведения замены) из 2639 общего числа терминов уникальными являлись 1794 ($2639/1794=1,47$). Приведение написания терминов к нижнему регистру оставляет только 1616 уникальных авторских ключевых слов ($2639/1616=1,63$). В то время как для индексных ключевых слов: общее число терминов → 8662, а уникальных → 4140 ($8662/4140=2,09$). Использование списка замены снижает число авторских ключевых слов, по которым проводится их кластеризация до 1585 терминов. Т.е. снижение происходит не на 33 термина, а только на 31, что объясняется вложенностью терминов, например iiot → industrial iot и iot → internet of things.

Существенное разнообразие ключевых авторских слов, наряду с их небольшим количеством в данной выборке, приводит к формированию большого числа кластеров при параметрах по умолчанию в VOSviewer. Исходя из личного опыта, желательно иметь выборку из нескольких тысяч библиометрических записей, еще лучше несколько десятков тысяч записей. Это приводит к большему числу терминов, преодолевающих заданный порог встречаемости, и получаются кластеры с большим числом терминов.

В нашем случае мы имеем только 553 записи. Из 1616 авторских ключевых слов, содержащихся в них, только 46 встречаются чаще пяти раз и 219 чаще двух раз. Без ограничения минимального числа терминов в кластере VOSviewer дает 22 кластера, некоторые из которых содержат всего несколько терминов.

Поэтому минимальное число терминов в кластере было выбрано равным 30, при этом получено 4 кластера, общая картина которых представлена на рисунке 1.

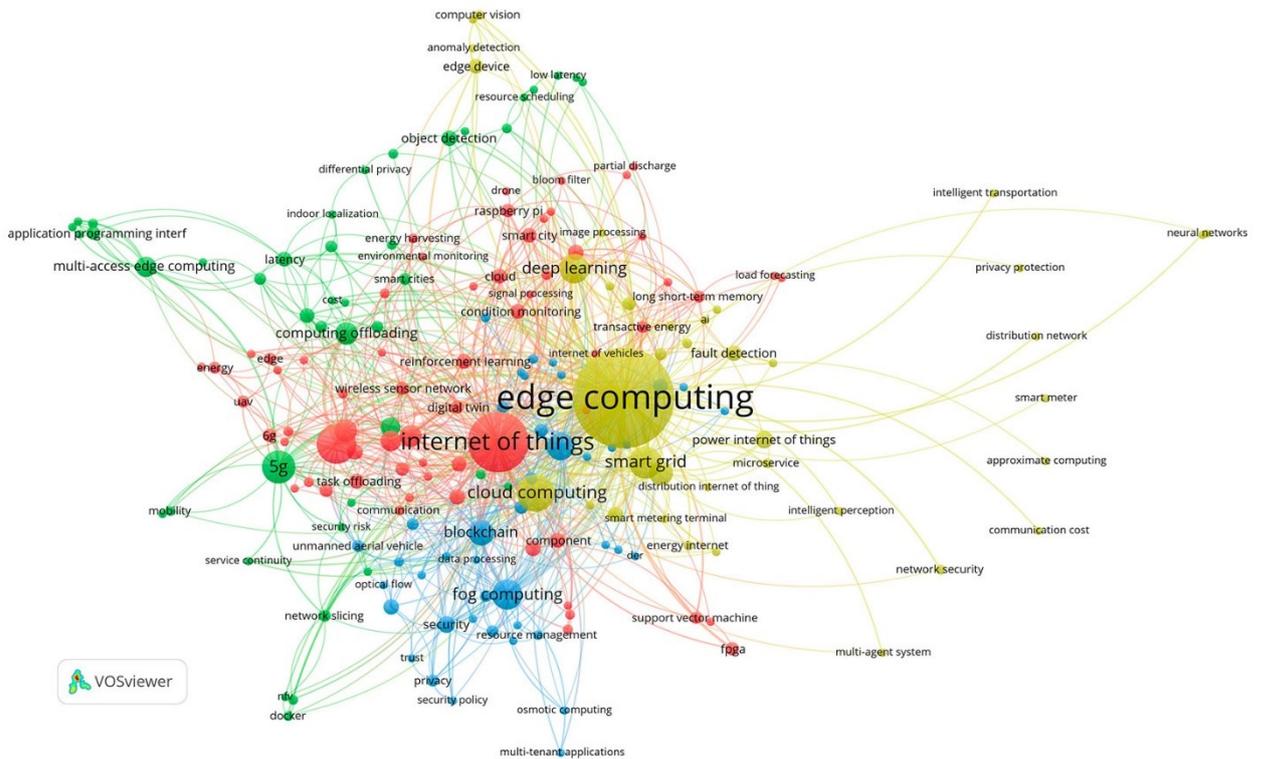


Рис. 1. Кластеризация совместной встречаемости авторских ключевых слов, полученная для выборки из 553 библиометрических записей с учетом перечисленных выше ограничений.

Пять наиболее часто встречаемых термина первого кластера (красный, терминов в кластере 65): *internet of things* (101), *mobile edge computing* (43), *resource allocation* (14), *artificial intelligence* (13), *industrial iot* (12).

Пять наиболее часто встречаемых термина второго кластера (зеленый, терминов в кластере 43): *5g* (30), *computing offloading* (14), *multi-access edge computing* (12), *mc* (11), *object detection* (7), *energy consumption* (6).

Пять наиболее часто встречаемых термина третьего кластера (синий, терминов в кластере 42): *fog computing* (25), *machine learning* (21), *blockchain* (18), *security* (8), *cyber-physical system* (7).

Пять наиболее часто встречаемых термина четвертого кластера (хаки, терминов в кластере 38): *edge computing* (276), *cloud computing* (39), *smart grid* (29), *deep learning* (24), *cloud-edge system* (16).

Из приведенного списка видно, что кластеры сопоставимы по числу входящих в них терминов.

Первый кластер относится к интернету вещей (индустриальному интернету вещей), краевым вычислениям в мобильных устройствах, распределению ресурсов и искусственному интеллекту.

Второй к — 5g, вычислительной перегрузке, мультимедийным краевым вычислениям, обнаружению объектов и энергопотреблению.

Третий к — туманным вычислениям, машинному обучению, блокчейну, безопасности, киберфизическим системам. Это, пожалуй, наиболее интересный кластер, отражающий новую тему, дополнительную к исследуемому нами вопросу краевых вычислений в энергетике и требующей отдельного исследования.

Координаты диаграммы: средний год публикации документов, в которых встречается ключевое слово (score<Avg. pub. year>) и среднее нормализованное количество цитирований, полученных документами, в которых встречается ключевое слово (score<Avg. norm. citations>). Размер пузырька — количество документов, в которых встречается ключевое слово (weight<Occurrences>). Для облегчения воспроизведения результатов, надписи на графике соответствуют названию полей таблиц, экспортируемых их программы VOSviewer. Принадлежность термина кластеру выделена цветом. График построен с использованием программы SCImago Graphica.

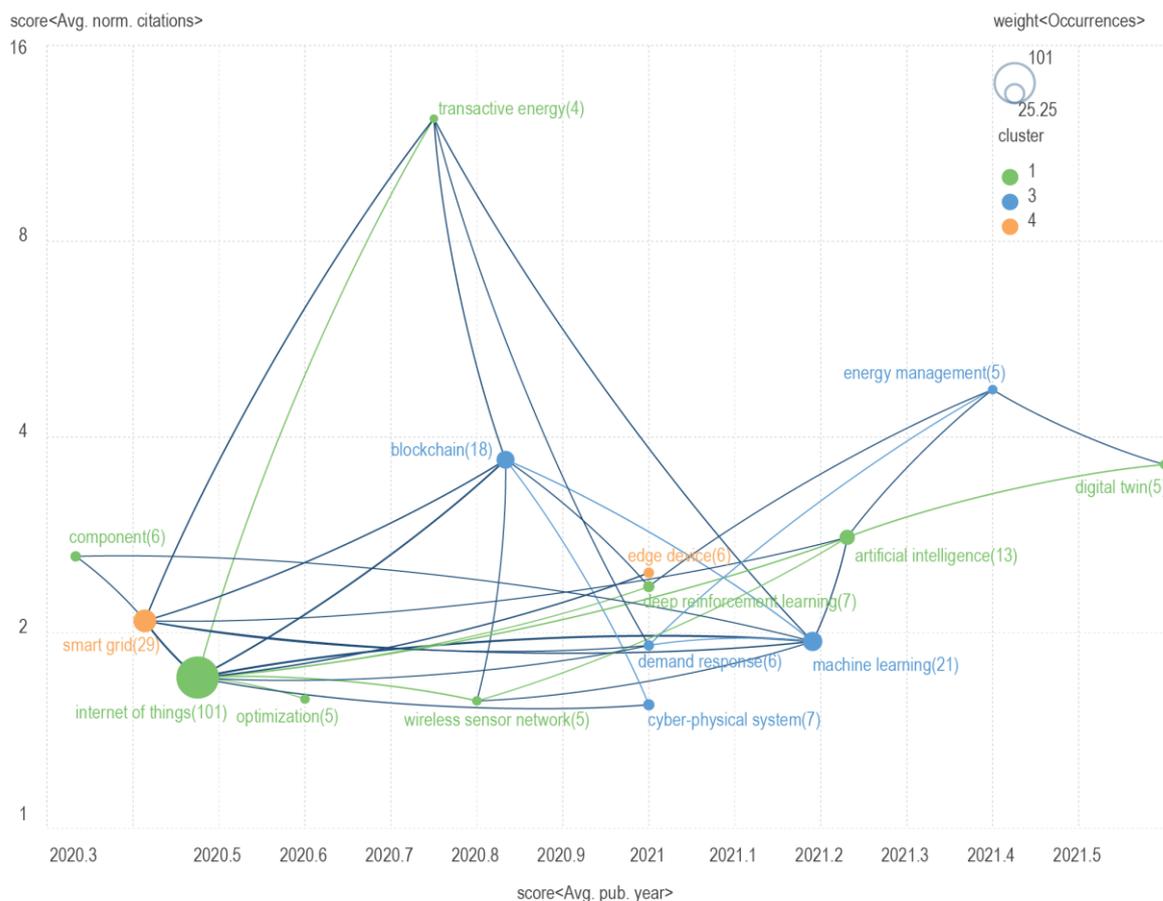


Рис. 3. Пузырьковая диаграмма наиболее часто встречаемых терминов в координатах средний год публикации → средняя нормализованная цитируемость

Из приведенного графика видно, что термин «transactive energy» является высоко цитируемым и располагается близко к середине временной оси.

Термин transactive energy 36 раз встречается в 12 библиометрических записях (статьях). При этом, в авторских ключевых словах только 4 раза. Причем две из них опубликованы в 2022 году, но уже имеют высокую цитируемость — 17 [10.1016/j.ijepes.2021.107510] и 6 [10.3390/en15051908] раз. В индексных ключевых словах термин transactive energy встречается 3 раза, в трех аннотациях, в 9 списках литературы и один раз в названии конференции. Частая встречаемость термина в списках литературы указывает на то, что для публикаций с этим термином можно построить исследовательский фронт⁷.

⁷ <https://esi.help.clarivate.com/Content/research-fronts.htm> — A research front is a cluster of highly cited papers over a five-year period --referred to as "core papers"-- in a specialized topic defined by a cluster analysis

Учитывая высокую цитируемость работ, содержащих термин «transactive energy», его можно рассматривать как описывающий актуальную задачу в рамках темы использования краевых вычислений для инженерных задач энергетики.

Еще в большей степени это касается термина edge computing, входящего в запрос к Scopus. Данный термин встречается в списках литературы 358 публикаций из нашей выборки и аннотациях 401 публикации.

После того как мы выявили, что термин transactive energy может отражать перспективную задачу исследования для темы edge computing, целесообразно кратко проанализировать библиометрические данные 12 публикаций, содержащих термин transactive energy. Программа VOSviewer, как и ранее, была использована для кластеризации авторских ключевых слов (всего 72 термина) этих публикаций. Четыре кластера были получены при минимальном числе терминов в кластере равным 10. Общая картина встречаемости и связанности авторских ключевых слов для данных публикаций представлена на рисунке 4.

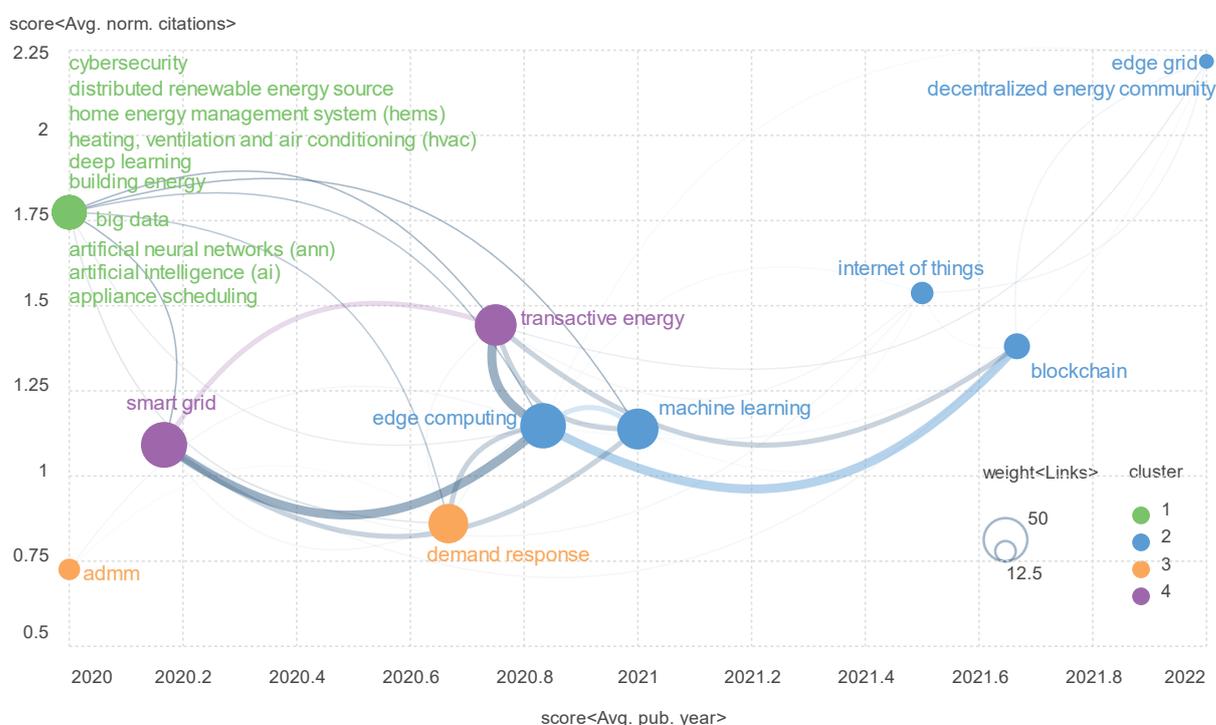


Рис. 4. Картина встречаемости и связанности основных авторских ключевых слов публикаций, содержащих термин transactive energy в своих библиометрических данных.

На данном рисунке размер пузырька пропорционален числу связей между терминами.

Согласно рисунку, в рамках одного кластера термин transactive energy наиболее связан с термином smart grid. И наиболее связан с терминами голубого кластера: edge computing и machine learning. Указанная связь логична и не требует дальнейшего обсуждения. Интерес представляет термин demand response (управление спросом), отражающий конечную цель применения edge computing для transactive energy.

Полученная диаграмма позволила выявить нарождающийся интерес (термины относятся к 2022 году) к задачам edge grid и decentralized energy community. Это согласуется с общим трендом указывающим на то, что цифровизация, ввиду возросших вычислительных возможностей, позволяет перенести опыт больших систем на больших масштабах, на большие системы локальных масштабов (периферийные/краевые сети

местных сообществ). По мнению автора данной статьи, масштабирование достижений, которые ранее были возможны только для задач государственного или регионального масштабов, на уровень местных сообществ, является одной из самых интересных сторон цифровизации. То же самое можно сказать и про корпоративный сектор, то, что ранее было доступно только крупным предприятиям, благодаря цифровизации становится доступным более мелким.

Чтобы конкретизировать актуальность использования краевых вычислений для транзактивной энергетики, в следующем разделе даны краткие аннотации ряда публикаций, детально отражающих данную тему.

Анализ публикаций

Энергетический Интернет обеспечивает безопасное соединение и взаимодействие между энергосистемой и Интернетом. В статье [10.1109/IIOT.2018.2805899] авторы рассматривают архитектуру Энергетического Интернета на основе туманных вычислений (fog-based) для транзактивных систем управления энергией. Предлагаемая конструкция состоит из трех различных уровней. Домашние шлюзы собирают данные об энергопотреблении клиентов и обеспечивают необходимый интерфейс между клиентами и энергосистемой. Fog-узлы действуют как сервер розничного рынка энергии, который предоставляет энергетические услуги конечным пользователям.

В предлагаемой системе в периоды пиковой нагрузки потребители предпочитают покупать энергию друг у друга, а не у энергосистемы.

В данной статье термин «edge computing» встречается в индексных ключевых словах, что по смыслу соответствует тексту статьи, например, встречаясь во фразе: «data are locally analyzed by the fog edge node». Термин «transactive energy» встречается в тексте статьи 18 раз и отражает основной предмет публикации.

Транзактивные энергетические системы (Transactive Energy Systems) используют экономические и регулирующие механизмы для динамического балансирования спроса и предложения во всей электрической сети. Учитывая широкое использование цифровых устройств, активы в транзактивной среде уязвимы к киберугрозам. В работе [10.1109/TSG.2019.2928168] авторами изучено влияние кибер-атак на работу транзактивных энергосистем с помощью прокси-атак, смоделированных на тестовой системе.

Термин «transactive energy» напрямую отражен в аннотации данной статьи. Термин «edge computing» встречается в контексте: «Emerging transactive control paradigms depend on a large number of distributed **edge-computing** and Internet of Things (IoT) devices making autonomous/semi-autonomous decisions on energy consumption and demand response» (Перевод вышеприведенного контекста: Зарождающиеся парадигмы транзактивного управления зависят от большого количества распределенных **граничных вычислительных** устройств и устройств Интернета вещей (IoT), принимающих автономные/полуавтономные решения по потреблению энергии и реагированию на спрос.)

Оценка интеллектуальной энергосистемы при наличии динамического рыночного ценообразования и сложных сетей производителей, потребителей и дистрибьюторов является очень сложной задачей. Поскольку датчики и вычисления становятся все более распределенными на граничных устройствах, кибербезопасность критически важной инфраструктуры энергосистемы становится все более актуальной. В статье [10.1109/MSCPES.2016.7480218] описывается открытая платформа, которая обеспечивает

согласованную среду для интегрированного моделирования транзакционной энергии в интеллектуальных сетях.

Термины «edge computing» и «transactive energy» напрямую отражают содержание данной статьи.

Общее потребление энергии зданиями и транспортом составляет более 70% в глобальном конечном потреблении энергии, но возобновляемые источники энергии удовлетворяют лишь менее 20% потребности. Здания и электромобили обладают значительным потенциалом, позволяющим оптимизировать и сбалансировать спрос и предложение благодаря их сквозному транзакционному поведению для обеспечения полноценной эксплуатационной гибкости. Интернет вещей как фундаментальная архитектура обеспечивает цифровизацию и совместимость транзактивной энергетики. Краевые вычисления облегчают работу блокчейна и ускоряют его внедрение. В статье [10.1016/j.ijerps.2021.107510] представлен обзор известных в настоящее время проектов и стартапов в области транзактивной энергетики с использованием зданий и электромобилей для местного сообщества.

Термины «edge computing» и «transactive energy» напрямую отражают содержание данной статьи.

Парадигма транзактивной энергетики (ТЭ) на уровне розничной торговли/распределения обретает конкретные очертания. Устройства, находящиеся на границе сети, и потребители становятся "транзактивными" агентами на рынке электроэнергетики. Можно провести параллели между дерегулированием сектора оптовой торговли в середине 1990-х годов и открытостью распределительной сети для этих новых участников. В статье [10.1109/ISGT.2016.7781236] рассматривается ряд инструментов и методов, разработанных для оптовых транзактивных бирж, которые, с некоторыми изменениями, могут быть применены к операциям ТЭ.

Термины «edge computing» и «transactive energy» напрямую отражают содержание данной статьи.

Потребление энергии в зданиях составляет значительную долю от общего потребления энергии в мире, поэтому значительная экономия энергии может быть достигнута за счет мониторинга электрической нагрузки в жилых помещениях. В статье [10.1080/15325008.2020.1834019], представлен обзор современного мониторинга электрической нагрузки в жилых помещениях. В отличие от предыдущих обзоров, особое внимание уделяется подробному обсуждению технических проблем и методов мониторинга нагрузки, включая неинтрузивный⁸ мониторинг нагрузки (NILM). Авторы анализируют возможные тренды в развитии умных домов и сетей.

Термины «edge computing» и «transactive energy» напрямую отражают содержание данной статьи.

Развитие интеллектуальных сетей способно принести значительные положительные изменения в секторах производства, передачи и распределения энергии. Необходимо адекватное управление колебаниями потребностей в энергии. По мнению авторов работы [10.3390/en13205460] этого можно достичь путем реализации концепции транзактивной энергетики. В работе предлагается масштабируемая бессерверная архитектура (Smart

⁸ <https://www.jsdrm.ru/jour/article/view/866/778> Кузьмин П.С. НЕИНТРУЗИВНЫЙ МОНИТОРИНГ НАГРУЗКИ: ЭФФЕКТЫ ВНЕДРЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ. Стратегические решения и риск-менеджмент. 2019;10(4):306-319. <https://doi.org/10.17747/2618-947X-2019-4-306-319>

Meter Upgradeability SG-AMI), основанная на туманных и краевых вычислениях (fog-edge computing), и реализации модели "функция как услуга" (FaaS).

Термины «edge computing» и «transactive energy» напрямую отражают содержание данной статьи.

Авторы статьи [10.3390/en15051908] определяют Интернет транспортных средств (IoV) как место, где люди, парки электромобилей, инженерные службы, электросети, коммуникационные и вычислительные инфраструктуры связаны между собой. В качестве примера авторы рассматривают использование краевых и облачных вычислений в системе зарядки электромобилей для решения проблемы высокого спроса на зарядные станции в часы пик. Авторы полагают, что предложенные ими методы могут помочь управляющим компаниям в проектировании и обеспечении стабильной работы сетей зарядки.

В этой работе термины «edge computing» и «transactive energy» используются в следующем контексте:

«...due to the proximity of **edge computing** infrastructures to EVs, real-time IoV services can be supported» (...благодаря близости **граничных вычислительных** инфраструктур к EV, можно поддерживать услуги IoV в режиме реального времени)

«It is essential to develop an open-source testbed for blockchain-based **transactive energy** to fully understand its potential benefits and pitfalls under real-world scenarios» (Важно разработать тестовую платформу с открытым исходным кодом для блокчейн-технологии **транзактивной энергетики**, чтобы полностью понять ее потенциальные преимущества и подводные камни в реальных сценариях.)

Авторы работы [10.1109/NAPS.2018.8600639] полагают, что реакция на спрос и активное участие конечных потребителей будут играть важную роль в электросетях. Для динамического балансирования спроса и предложения в электрической сети целесообразно использовать транзактивные энергетические системы (Transactive Energy Systems (TES)). Учитывая широкое использование цифровых устройств, TES уязвимы к различным угрозам. В работе используется метод машинного обучения для обнаружения возможных аномалий в рамках транзактивной энергетической системы.

Термин «transactive energy» напрямую отражен в аннотации данной статьи.

Контекст термина «edge computing» повторяет приведенный в предыдущей статье.

Эти две публикации очень близки по содержанию и составу авторов. Их можно рассматривать как две части одного исследования.

Авторами публикации [10.1109/NAPS50074.2021.9449802] описывается разработка чипа Cryptographic Trust Center (CTC), интегрированного в краевые устройства сети (**grid-edge devices**) для создания единого управления криптографическими ключами. Результаты показали, что этот подход может устранить ряд пробелов кибербезопасности в распространенных блокчейн-системах, таких как Hyperledger Fabric. Менеджеры по продукции, разработчики энергетических систем и архитекторы безопасности могут использовать такую модульную структуру для управления распределенными устройствами различных производителей, сроков изготовления.

Термин «edge devices» отражен в аннотации данной статьи. Термин «transactive energy» отражен в названии статьи.

Дадим результирующее описание исследований, представленных в выше прореферированных 11 статьях.

Транзактивные энергетические системы (ТЭС) используют экономические и регулирующие механизмы для балансировки спроса и предложения в электрической сети. Механизм управления зависит от большого количества распределенных устройств

краевых вычислений и Интернета вещей. ТЭС могут иметь уязвимости и подвержены кибер-атакам. Необходимы новые методы для постоянного мониторинга работы этих систем и обнаружения вредоносной активности. Энергопотребление зданий составляет значительную долю от общего мирового энергопотребления, и ожидается, что значительная экономия может быть достигнута за счет мониторинга нагрузки в жилых домах. Координация взаимодействия между умными приборами в домах и системой управления энергопотреблением может стать наиболее перспективной темой в ближайшем будущем. Еще одной областью использования краевых вычислений в задачах транзактивной энергетики может стать Интернет транспортных средств – платформа взаимодействия водителей, парков электромобилей, инженерных служб и электросетей.

Чтобы подтвердить высказанный выше тезис, что часть российских публикаций относится к рассматриваемой теме, но не входит в Scopus, приведем конкретный пример статьи содержащей термин «transactive energy». Авторами статьи [19] «рассмотрены идущие в мире процессы трансформации электроэнергетических систем, которые приводят к коренным изменениям в мировой энергетике, и задачи, стоящие перед российской электроэнергетикой в этих условиях.» — цитата из аннотации. Журнал входит в список ВАК и индексируется РИНЦ, но не входит в Scopus и Web of Science.

На платформе elibrary.ru по запросу «краевые вычисления» с учетом морфологии в журнальных статьях найдено 11 публикаций, а по запросу «транзактивная энергетика» — одна статья, и одна статья по запросу «транзактивная энергия». Из этих результатов следует, что российские авторы знакомы с тематикой применения краевых вычислений в энергетике, но внимание к данной теме существенно ниже, чем у зарубежных авторов.

Выводы

Из результатов обзора литературы следует, что краевые технологии направлены на то, чтобы приблизить часть вычислительной мощности облака к конечным устройствам, на которых генерируются данные. Такие устройства не могут выполнять сложные вычисления из-за их низкой мощности, малого объема памяти, ограниченных вычислительных ресурсов и т. д. В рамках Интернета вещей они предоставляют новую возможность применения методов машинного обучения к встроенным устройствам с ограниченными ресурсами. Краевые вычисления могут помочь улучшить системы Интернета вещей в отношении таких важных качественных характеристик, как энергопотребление, конфиденциальность и использование полосы пропускания.

Выявлена актуальная задача научных исследований, которую можно сформулировать как «краевые вычисления для транзактивной энергетики».

Анализ публикаций, содержащих термины "краевые вычисления" и "транзактивная энергетика" показал следующие ключевые аспекты их содержания.

Потребление энергии в зданиях составляет значительную долю от общего мирового потребления энергии, и ожидается, что значительная экономия может быть достигнута за счет мониторинга электрической нагрузки в жилых домах.

Здания и электромобили обладают значительным потенциалом для балансировки спроса и предложения благодаря их сквозному транзакционному поведению.

Транзактивные энергетические системы используют экономические и регулятивные механизмы для динамического балансирования спроса и предложения в электрической сети.

Потребители предпочитают покупать энергию друг у друга в пиковые моменты, а не у сети.

Датчики и вычисления все больше распространяются на периферийные устройства, кибербезопасность критической инфраструктуры энергосистемы становится все более важной.

Краевые устройства и потребители становятся "транзактивными" участниками рынка электроэнергетики.

Из-за широкого использования цифровых устройств активы в транзактивной среде уязвимы к киберугрозам.

Интернет транспортных средств — платформа взаимодействия водителей, парков электромобилей, коммунальных служб и электросетей может стать еще одним применением краевых вычислений в задачах транзактивной энергетики.

В последних публикациях внимание уделяется вопросам краевых сетей и формированию децентрализованных энергетических сообществ.

Литература

1. Nayak S. et al. A review on edge analytics: Issues, challenges, opportunities, promises, future directions, and applications // *Digital Communications and Networks*. 2022. P. S2352864822002255.
2. Ben Slama S. Prosumer in smart grids based on intelligent edge computing: A review on Artificial Intelligence Scheduling Techniques // *Ain Shams Engineering Journal*. 2022. Vol. 13, № 1. P. 101504.
3. Ashouri M., Davidsson P., Spalazzese R. Quality attributes in edge computing for the Internet of Things: A systematic mapping study // *Internet of Things*. 2021. Vol. 13. P. 100346.
4. Feng C. et al. Smart grid encounters edge computing: opportunities and applications // *Advances in Applied Energy*. 2021. Vol. 1. P. 100006.
5. Ray P.P. A review on TinyML: State-of-the-art and prospects // *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*. 2022. Vol. 34, № 4. P. 1595–1623.
6. van Eck N.J., Waltman L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping // *Scientometrics*. 2010. Vol. 84, № 2. P. 523–538.
7. Hassan-Montero Y., De-Moya-Anegón F., Guerrero-Bote V.P. SCImago Graphica: a new tool for exploring and visually communicating data // *EPI*. 2022. P. e310502.
8. Wu Y. et al. Decentralized transactive energy community in edge grid with positive buildings and interactive electric vehicles // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2022. Vol. 135. P. 107510.
9. Rimal B. et al. Smart Electric Vehicle Charging in the Era of Internet of Vehicles, Emerging Trends, and Open Issues // *Energies*. 2022. Vol. 15, № 5. P. 1908.
10. Yaghmaee Moghaddam M.H., Leon-Garcia A. A fog-based internet of energy architecture for transactive energy management systems // *IEEE Internet Things J*. 2018. Vol. 5, № 2. P. 1055–1069.
11. Zhang Y. et al. Cyber Physical Security Analytics for Transactive Energy Systems // *IEEE Trans. Smart Grid*. 2020. Vol. 11, № 2. P. 931–941.
12. Neema H. et al. C2WT-TE: A model-based open platform for integrated simulations of transactive smart grids // *2016 Workshop on Modeling and Simulation of Cyber-Physical Energy Systems (MSPES)*. Vienna, Austria: IEEE, 2016. P. 1–6.
13. Rahimi F., Albuyeh F. Applying lessons learned from transmission open access to distribution and grid-edge Transactive Energy systems // *2016 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*. Minneapolis, MN: IEEE, 2016. P. 1–5.

14. Yuan X. et al. Residential Electrical Load Monitoring and Modeling – State of the Art and Future Trends for Smart Homes and Grids // *Electric Power Components and Systems*. 2020. Vol. 48, № 11. P. 1125–1143.
15. Albayati A. et al. A Serverless Advanced Metering Infrastructure Based on Fog-Edge Computing for a Smart Grid: A Comparison Study for Energy Sector in Iraq // *Energies*. 2020. Vol. 13, № 20. P. 5460.
16. Rimal B. et al. Smart Electric Vehicle Charging in the Era of Internet of Vehicles, Emerging Trends, and Open Issues // *Energies*. 2022. Vol. 15, № 5. P. 1908.
17. Arman A. et al. Cyber physical security analytics for transactive energy systems using ensemble machine learning // 2018 North American Power Symposium (NAPS). Fargo, ND: IEEE, 2018. P. 1–6.
18. Saha S.S. et al. Integrating Hardware Security into a Blockchain-Based Transactive Energy Platform // 2020 52nd North American Power Symposium (NAPS). Tempe, AZ, USA: IEEE, 2021. P. 1–6.
19. Есяков С.Я., Лунин К.А., Стенников В.А., Воропай Н.И., Редько И.Я., Баринов В.А. Трансформация электроэнергетических систем // *Электроэнергия. Передача и распределение*. №4(55). ID:39221540. 2019. С.134-141.

Чигарев Борис Николаевич, к.ф.-м.н., ведущий инженер по научно-технической информации Аналитического центра энергетической политики и безопасности Института проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия. ORCID: 0000-0001-9903-2800, E-mail: bchigarev@ipng.ru.

Ключевые слова: краевые вычисления, цифровизации энергетики, транзактивная энергетика, библиометрический анализ, Scopus.

Boris Chigarev, Ph.D. in Physics and Mathematics, Leading Engineer for Scientific and Technical Information, Analytical Center for Energy Policy and Security, Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. ORCID: 0000-0001-9903-2800, E-mail: bchigarev@ipng.ru

Keywords: edge computing, digitalization of energy, transactive energy, bibliometric analysis, Scopus.

Edge Computing for Energy Digitization. Analytical Review

Abstract

This paper is dedicated to the identification of the current research problem within the topic "Edge Computing for Energy Digitization". The relevance of Edge Computing to energy challenges is demonstrated by a brief bibliometric analysis of data from the following platforms: Scopus, dimensions.ai, IEEE Xplore, The Lens. The dominant application of edge computing is the digitization of smart energy networks. Edge technologies aim to move some of the cloud computing closer to the edge devices that generate the raw data. Edge computing can help improve energy consumption, privacy, and bandwidth utilization of IoT systems. Research on edge computing for energy problems is mainly funded by Chinese and European organizations. In this paper, the identification of the promising research problem was done only by author keywords. According to the analysis of publications in Scopus, a promising application of edge computing is transactional energy, which uses economic and regulatory mechanisms to dynamically balance supply and demand in the electricity grid. An emerging trend is the topic of edge energy networks and the formation of decentralized energy communities.