УДК 004.8:621.311

Алджаф Шуан Мохаммед Абдулваххаб, аспирант
(ЮФУ, г. Таганрог)
Shwan M. A. Aljaf, postgraduate student
(SFedU, Taganrog)

ЦЕНТРЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ КАК ГИБКИЙ ПОТРЕБИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ: ПОТЕНЦИАЛ УПРАВЛЕНИЯ СПРОСОМ И РОЛЬ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

DATA CENTRES AS FLEXIBLE ELECTRICITY CONSUMERS: DEMAND RESPONSE POTENTIAL AND THE ROLE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS

Аннотация: Электропотребление центров обработки данных рассмотрено как ресурс гибкости энергосистемы. Выделены три механизма: перенос откладываемых задач во времени, перераспределение нагрузки между площадками и накопители энергии. Показана роль прогнозирования цен и оптимизационного планирования.

Abstract: The electricity use of data centres is treated as a flexibility resource for the power system. Three mechanisms are described: time shifting of deferrable jobs, moving load between sites, and energy storage. The role of price forecasting and optimisation-based scheduling is shown.

Введение.

Цифровизация экономики и быстрое распространение систем искусственного интеллекта превратили центры обработки данных (ЦОД) в одну из наиболее быстро растущих групп потребителей электроэнергии. По оценке Международного энергетического агентства, в 2024 г. ЦОД потребили около 415 ТВт·ч, что составляет примерно 1,5 % мирового электропотребления, а к 2030 г. их потребление может более чем удвоиться, до порядка 945 ТВт·ч [1]. В отдельных странах доля ЦОД уже заметно выше среднемировой: в США, по данным Национальной лаборатории им. Лоуренса в Беркли, потребление ЦОД в 2023 г. достигло 176 ТВт·ч, или 4,4 % национального электропотребления, а сценарная оценка на 2028 г. составляет от 325 до 580 ТВт·ч, то есть от 6,7 до 12,0 % [2].

Для энергосистемы такой рост означает появление крупных сосредоточенных нагрузок, требующих сетевой инфраструктуры и генерирующих мощностей. Вместе с тем ЦОД отличается от большинства промышленных потребителей тем, что значительная часть выполняемой в нём работы допускает смещение во времени и в пространстве без ущерба для конечного

результата. Это делает ЦОД потенциальным участником управления спросом, если гибкость нагрузки удаётся выявить и спрогнозировать заранее.

В статье систематизированы механизмы, посредством которых ЦОД может выступать гибким потребителем электроэнергии, и показана роль методов искусственного интеллекта в их реализации.

Структура электропотребления ЦОД.

Электроэнергия, потребляемая ЦОД, расходуется на ИТ-оборудование (серверы, системы хранения данных, сетевое оборудование) и на инженерную инфраструктуру, то есть на охлаждение, преобразование и резервирование электропитания. Соотношение этих составляющих характеризуется коэффициентом эффективности использования энергии PUE, равным отношению полного электропотребления объекта к потреблению ИТ-оборудования. По данным ежегодного отраслевого обследования Uptime Institute, среднее значение PUE в 2024 г. составило 1,56 [3]. При таком значении около 36 % электроэнергии объекта расходуется вне ИТ-оборудования. Снижение PUE давно служит основным способом повышения энергоэффективности. Оно уменьшает объём потребления, но гибкости ему не добавляет.

Гибкость возникает из характера самой вычислительной нагрузки. Её можно условно разделить на две части. Интерактивная нагрузка (веб-сервисы, обработка запросов пользователей, транзакционные системы) чувствительна к задержке и должна обслуживаться в момент поступления запроса. У пакетной нагрузки (обучение моделей машинного обучения, аналитическая обработка данных, резервное копирование, рендеринг) есть допустимый срок завершения, который может составлять часы или сутки. Именно пакетная, откладываемая нагрузка образует основной ресурс управления спросом.

Механизмы гибкости.

Первый механизм состоит в переносе откладываемой нагрузки во времени: задачи с допустимым сроком завершения выполняются в часы низкой цены электроэнергии или низкой углеродной интенсивности генерации. Промышленный пример такого переноса даёт система углеродно-ориентированного управления вычислениями компании Google. На основе прогнозов углеродной интенсивности на следующие сутки и прогнозов спроса для каждого кластера в ней формируются «виртуальные кривые мощности», ограничивающие почасовой объём ресурсов для гибких задач при сохранении суточного объёма. В результате выполнение таких задач смещается на часы с менее углеродоёмкой генерацией [4].

Второй механизм применим, когда у оператора есть несколько ЦОД в разных энергосистемах с различными ценами и структурой генерации: нагрузку можно перераспределять между ними. В работе [5] показано, что такое перераспределение способно сократить использование электроэнергии, произведённой на ископаемом топливе, однако эффект существенно

зависит от формы ценообразования, а стремление к снижению стоимости само по себе может даже увеличить суммарное потребление. Этот результат важен для энергетической политики: экологический эффект управления нагрузкой ЦОД не возникает автоматически и зависит от того, какие ценовые сигналы получает оператор.

Накопители энергии дают третий механизм. Аккумуляторные батареи систем бесперебойного питания предназначены прежде всего для резервирования, но могут накапливать энергию в периоды низкого потребления и отдавать её в часы пиков. В экспериментальном исследовании [6] такой подход позволил снизить пиковую мощность на 15–45 %, что соответствовало снижению текущих затрат на электроэнергию на 6–18 %. Авторы отдельно рассматривают ограничения, связанные со сроком службы батарей и сохранением резерва на случай отказа внешнего электроснабжения. Обзор возможностей и препятствий участия ЦОД в программах управления спросом в целом представлен в работе [7].

Роль методов искусственного интеллекта.

Каждый из перечисленных механизмов требует принятия решений в условиях неопределённости: решение о переносе задачи принимается до того, как станут известны фактические цены, углеродная интенсивность генерации и поток входящих запросов. Поэтому система управления гибкостью ЦОД включает как минимум три функциональных уровня: прогнозирование внешних сигналов (цен, углеродной интенсивности, собственной нагрузки), оптимизационное планирование и исполнение плана с контролем отклонений. Для географически распределённых ЦОД автором совместно с Ю. А. Кравченко предложена мультиагентная архитектура интеллектуального управления нагрузкой [8].

Главная задача первого уровня состоит в краткосрочном прогнозировании цен оптового рынка электроэнергии. С ростом доли солнечной и ветровой генерации почасовые цены становятся всё более волатильными, что одновременно повышает ценность переноса нагрузки и усложняет прогноз. По данным обзора [9], новые прогнозные модели нередко оцениваются некорректно: на коротких тестовых выборках, без сравнения с хорошо работающими простыми методами и без проверки статистической значимости различий. Авторы обзора дают рекомендации по корректной оценке. Для задачи управления нагрузкой ЦОД автором предложена гибридная модель LSTM-Transformer, которая прогнозирует отклонение цены от значения, наблюдавшегося сутками ранее, и тем самым явно учитывает суточную периодичность [10].

На втором уровне прогнозы используются оптимизационной моделью, определяющей почасовой план выполнения откладываемых задач и режим работы накопителя. Для этого применяются методы смешанного целочисленного линейного программирования и управления со скользя-

щим горизонтом, позволяющие корректировать план по мере поступления новых прогнозов.

Ограничения управления нагрузкой.

Гибкость ЦОД ограничена рядом требований, которые должны быть явно включены в модель планирования. Во-первых, соглашения об уровне обслуживания задают предельные сроки завершения задач, и их нарушение обесценивает экономию на электроэнергии. Во-вторых, часть задач связана с локальным состоянием и данными, и её перенос на другую площадку требует передачи данных и сопряжён с дополнительными затратами. В-третьих, требования законодательства о локализации и трансграничной передаче персональных данных делают часть площадок недопустимыми для определённых задач независимо от экономической выгоды. Наконец, как следует из [5], оптимизация только по стоимости без учёта структуры генерации может не дать экологического эффекта.

Условия практической реализации.

Для энергосистемы гибкость ЦОД представляет интерес как ресурс, способный снизить пиковые нагрузки и облегчить интеграцию возобновляемых источников энергии [7]. Для её реализации нужны ценовые сигналы, отражающие почасовую стоимость электроэнергии. В российской электроэнергетике такие сигналы формирует, в частности, рынок на сутки вперёд. Нужны и механизмы ценозависимого управления спросом, в которых ЦОД мог бы участвовать наравне с промышленными потребителями. Со стороны оператора ЦОД необходимы почасовой учёт потребления, классификация вычислительной нагрузки по допустимой задержке и программные средства прогнозирования и планирования.

Заключение.

Растущее из-за распространения искусственного интеллекта электропотребление ЦОД может стать для энергосистемы источником гибкости. У всех трёх рассмотренных механизмов (перенос нагрузки во времени, её географическое перераспределение, использование накопителей энергии) уже есть промышленные или исследовательские реализации. Их практическое применение опирается на методы искусственного интеллекта: прогнозирование цен и углеродной интенсивности и оптимизационное планирование с учётом сроков выполнения задач, их привязки к данным и требований законодательства. Дальнейшие исследования автора направлены на разработку и экспериментальную проверку интегрированной системы прогнозирования и оптимизационного планирования нагрузки ЦОД.

Список литературы

1. Energy and AI : World Energy Outlook Special Report / International Energy Agency. – Paris : IEA, 2025. – URL: https://www.iea.org/reports/energy-and-ai (дата обращения: 02.10.2026). – Текст : электронный.

2. 2024 United States Data Center Energy Usage Report / A. Shehabi, S. Smith, A. Hubbard [et al.]. – Berkeley : Lawrence Berkeley National Laboratory, 2024. – (LBNL-2001637). – URL: https://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/2024-12/lbnl-2024-united-states-data-center-energy-usage-report_1.pdf (дата обращения: 02.10.2026). – Текст : электронный.

3. Uptime Institute Global Data Center Survey 2024 / D. Donnellan, A. Lawrence, D. Bizo [et al.]. – Uptime Institute, 2024. – URL: https://datacenter.uptimeinstitute.com/rs/711-RIA-145/images/2024.GlobalDataCenterSurvey.Report.pdf (дата обращения: 02.10.2026). – Текст : электронный.

4. Carbon-Aware Computing for Datacenters / A. Radovanović, R. Koningstein, I. Schneider [et al.]. – Текст : электронный // IEEE Transactions on Power Systems. – 2023. – Vol. 38, № 2. – P. 1270–1280. – DOI 10.1109/TPWRS.2022.3173250.

5. Greening Geographical Load Balancing / Z. Liu, M. Lin, A. Wierman [et al.]. – Текст : электронный // IEEE/ACM Transactions on Networking. – 2015. – Vol. 23, № 2. – P. 657–671. – DOI 10.1109/TNET.2014.2308295.

6. Govindan, S. Benefits and limitations of tapping into stored energy for datacenters / S. Govindan, A. Sivasubramaniam, B. Urgaonkar. – Текст : электронный // Proceedings of the 38th Annual International Symposium on Computer Architecture (ISCA). – New York : ACM, 2011. – P. 341–352. – DOI 10.1145/2000064.2000105.

7. Opportunities and challenges for data center demand response / A. Wierman, Z. Liu, I. Liu, H. Mohsenian-Rad. – Текст : электронный // 2014 International Green Computing Conference (IGCC). – IEEE, 2014. – P. 1–10. – DOI 10.1109/IGCC.2014.7039172.

8. Алджаф, Ш. М. А. Мультиагентная архитектура интеллектуального управления нагрузкой географически распределённых центров обработки данных / Ш. М. А. Алджаф, Ю. А. Кравченко. – Текст : непосредственный // Безопасность. Управление. Искусственный интеллект. – 2026. – Т. 5, № S5. – С. 111–116. – EDN TTVUCG.

9. Forecasting day-ahead electricity prices: A review of state-of-the-art algorithms, best practices and an open-access benchmark / J. Lago, G. Marcjasz, B. De Schutter, R. Weron. – Текст : электронный // Applied Energy. – 2021. – Vol. 293. – Art. 116983. – DOI 10.1016/j.apenergy.2021.116983.

10. Алджаф, Ш. М. А. Гибридная модель LSTM-Transformer с остаточным обучением для прогнозирования цен оптового рынка электроэнергии в задаче управления нагрузкой центров обработки данных / Ш. М. А. Алджаф ; науч. рук. Ю. А. Кравченко. – Текст : непосредственный // Современные информационные технологии в условиях новых вызовов : материалы IX Междунар. науч. конф., 20 мая 2026 г. – Донецк : ФГБОУ ВО «ДОННУЭТ», 2026. – С. 210–212.