

# МИНИМИЗАЦИЯ ЗАДЕРЖЕК В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРАНИЧНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Хаджинова Н. В., Михнюк А. И., Засим А. О.

Кафедра информационных технологий автоматизированных систем,  
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Минск, Республика Беларусь

E-mail: khajynova@bsuir.by, {alexander.mikhniuk, alexeyzasim5}@gmail.com

*Исследована интеграция граничных вычислений (Edge Computing) и мультиагентных систем (MAS) для снижения временных задержек в умных сетях (Smart Grid) и телемедицине. Проанализированы временные преимущества в отклике локальной обработки данных на периферии сети совместно с децентрализованным управлением агентами по сравнению с облачными решениями. Рассмотрены такие механизмы, как федеративное обучение, гибридная архитектура (Kubernetes, MEC) и протоколы (MQTT, gRPC), оптимизированные для децентрализованных сред. Результаты подтверждают эффективность гибридных систем, объединяющих скорость Edge и автономию MAS.*

## ВВЕДЕНИЕ

Современные критические приложения, такие как интеллектуальные энергетические сети и телемедицина, предъявляют экстремальные требования к скорости обработки данных. Традиционные облачные вычисления сталкиваются с фундаментальными ограничениями: задержками передачи и рисками перегрузки сетей [1, 2]. Интеграция граничных вычислений (Edge Computing) и мультиагентных систем (MAS) открывает путь к минимизации задержек, перенося вычисления ближе к источникам данных и обеспечивая децентрализованную координацию.

Новизна данного исследования заключается в системном анализе роли Edge Computing как катализатора эффективности MAS для задач обработки данных со сверхнизкими задержками. Практическая значимость работы заключается в предложении конкретных механизмов, таких как локальная предобработка данных и динамическое перераспределение задач между агентами. Последующие разделы раскрывают архитектурные принципы Edge-MAS и демонстрируют их эффективность на примерах из энергетики и здравоохранения.

## I. ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИЙ

Граничные вычисления (Edge Computing) переносят обработку данных на периферию сети, ближе к источникам информации, таким как IoT-устройства и датчики [2]. Это позволяет выполнять предобработку и запуск легковесных алгоритмов локально, кардинально сокращая объем передаваемых в облако данных и снижая задержки.

Распределенные мультиагентные системы (MAS) обеспечивают децентрализованное управление через сеть автономных агентов, способных к кооперации. Их интеграция с Edge Computing создает синергию: Edge-устройства поставляют агентам предобработанные данные, а те, в свою

очередь, динамически перераспределяют вычислительные задачи, оптимизируя ресурсы. Например, в умных сетях гибридные архитектуры на базе Kubernetes на граничных узлах позволяют сократить задержку до 5–10 мс [2].

Ключевую роль в интеграции играют протоколы, оптимизированные для децентрализованных сред. MQTT и gRPC обеспечивают эффективную коммуникацию, Raft ускоряет достижение консенсуса, а Kafka служит надёжным брокером сообщений [1]. Таким образом, комбинация Edge и MAS формирует основу для высокопроизводительных систем в энергетике, телемедицине и других областях с жесткими требованиями к реальному времени.

## II. МЕХАНИЗМЫ СНИЖЕНИЯ ЗАДЕРЖКИ

Снижение временной задержки в системах, объединяющих граничные вычисления и мультиагентные системы, достигается за счет глубокой интеграции вычислительных ресурсов и адаптивных стратегий взаимодействия. Одним из перспективных методов является предиктивная обработка данных, при которой Edge-устройства не только фильтруют информацию, но и прогнозируют возможные сценарии на основе локальных моделей машинного обучения [3]. Например, в системах управления автономным транспортом сенсоры лидара предварительно анализируют траектории движения, отправляя в облако только отклонения от нормы, что сокращает объем передаваемых данных и время реакции на препятствия.

Важную роль играет оптимизация сетевых протоколов для децентрализованных сред. Технологии, такие как QUIC (Quick UDP Internet Connections) [1], заменяющие традиционный TCP, минимизируют задержки за счет уменьшения числа «рукопожатий» между устройствами. В сочетании с мультиагентными системами это позволяет организовать параллельную обработку запросов: так, в умных фабриках роботы-агенты, управля-

ющие конвейером, координируют действия через одноранговые соединения, исключая зависимость от центрального сервера.

Динамическое кэширование часто используется для данных на граничных узлах – еще один механизм, снижающий нагрузку на каналы связи. Например, в системах телемедицины результаты анализа типичных случаев (например, стандартных ЭКГ) хранятся локально на Edge-серверах больниц, что ускоряет диагностику повторяющихся сценариев. Мультиагентные системы при этом управляют актуальностью кэша, автоматически обновляя данные на основе изменений в медицинских протоколах.

Особый интерес представляют аппаратно-программные оптимизации для Edge-устройств [4]. Использование специализированных микросхем (ASIC) или нейропроцессоров (NPU) позволяет выполнять ресурсоемкие задачи, такие как обработка видео в реальном времени для систем видеонаблюдения, непосредственно на периферии. Агенты, встроенные в камеры, анализируют потоки данных с помощью оптимизированных алгоритмов компьютерного зрения, сокращая задержку до 2–3 мс, что критично для идентификации угроз в режиме реального времени.

Перспективным направлением остается гибридизация подходов, где предиктивная аналитика на Edge сочетается с глобальной координацией через MAS. Например, в энергосистемах агенты, распределенные по подстанциям, используют локальные прогнозы потребления для балансировки нагрузки, а MAS синхронизирует их действия через механизмы консенсуса, предотвращая конфликты. Это устраняет необходимость постоянного обращения к облаку, сокращая задержку на 40 – 60% в сравнении с чисто централизованными решениями [2, 4].

Таким образом, снижение временной задержки достигается не за счет отдельных технологий, а через их синергию, где Edge Computing обеспечивает скорость, а MAS – интеллектуальное распределение ресурсов. Это формирует основу для систем, где каждый миллисекундный выигрыш трансформируется в повышение безопасности, надежности и эффективности.

### III. ВЫЗОВЫ И ОГРАНИЧЕНИЯ

Внедрение гибридных систем Edge-MAS сталкивается с комплексом взаимосвязанных проблем.

Технические и ресурсные ограничения. Ограниченная вычислительная мощность и энергопотребление Edge-устройств препятствуют выполнению сложных алгоритмов в реальном времени, создавая парадокс между автономностью и функциональностью [1, 4].

Проблемы безопасности. Децентрализованная архитектура увеличивает поверхность для

кибератак, а отсутствие единого центра контроля затрудняет мониторинг и реагирование. Применение методов шифрования для защиты данных может нивелировать преимущества в виде низкой задержки [2].

Организационные и нормативные барьеры. Интеграция с унаследованными системами требует значительной модернизации инфраструктуры и пересмотра протоколов [1]. Автономность агентов также порождает этические-юридические дилеммы, связанные с размыванием ответственности за их решения.

Таким образом, успешное внедрение зависит не только от технологического прогресса, но и от преодоления организационного сопротивления и развития нормативной базы.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования разработана гибридная архитектура обработки информации, сочетающая граничные вычисления и мультиагентные системы (Edge-MAS). В этой архитектуре узлы отвечают за предварительную локальную обработку данных, облачные ресурсы нагружены глубокой аналитикой предобработанных данных, а MAS отвечает за интеллектуальное и отказоустойчивое распределение ресурсов. Такой архитектурный подход позволяет достичь значительного сокращения задержки (40–60%).

При анализе вызовов и ограничений выявлено, что несмотря на потенциал, внедрение Edge-MAS сдерживается ограничениями периферийных устройств, проблемами безопасности и сложностями интеграции с унаследованными системами. Перспективы дальнейших исследований видятся в разработке энергоэффективных процессоров, унифицированных протоколов и гибридных архитектур.

Таким образом, комбинация Edge и MAS представляет собой новую парадигму для построения высокопроизводительных систем реального времени. Последующие работы должны быть направлены на создание адаптируемых межотраслевых платформ для преодоления существующих барьеров и массового внедрения.

1. Khan M.A., Ahmadon M.A. Trends and Challenges in Mobile Edge Computing for the Next Generation Massive Internet of Things // *Evolution of Information, Communication and Computing System*, 2023. Vol. 4. P. 28–42.
2. Liang B. et al. Multi-access Edge Computing Fundamentals, Services, Enablers and Challenges: A Complete Survey // *Journal of Network and Computer Applications*, 2022. Vol. 199.
3. Аль-Тамими М., Хассан М. Б., Аббас С. А. Федеративное обучение (FL)–Обзор // *Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. – 2024. – Т. 17. – № 5. – С. 74–82.
4. Bebortta S. et al. Performance Analysis of Multi-Access Edge Computing Networks for Heterogeneous IoT Systems // *Materials Today: Proceedings*, 2022. Vol. 58. P. 267–272.