Цифровая трансформация промышленности, движимая концепциями Индустрии 4.0 и Промышленного Интернета вещей (IIoT), предъявляет новые требования к автоматизированным системам управления технологическими процессами (АСУ ТП). Современные АСУ ТП эволюционируют от замкнутых контуров к распределённым, интеллектуальным сетевым экосистемам. Ключевым вызовом стал экспоненциальный рост данных от множества интеллектуальных датчиков и контроллеров. Согласно эталонной архитектуре OpenFog, прогнозируемый объём таких данных вырос с 1.1 зеттабайта в год (2016) до 2.3 зеттабайта (2020). Эти данные несут критическую информацию для оперативного управления, предиктивной аналитики и обеспечения безопасности.

Однако классические облачно-центричные архитектуры демонстрируют свою неэффективность для новых задач. Они не способны обеспечить низкую задержку, высокую пропускную способность и отказоустойчивость, необходимые для работы АСУ ТП в реальном времени. Особенно остро эта проблема стоит для систем, развёрнутых в агрессивных или удалённых условиях: на нефтеплатформах, в шахтах, на удалённых электрических подстанциях. Передача всего массива сырых данных в центральное облако приводит к неприемлемым задержкам, высоким сетевым издержкам и рискам потери управления при разрыве связи. Как отмечено в OpenFog RA, в таких сценариях реакция на аномалии в облаке может занять сотни миллисекунд, что достаточно для возникновения значительной аварии, например, крупного разлива.

Таким образом, возникает насущная потребность в переносе вычислительных ресурсов ближе к источнику данных - на периферию сети. Это позволяет проводить первичную обработку, фильтрацию и анализ непосредственно вблизи датчиков и исполнительных механизмов, сокращая задержки и разгружая каналы связи. Для реализации этого подхода необходимы специализированные алгоритмы и инфраструктура. В частности, требуется разработка **высокодоступных параллельных алгоритмов для систем хранения данных (СХД)**, предназначенных для работы **на периферии** в **агрессивных условиях** в составе **гибридной облачной платформы**.

Актуальность данной работы обусловлена необходимостью решения следующих взаимосвязанных проблем:

1. **Обеспечение отказоустойчивости и доступности (RAS)** периферийной СХД в условиях экстремальных температур, вибраций, влажности и потенциальных физических повреждений, где традиционные дата-центрные решения неприменимы.
2. **Обработка больших потоков данных в реальном времени** на ресурсо-ограниченном периферийном оборудовании, что требует эффективных параллельных алгоритмов для распределённой обработки и хранения.
3. **Интеграция периферийной СХД с облачной платформой** для создания единого континуума данных, где на периферии происходит оперативная обработка, а в облаке - долгосрочный анализ и хранение.
4. **Обеспечение безопасности и целостности данных** на всём пути от датчика до облака, учитывая повышенные риски физического доступа к периферийным узлам.

Реализация таких алгоритмов позволит создать следующее поколение АСУ ТП, основанное на гибридной **туманно-граничной (Fog/Edge) и облачной архитектуре**. Эта архитектура, описанная в OpenFog RA, обеспечит недостающее звено между облаком и «вещами», объединяя преимущества локальной обработки для критических по времени операций с мощью облака для глубокой аналитики и глобального управления.

Современные ИТ-архитектуры активно эволюционируют. Традиционная облачная модель демонстрирует фундаментальные ограничения. Эти ограничения стали особенно критичными для промышленных систем. В ответ индустрия сформировала новые концепции. Ключевая идея заключается в переносе вычислительных мощностей к источникам данных. Это движение породило две основные парадигмы. Первая парадигма - **граничные вычисления (Edge Computing)**. Вторая парадигма - **туманные вычисления (Fog Computing)**. Эти понятия тесно взаимосвязаны. Однако между ними существуют важные различия. Понимание этих различий является критически важным. Оно составляет основу для проектирования современных АСУ ТП. Особенно для систем, работающих в агрессивных условиях.

Граничные вычисления представляют собой конкретный архитектурный паттерн. Его суть заключается в размещении вычислительных ресурсов в непосредственной близости от данных. Эти ресурсы располагаются «на границе» сети. Под границей понимается логический предел. За ним находятся непосредственно датчики и исполнительные механизмы. В промышленном контексте границей может выступать программируемый логический контроллер (ПЛК). Также границей может быть промышленный шлюз или интеллектуальная камера. Иногда граничным устройством является сам встраиваемый компьютер на станке.

Ключевой характеристикой подхода является его **локальность**. Не менее важна **автономность** от централизованных систем. Основная цель граничных вычислений - обеспечение минимально возможной задержки. Задержка часто должна составлять миллисекунды. Это требование критично для киберфизического управления. Другая важная цель - независимость от качества сетевого соединения. Система должна функционировать без постоянной связи с облаком.

Консорциум OpenFog дает важное уточнение. Граничные вычисления часто определяются без учета облака. Они, как правило, ограничены небольшим количеством слоев. Их фокус сосредоточен преимущественно на **вычислительных операциях**. Эти операции обеспечивают предварительную обработку данных. Также они обеспечивают быструю реакцию на локальные события.

Преимущества граничных вычислений достаточно весомы:

* **сверхнизкая задержка -** принятие решений происходит практически мгновенно. это критично для аварийных остановок и предотвращения инцидентов;
* **значительное снижение сетевой нагрузки -** на верхние уровни передаются только результаты обработки, а не сырые данные. это снижает так называемые «сетевые налоги»;
* **повышение общей надежности системы -** устройство или узел сохраняет работоспособность при разрыве связи;
* **усиление безопасности конфиденциальных данных -** чувствительная информация может обрабатываться локально. таким образом, она не покидает защищенный периметр.

Однако чистый подход Edge Computing имеет свои ограничения. Эти ограничения отмечены в документации OpenFog. Во-первых, возникают сложности с координацией множества разрозненных устройств. Во-вторых, вычислительные ресурсы на границе часто ограничены. Это не позволяет выполнять сложную аналитику. В-третьих, существует проблема масштабирования. Трудно управлять огромным количеством граничных точек как единой системой.

Туманные вычисления являются более широкой и системной концепцией. Данную концепцию продвигает OpenFog Consortium. Ее официальное определение звучит следующим образом. Это **горизонтальная архитектура системного уровня**. Данная архитектура распределяет несколько ключевых функций. К ним относятся функции вычислений, хранения, управления и сетей. Распределение происходит ближе к пользователям. Охватывается весь континуум от облака к вещам.

Ключевое отличие от граничных вычислений - явная **иерархичность**. Fog предполагает многоуровневую и распределенную архитектуру. Если Edge - это часто один слой устройств, то Fog - это целая сеть. Сеть состоит из взаимосвязанных узлов (fog nodes). Эти узлы образуют четкую иерархию. Узлы могут располагаться на различных уровнях сетевой топологии. Примеры уровней: граничные шлюзы, агрегирующие маршрутизаторы, микро-ЦОДы на уровне цеха или предприятия.

Важнейший принцип - туманная архитектура **не заменяет облако**. Она **работает совместно с облаком**. Вместе они формируют непрерывный вычислительный континуум. Этот континуум охватывает все расстояние от датчика до облачного дата-центра.

Можно выделить несколько отличительных черт туманных вычислений:

1. **Иерархическая организация.** Узлы на разных уровнях выполняют специализированные функции: сбор данных, локальная аналитика, агрегация информации, координация работы нижних уровней.
2. **Географическая и логическая распределенность.** Вычислительные ресурсы, ресурсы хранения и сети распределены по территории.
3. **Комплексный системный подход.** Fog решает задачи не только вычислений, но и сетей, хранения, управления, ускорения. Это единая платформа.
4. **Акцент на открытость и взаимодействие.** Архитектура OpenFog подчеркивает важность открытых стандартов. Это позволяет обеспечивать взаимодействие между узлами разных производителей.

Эталонная архитектура OpenFog RA базируется на восьми столпах. Эти столпы полностью описывают требования к туманной системе:

1. Безопасность.
2. Масштабируемость.
3. Открытость.
4. Автономность.
5. RAS (Надежность, Доступность, Обслуживаемость).
6. Гибкость.
7. Иерархия.
8. Программируемость.

Например, **автономность** позволяет узлам продолжать работу при сбоях внешних сервисов. **Программируемость** обеспечивает адаптацию к динамическим рабочим нагрузкам.

Таким образом, туманные вычисления можно рассматривать как архитектурное расширение облачной модели в сторону периферии. Это расширение имеет четко определенную структуру. Оно рассчитано на масштабирование, безопасность и управление сложными распределенными системами. К таким системам относятся АСУ ТП, умные города и интеллектуальные транспортные системы.

На практике чистые модели Edge и Fog редко встречаются изолированно. Для комплексных промышленных развертываний наиболее эффективной является **гибридная архитектура**. Эта архитектура объединяет принципы обоих подходов. В такой модели различные уровни иерархии выполняют специфичные роли. Выбор роли оптимален с точки зрения задержки, объема данных и требуемых вычислительных ресурсов.

В гибридной архитектуре можно выделить следующие логические слои:

1. **Уровень устройств (Things) и граничных узлов (Edge).** Самый нижний уровень. Здесь находятся датчики, исполнительные механизмы и простые контроллеры. Критически важные операции с субмиллисекундной задержкой выполняются здесь. Устройства могут иметь минимальные вычислительные возможности (микроконтроллеры) или быть «интеллектуальными» (камеры с аналитикой). Этот уровень обеспечивает максимальную автономность для конкретного технологического узла.
2. **Уровень локального тумана (Local Fog).** Промежуточный уровень. Представлен более мощными вычислительными узлами: промышленные серверы, кластеры микросервисов. Эти узлы агрегируют данные с нескольких граничных устройств или цехов. Выполняют более сложную аналитику в реальном времени (например, анализ вибраций по группе станков). Управляют локальными процессами. Обеспечивают краткосрочное хранение данных. Они реализуют принципы иерархии и взаимодействия между узлами (связь «восток-запад»).
3. **Уровень регионального/корпоративного тумана (Regional/Enterprise Fog).** Высший уровень туманной иерархии. Возможно, географически распределенный. Эти узлы осуществляют агрегацию данных со всего предприятия. Выполняют сложную предиктивную аналитику и машинное обучение (обучение моделей или выполнение сложного вывода). Координируют работу нижних уровней через оркестрацию. Служат шлюзом к облаку.
4. **Облачный уровень (Cloud).** Централизованная платформа. Предназначена для долгосрочного хранения исторических данных. Выполняет глобальную бизнес-аналитику. Осуществляет управление жизненным циклом приложений и моделей. Решает задачи, не критичные ко времени (например, оптимизация цепочки поставок на основе данных за год).

Гибридная модель **Fog/Edge** позволяет оптимально распределить вычислительную нагрузку. Данные трансформируются в информацию и знания по мере продвижения вверх по иерархии. Этот процесс соответствует принципу DIKW (Data, Information, Knowledge, Wisdom). Например:

* сырые данные с датчиков вибрации на граничном устройстве фильтруются;
* на узле локального тумана они анализируются для выявления аномалий;
* на узле регионального тумана результаты используются для прогнозирования остаточного ресурса оборудования;
* итоговые отчеты отправляются в облако.

Для АСУ ТП в агрессивных условиях такая архитектура является наиболее перспективной. Она позволяет разместить надежные, защищенные и программируемые периферийные СХД на уровне локального тумана. Эти СХД будут обслуживать группу граничных устройств. Они обеспечат высокую доступность данных для локальной аналитики. Одновременно они обеспечат резервирование при сбоях. Параллельно произойдет интеграция с облачной платформой для долгосрочной работы. Таким образом, гибридный подход объединяет скорость Edge, системность Fog и мощь Cloud.