

Интернет-журнал «Отходы и ресурсы» <https://resources.today>
Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling

2025, Том 12, № 1 / 2025, Vol. 12, Iss. 1 <https://resources.today/issue-1-2025.html>

URL статьи: <https://resources.today/PDF/14ECOR125.pdf>

DOI: 10.15862/14ECOR125 (<https://doi.org/10.15862/14ECOR125>)

2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Гончаров, А. В. Формирование методологических основ построения отказоустойчивых распределённых систем управления технологическими процессами с элементами искусственного интеллекта / А. В. Гончаров, М. А. Черкасова // Отходы и ресурсы. — 2025. — Т. 12. — № 1. — URL: <https://resources.today/PDF/14ECOR125.pdf>
DOI: 10.15862/14ECOR125.

For citation:

Goncharov A.V., Cherkassova M.A. Formation of methodological foundations for building fault-tolerant distributed control systems for technological processes with elements of artificial intelligence. *Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*. 2025;12(1): 14ECOR125. Available at: <https://resources.today/PDF/14ECOR125.pdf>.
DOI: 10.15862/14ECOR125. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 681.5

Гончаров Андрей Витальевич

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет технологий и управления
имени К.Г. Разумовского (Первый казачий университет)», Москва, Россия
Заведующий кафедрой «Систем автоматизированного управления»
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: a.goncharov@mguttm.ru

Черкасова Мария Анатольевна

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет технологий и управления
имени К.Г. Разумовского (Первый казачий университет)», Москва, Россия
Аспирант кафедры «Систем автоматизированного управления»
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: marusya.7908@mail.ru

**Формирование методологических основ построения
отказоустойчивых распределённых систем управления
технологическими процессами с элементами
искусственного интеллекта**

Аннотация. Исследование посвящено анализу методологических подходов к построению отказоустойчивых распределённых систем управления технологическими процессами (РСУТП) с использованием элементов искусственного интеллекта (ИИ). В работе представлен ретроспективный анализ эволюции концепций отказоустойчивости, прослеживающий путь от базовых принципов резервирования до современных адаптивных архитектур на основе прогностической аналитики. Систематизированы ключевые принципы и методы обеспечения устойчивости к отказам, включая многоуровневое резервирование, функциональную декомпозицию, проактивную реконфигурацию и интеллектуальный мониторинг. Особое внимание уделено анализу применения методов ИИ для решения задач раннего обнаружения аномалий, диагностики неисправностей, прогнозирования отказов и планирования восстановления. Рассмотрены перспективные архитектуры интеграции компонентов ИИ в контур управления отказоустойчивостью РСУТП. Проведен сравнительный анализ современных методологий построения интеллектуальных отказоустойчивых систем, выявлены

их особенности, преимущества и ограничения. Предложены практические рекомендации по выбору и адаптации методологии с учетом специфики предметной области и требований к надежности системы. Результаты проведенного исследования убедительно демонстрируют, что эффективное применение элементов искусственного интеллекта позволяет качественно повысить устойчивость распределенных систем управления технологическими процессами к различным типам отказов и аномалий. Однако реализация потенциала интеллектуальных технологий требует комплексного методологического подхода, учитывающего структурные и функциональные особенности конкретной системы, существующие ресурсные ограничения и потенциальные риски, связанные с интеграцией новых технологий в критически важные производственные системы.

Ключевые слова: распределенные системы управления; отказоустойчивость; искусственный интеллект; интеллектуальный анализ данных; машинное обучение; проактивное управление; мультиагентные системы; адаптивные архитектуры; функциональная безопасность; надежность

Введение

Современное развитие промышленности и технологий характеризуется неуклонным возрастанием сложности и масштабов автоматизированных систем управления, что обуславливает повышенные требования к их надежности и отказоустойчивости. Распределенные системы управления технологическими процессами (РСУТП), интегрирующие множество территориально удаленных компонентов, представляют собой яркий пример сложных человеко-машинных комплексов, функционирование которых протекает в условиях постоянно действующих дестабилизирующих факторов — аппаратных и программных сбоев, ошибок персонала, кибератак, неблагоприятных внешних воздействий.

Обеспечение способности РСУТП сохранять работоспособность и выполнять свои функции в штатном режиме при возникновении нештатных ситуаций относится к приоритетным задачам при проектировании и эксплуатации таких систем. Ключевым трендом последних лет стало дополнение традиционных методов повышения отказоустойчивости техническими решениями с использованием элементов искусственного интеллекта — интеллектуального анализа данных, экспертных систем, машинного обучения и т. д. Применение этих технологий открывает новые возможности для раннего обнаружения угроз и адаптивной реконфигурации РСУТП в условиях воздействия возмущающих факторов.

Цель данной работы — исследование и систематизация существующих методологических подходов к построению отказоустойчивых распределенных систем управления технологическими процессами с элементами искусственного интеллекта, разработка рекомендаций по их практическому применению.

Задачи исследования:

1. Провести ретроспективный анализ эволюции концепций отказоустойчивости распределенных систем управления, выявить ключевые этапы развития.
2. Систематизировать основные принципы и методы построения отказоустойчивых архитектур РСУТП.
3. Исследовать существующие подходы к применению элементов искусственного интеллекта для повышения отказоустойчивости РСУТП.
4. Провести сравнительный анализ ключевых методологий проектирования отказоустойчивых РСУТП с элементами ИИ.
5. Разработать практические рекомендации по выбору и применению методологии с учетом особенностей предметной области.

Материалы и методы

При проведении исследования использовались методы системного анализа, ретроспективного анализа, сравнения, классификации, обобщения и синтеза.

Теоретический базис исследования составили фундаментальные труды отечественных и зарубежных ученых в области теории управления, надежности технических систем, искусственного интеллекта и его приложений в промышленности. В частности, были изучены работы Ш.З. Жабборов, Л.В. Дубровец, А.Ш. Тилев [1] B.V. Paliukh, I.A. Egereva [2], В.Н. Максименко [3], Н.А. Кашеварова, М.Е. Куликова [4], Д.К. Луков [5], И.С. Гефнер, С.М. Коваленко, А.С. Суховерхов, С.В. Соловьев [6], С.А. Панычев, А.И. Панычев, А.В. Максимов, А.Г. Байбуз [7], Р.М. Закирзянов [8], Э.Ф. Садыкова [9], Д.М. Мусиенко, П.П. Иванов, С.Г. Пачкин, Я.Е. Гейгер [10] и другие.

Значительное внимание уделено анализу современных стандартов и руководств в области функциональной безопасности систем управления, таких как ГОСТ Р МЭК 61508, ГОСТ Р МЭК 61511, серия стандартов ГОСТ Р ИСО 13849. Рассмотрены ключевые принципы и требования к жизненному циклу систем, связанных с безопасностью, применительно к задачам обеспечения отказоустойчивости РСУТП.

Для выявления современных трендов развития методологии построения интеллектуальных отказоустойчивых систем управления был проведен патентный поиск и анализ публикаций в ведущих научных изданиях, таких как IEEE Transactions on Industrial Informatics, Control Engineering Practice, Reliability Engineering & System Safety, Applied Intelligence.

Сравнительный анализ методологических подходов проводился по комплексу критериев, характеризующих функциональные возможности, применимость, этапы жизненного цикла, используемые модели и методы ИИ, ключевые ограничения и проблемы реализации. Для систематизации и наглядного представления результатов использовались методы построения таблиц, схем и диаграмм.

На основе обобщения результатов теоретических и эмпирических исследований, лучших практик и анализа требований к современным РСУТП сформулированы практические рекомендации по выбору и адаптации методологии построения отказоустойчивых систем с учетом отраслевой специфики. Предложена обобщенная схема процесса формирования методологического базиса, идентифицированы ключевые факторы и критерии принятия решений на каждом этапе.

Результаты и обсуждения

Формирование теоретических основ обеспечения отказоустойчивости РСУТП неразрывно связано с развитием промышленных систем управления и компьютерных технологий. Условно эволюцию концепций в данной области можно разделить на несколько этапов:

1. Появление принципов надежности и резервирования (1950–60-е гг.). С развитием первых цифровых систем управления производственными процессами актуализировалась проблема их устойчивости к единичным отказам компонентов. Были предложены базовые принципы аппаратного резервирования, такие как дублирование и троирование критически важных элементов.

2. Структурное резервирование и отказоустойчивые архитектуры (1970–80-е гг.). Рост масштабов и сложности РСУТП обусловил переход от резервирования на уровне отдельных элементов к резервированию функциональных подсистем в рамках иерархических архитектур. Получили развитие методы структурного резервирования с различными способами голосования.

3. Программные методы обеспечения отказоустойчивости (1990-е гг.). Бурный рост производительности и «интеллектуальности» программного обеспечения АСУ привел к смещению акцентов на отказоустойчивость прикладного и системного ПО. Были предложены методы функционального программирования, математические модели обеспечения устойчивости к программным сбоям.

4. Проактивный подход к отказоустойчивости (2000-е гг.). Многочисленные исследования выявили неполноту традиционных реактивных методов обеспечения устойчивости к отказам. Новый подход был основан на предиктивной диагностике и упреждающем устранении потенциальных источников сбоев. Развитие получили технологии непрерывного мониторинга, алгоритмы системной диагностики на основе «цифровых двойников».

5. Интеграция технологий искусственного интеллекта (2010-е гг. — наст. вр.). Современный этап развития характеризуется использованием методов ИИ для решения трудно формализуемых задач обеспечения отказоустойчивости — раннего обнаружения аномалий, идентификации рисков, планирования защитных мер. Технологии машинного обучения, когнитивного моделирования, интеллектуального анализа данных находят активное применение в современных РСУТП.

Таким образом, за более чем полувековой период сформировался комплекс методологических подходов к построению отказоустойчивых РСУТП, адаптирующихся к технологическим изменениям и новым вызовам. При этом ведущей тенденцией последних лет стала интеграция классических методов резервирования и проактивных стратегий на основе технологий ИИ.

Анализ накопленного опыта разработки и эксплуатации надежных РСУТП позволяет выделить ряд фундаментальных принципов их построения:

1. Функциональная декомпозиция. Декомпозиция системы на автономные функциональные подсистемы позволяет локализовать последствия отказов и упрощает задачи реконфигурации и восстановления работоспособности.
2. Многоуровневое резервирование. Комбинирование структурного, информационного, временного и программного резервирования на различных уровнях архитектуры обеспечивает надежную защиту от сбоев и отказов разной природы.
3. Адаптивная реконфигурация. Проактивная реконфигурация структуры и алгоритмов функционирования РСУТП на основе предиктивного анализа состояния компонентов повышает устойчивость к отказам в динамически меняющихся условиях.
4. Интеллектуальный мониторинг. Непрерывный мониторинг системы с применением технологий ИИ для обнаружения аномалий и идентификации рисков создает основу для упреждающего управления отказоустойчивостью.
5. Интегрированные механизмы восстановления. Совместное использование технологий автоматического тестирования, диагностики и восстановления повышает оперативность ликвидации последствий нештатных ситуаций.

Практическая реализация данных принципов опирается на комплекс методов и технических решений (табл. 1).

Таким образом, в арсенале разработчиков РСУТП имеется обширный набор формализованных методов, обеспечивающих построение систем с требуемым уровнем отказоустойчивости. При этом важнейшую роль играет системный подход, предполагающий сбалансированное применение различных методов с учетом особенностей архитектуры и условий эксплуатации конкретной РСУТП.

Таблица 1

Основные методы построения отказоустойчивых РСУТП

Группа методов	Назначение	Примеры методов
Методы резервирования	Обеспечение избыточности критических компонентов на аппаратном и программном уровнях	Дублирование, мажоритарное резервирование, безопасная остановка и др.
Методы предиктивного анализа	Упреждающее выявление аномалий и деградаций в работе системы	Анализ трендов параметров, обнаружение скрытых зависимостей, прогнозирование отказов
Методы восстановления	Оперативное восстановление работоспособности после возникновения нештатных ситуаций	Автономные агенты восстановления, динамический выбор резервных конфигураций
Методы валидации и верификации	Подтверждение соответствия РСУТП требованиям отказоустойчивости	Имитационное моделирование сбоев, мониторинг покрытия программного кода тестами

Составлено автором на основе [10; 11]

Перспективным направлением развития методологии построения отказоустойчивых РСУТП является интеграция в их состав технологий искусственного интеллекта. ИИ открывает новые возможности для решения ключевых задач обеспечения устойчивости к отказам — обнаружение аномалий, диагностики неисправностей, прогнозирования сбоев, планирования восстановительных мероприятий.

В таблице 2 представлены основные задачи обеспечения отказоустойчивости РСУТП и соответствующие методы ИИ, применяемые для их решения.

Таблица 2

Применение методов ИИ для обеспечения отказоустойчивости РСУТП

Задача	Методы ИИ	Примеры реализации
Раннее обнаружение аномалий	Интеллектуальный анализ данных, машинное обучение	Выявление скрытых шаблонов в телеметрии, обнаружение выбросов параметров на ранних стадиях деградации
Диагностика причин сбоев	Экспертные системы	Анализ симптомов и выявление источников сбоев на основе базы знаний
Прогнозирование отказов	Машинное обучение, когнитивное моделирование	Предсказание вероятности отказов узлов на основе исторических данных и имитационных моделей
Планирование восстановления	Экспертные системы, когнитивное моделирование	Динамическая генерация планов реконфигурации на основе текущей ситуации и опыта реагирования на инциденты

Составлено автором на основе [11; 12]

Методы интеллектуального анализа данных (Data Mining) обеспечивают автоматизированное обнаружение неочевидных, объективных и потенциально полезных закономерностей в больших объемах исходной телеметрической информации. Их применение позволяет выявлять скрытые шаблоны (паттерны), характерные для ранних стадий развития аномалий и деградационных процессов, и своевременно инициировать защитные меры.

Машинное обучение, основанное на построении прогностических моделей по прецедентам, открывает возможность предиктивного выявления рисков отказов узлов и блоков РСУТП. Обучаясь на исторических данных об отказах и их признаках, модели прогнозируют вероятность сбоев компонентов в зависимости от текущих значений диагностических параметров.

Экспертные системы используют формализованные в базах знаний человеческие экспертные знания и опыт для диагностики неисправностей и планирования восстановительных операций. Они позволяют оперативно локализовать источники сбоев по набору наблюдаемых

симптомов и сгенерировать эффективный план реконфигурации системы, основываясь на лучших практиках реагирования на нештатные ситуации.

Когнитивное моделирование предоставляет возможность проиграть динамику развития процессов деградации и восстановления РСУТП с помощью имитационных моделей, учитывающих структуру, функциональные взаимосвязи и поведение компонентов системы. Результаты моделирования различных сценариев позволяют прогнозировать последствия отказов, оценивать эффективность стратегий восстановления, оптимизировать размещение точек контроля и управляющих воздействий.

Практическая реализация методов ИИ в контуре обеспечения отказоустойчивости РСУТП предполагает разработку и интеграцию специализированных программных компонентов:

- сервисы сбора, фильтрации и предобработки телеметрической информации;
- хранилища исторических данных о состоянии и поведении системы;
- библиотеки алгоритмов интеллектуального анализа данных и машинного обучения;
- базы знаний, содержащие экспертные правила диагностики и реконфигурации;
- средства когнитивного моделирования процессов деградации и восстановления;
- интерфейсы взаимодействия интеллектуальных модулей с базовой системой управления.

На рисунке 1 показан пример архитектуры РСУТП с компонентами ИИ в контуре обеспечения отказоустойчивости.

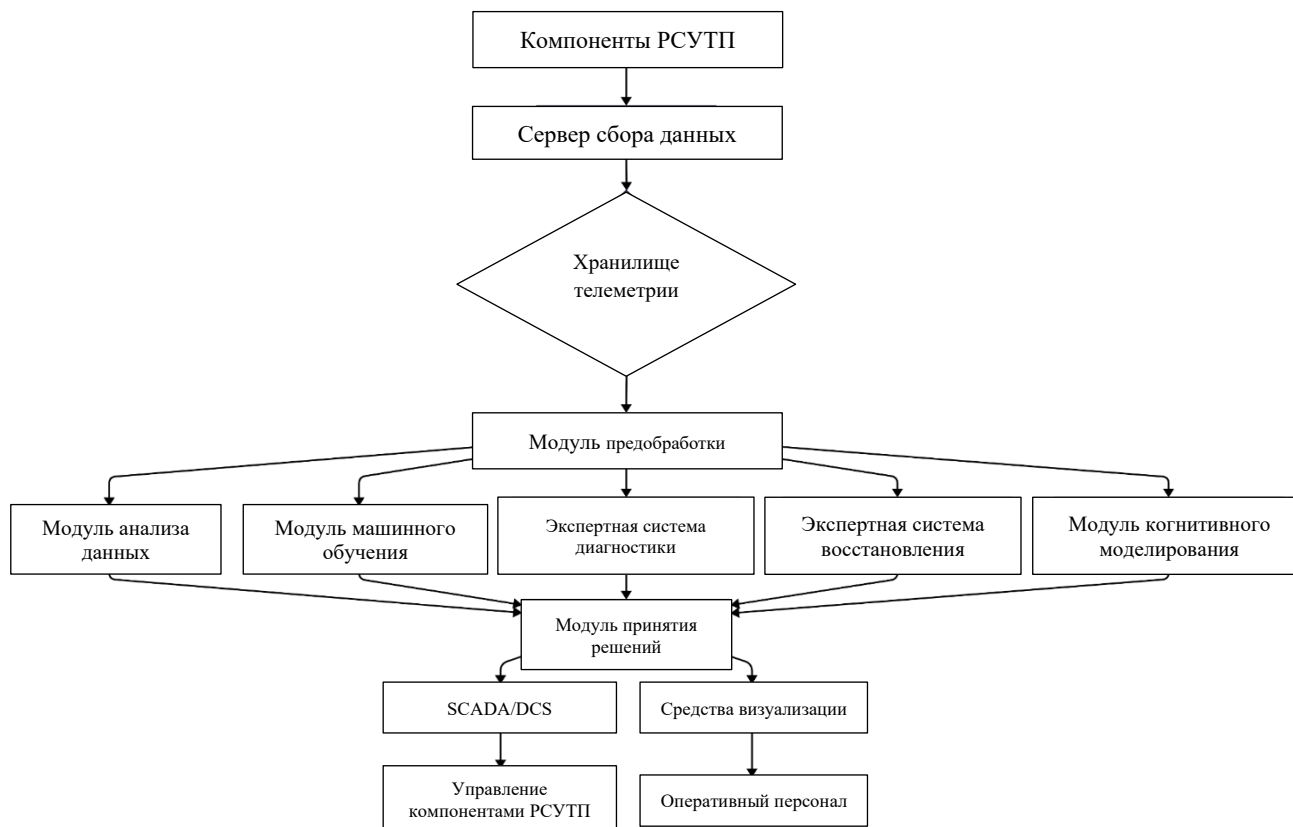


Рисунок 1. Архитектура РСУТП с компонентами ИИ
в контуре отказоустойчивости (разработано автором на основе [13; 14])

Таким образом, развитие и совершенствование методов ИИ открывает новые возможности для построения адаптивных и устойчивых к отказам РСУТП нового поколения. Дальнейшие исследования в этой области связаны с обеспечением робастности и интерпретируемости результатов, а также с разработкой стандартов применения ИИ в промышленных системах управления с учетом требований функциональной безопасности.

На современном этапе развития сформировалось несколько методологических подходов к проектированию отказоустойчивых РСУТП с элементами ИИ, каждый из которых имеет свои особенности и сферы применения. Проведем их сравнительный анализ по ключевым характеристикам (табл. 3).

Таблица 3

Сравнение методологий построения отказоустойчивых РСУТП

Методология	Структура системы	Принципы резервирования	Методы ИИ	Особенности внедрения
Многоагентные системы	Сеть автономных интеллектуальных агентов	Резервирование функций агентов, динамическое распределение задач	Обучение с подкреплением, координация агентов на основе ИИ	Итеративная разработка, необходимость настройки моделей взаимодействия
Мультиверсионное программирование	Множество функционально эквивалентных программных модулей	Параллельное выполнение версий, голосование результатов	Методы генерации разнообразных версий ПО на основе ИИ	Высокие накладные расходы, ограниченная применимость в системах реального времени
Проактивное обслуживание	Стандартная архитектура РСУТП, дополненная средствами ИИ	Резервирование на основе прогноза технического состояния	Прогнозирование отказов, оптимизация планов обслуживания	Зависимость от объема и качества исходных данных, проблемы интерпретации прогнозов
Архитектура AFTCS	Многоуровневая архитектура с адаптивными компонентами	Реконфигурация структуры в зависимости от состояния компонентов	Оптимизация конфигураций, обнаружение аномалий	Сложность проектирования, верификации и валидации

Разработано автором на основе [15; 16]

Методология многоагентных систем предполагает декомпозицию РСУТП на сеть автономных программных агентов, взаимодействующих для реализации общих целей управления. Отказоустойчивость достигается за счет возможности динамического перераспределения функций между агентами при отказах отдельных узлов. Ключевую роль играют методы ИИ, обеспечивающие адаптивную координацию и коллективное обучение агентов в процессе функционирования.

Мультиверсионное программирование основано на идее параллельного использования нескольких функционально эквивалентных версий критически важных программных модулей с последующим голосованием результатов. Методы ИИ находят применение для автоматизированной генерации версий с целью обеспечения их разнообразия. Данный подход характеризуется существенными накладными расходами ресурсов и ограниченной применимостью в системах реального времени.

Методология проактивного обслуживания ориентирована на предупреждение отказов компонентов РСУТП за счет упреждающего технического обслуживания по фактическому состоянию. Модели машинного обучения применяются для прогнозирования процессов деградации и оптимизации планов обслуживания. Реализация подхода требует накопления больших объемов статистических данных о надежности компонентов в различных условиях эксплуатации.

Архитектура Autonomic Fault-Tolerant Control System (AFTCS) представляет собой концептуальный каркас для построения адаптивных систем управления, устойчивых к сбоям и непредвиденным ситуациям. Ключевыми компонентами являются средства непрерывного мониторинга, диагностики отказов, оптимизации и реконфигурации структуры системы в реальном времени. Методы ИИ используются на всех этапах цикла автономного управления отказоустойчивостью.

Выбор конкретной методологии определяется спецификой технологического объекта и процесса, требованиями к показателям надежности и безопасности, ограничениями на ресурсы разработки и эксплуатации. При этом перспективным направлением является комбинированное использование различных методологических подходов, позволяющее компенсировать недостатки каждого из них.

Процесс формирования методологического базиса для построения отказоустойчивой РСУТП должен носить системный и обоснованный характер. Анализ лучших практик и опыта внедрения позволяет сформулировать ряд общих рекомендаций:

1. Проведение комплексного анализа требований с учетом специфики объекта управления, включая:
 - идентификацию критически важных функций РСУТП и допустимых показателей их надежности;
 - анализ возможных сценариев и последствий отказов различных компонентов системы;
 - оценку ресурсных ограничений и рисков, связанных с разработкой и эксплуатацией системы.
2. Обоснованный выбор базовой методологии или их комбинации с учетом:
 - соответствия структурных и функциональных особенностей методологий выявленным требованиям;
 - наличия апробированных практик применения методологии для данного класса систем;
 - совместимости методологии с действующими стандартами и нормативными требованиями.
3. Адаптация выбранной методологии к условиям конкретного проекта за счет:
 - конкретизации принципов и методов обеспечения отказоустойчивости с учетом доступных технологий;
 - разработки детальных моделей угроз, сценариев отказов и стратегий восстановления;
 - определения критериев и процедур верификации и валидации проектных решений.
4. Итеративная разработка и тестирование прототипов с целью:
 - проверки базовых концепций и архитектурных решений на ранних этапах проекта;
 - анализа границ применимости и настройки параметров моделей ии в контуре отказоустойчивости;
 - получения исходных данных для обучения моделей на основе обобщения опыта тестовой эксплуатации.

5. Обеспечение необходимой инфраструктуры сбора, хранения и обработки данных, в т. ч.:
 - развертывание распределенных средств мониторинга и сбора диагностической информации;
 - создание хранилищ структурированных и неструктурированных данных, покрывающих жизненный цикл компонентов;
 - разработка конвейеров обработки данных, ориентированных на извлечение признаков отказов.
6. Организация процессов управления знаниями, направленных на:
 - систематизацию и формализацию экспертных знаний о моделях поведения системы при отказах;
 - сбор, анализ и обобщение опыта диагностики и локализации сбоев в процессе эксплуатации;
 - непрерывную актуализацию базы знаний с учетом извлеченных уроков и изменений системы.

Дополнительно необходимо уделить внимание вопросам обучения персонала методам и средствам обеспечения отказоустойчивости РСУТП на основе современных интеллектуальных технологий.

Заключение

Выполненное исследование позволяет сделать вывод, что проблема построения отказоустойчивых распределенных систем управления технологическими процессами является одной из центральных в современной теории и практике промышленной автоматизации. Возрастающая сложность, масштабы и критичность функций РСУТП диктуют необходимость развития методологии обеспечения их устойчивости к отказам, сбоям и непредвиденным ситуациям.

Ретроспективный анализ показывает, что концепции отказоустойчивости прошли долгий эволюционный путь — от базовых принципов резервирования до современных проактивных стратегий на основе предиктивной аналитики и интеллектуальной поддержки принятия решений. Ключевыми принципами построения отказоустойчивых РСУТП нового поколения становятся адаптивная самоорганизация архитектуры, проактивное управление рисками, интеграция методов ИИ на всех этапах функционирования.

Накопленный научный задел и практический опыт позволил систематизировать основные методы обеспечения устойчивости РСУТП, включающие различные виды структурного резервирования, средства обеспечения программной надежности, алгоритмы реконфигурации и восстановления. При этом магистральным направлением развития является применение технологий ИИ для построения адаптивных систем, способных к самообучению и интеллектуальной поддержке операторов в нештатных ситуациях.

Сравнительный анализ перспективных методологий построения интеллектуальных отказоустойчивых РСУТП, включая многоагентный подход, мультиверсионное программирование, проактивное обслуживание и адаптивные архитектуры, показывает, что каждая из них имеет свои особенности и ограничения. Ни одна из рассмотренных методологий не является универсальной, их выбор и адаптация должны выполняться на основе детального анализа требований к надежности и безопасности конкретной системы с учетом доступных ресурсов и

апробированных практик. Наиболее перспективным представляется комбинированное использование принципов разных методологий при системной интеграции методов обеспечения отказоустойчивости на различных уровнях архитектуры РСУТП.

Сформулированные по результатам исследования рекомендации определяют общую схему процесса формирования методологического базиса для построения отказоустойчивой РСУТП. Предложенный подход предполагает поэтапное проведение комплексного анализа требований, обоснованный выбор базовой методологии, ее адаптацию к условиям конкретного проекта, итеративную разработку, верификацию и валидацию проектных решений, а также создание инфраструктуры сбора данных и управления знаниями. Дополнительное внимание следует уделить вопросам интеграции разрабатываемых решений в контур управления функциональной безопасностью и надежностью РСУТП на всех стадиях жизненного цикла.

Практическое применение полученных результатов призвано повысить уровень обоснованности и системности принимаемых решений при разработке архитектур отказоустойчивых РСУТП, создать предпосылки для эффективной интеграции интеллектуальных технологий в процессы обеспечения их надежного функционирования. Вместе с тем внедрение разработанных рекомендаций требует дополнительных эмпирических исследований, накопления опыта и формирования доказательной базы в каждой из предметных областей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жабборов, Ш.З. Разработка системы управления технологическим процессом / Ш.З. Жабборов, Л.В. Дубровец, А.Ш. Тиляев // Вестник магистратуры. — 2020. — № 3-3(102). — С. 45–47. — EDN CSYSWY.
2. Paliukh, B.V. The mechanism of optimal control of the evolution of continuous technological systems / B.V. Paliukh, I.A. Egereva // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем. — 2020. — № 4. — С. 153–156. — EDN HQMSCP.
3. Максименко, В.Н. Программно-настраиваемые однородные вычислительные структуры и системы и «Искусственный интеллект» / В.Н. Максименко // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. — 2020. — Т. 10, № 3. — С. 31–37. — EDN THLZEN.
4. Кашеварова, Н.А. Интеграция блокчейна и искусственного интеллекта как механизма модернизации различных отраслей экономики / Н.А. Кашеварова, М.Е. Куликова — DOI 10.26425/1816-4277-2024-5-54-67. // Вестник университета. — 2024. — № 5. — С. 54–67 — EDN YMKWPE.
5. Луков, Д.К. Автоматизированные системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) / Д.К. Луков // European Science. — 2019. — № 2(44). — С. 19–21. — EDN MCVTSP.
6. Методический подход к выявлению деструктивных информационных воздействий на распределенную систему управления технологическим процессом / И.С. Гефнер, С.М. Коваленко, А.С. Суховерхов, С.В. Соловьев — DOI 10.26583/bit.2020.1.10. // Безопасность информационных технологий. — 2020. — Т. 27, № 1. — С. 111–118 — EDN NISZCD.
7. Применение инвариантного подхода в самодиагностике распределенной системы управления технологическим процессом / С.А. Панычев, А.И. Панычев, А.В. Максимов, А.Г. Байбуз // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. — 2020. — № 4(71). — С. 69–76. — EDN TEIXWU.

8. Закирзянов, Р.М. Критерии выбора оптимальной структуры распределенной системы управления технологическими процессами крупных промышленных предприятий / Р.М. Закирзянов // Математические методы в технологиях и технике. — 2024. — № 10. — С. 17–23. — EDN WVOPZN.
9. Садыкова, Э.Ф. Разработка распределенной системы управления технологическим процессом абсорбции хлористого водорода / Э.Ф. Садыкова // Фундаментальные научно-практические исследования: Сборник научных трудов по материалам VII Международной научно-практической конференции, Анапа, 30 ноября 2024 года. — Анапа: ООО «Научно-исследовательский центр экономических и социальных процессов» в Южном Федеральном округе, 2024. — С. 9–13. — EDN VCGBGI.
10. Применение GSM-модема в распределенных автоматизированных системах управления технологическим процессом / Д.М. Мусиенко, П.П. Иванов, С.Г. Пачкин, Я.Е. Гейгер // Пищевые инновации и биотехнологии: Сборник тезисов X Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Кемерово, 17 мая 2022 года / Под общей редакцией А.Ю. Просекова. Том 2. — Кемерово: Кемеровский государственный университет, 2022. — С. 45–46. — EDN PCVFPP.
11. Промыслов, В.Г. Проблемы синхронизации времени в распределенных атомизированных системах управления технологическими процессами / В.Г. Промыслов, К.В. Семенов, М.Ю. Тимофеев — DOI 10.25728/mlsd.2020.1431. // Управление развитием крупномасштабных систем mlsd'2020: Труды тринадцатой международной конференции, Москва, 28–30 сентября 2020 года / Под общей редакцией С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна. — Москва: Институт проблем управления имени В.А. Трапезникова РАН, 2020. — С. 1431–1437 — EDN YRMQRN.
12. Автоматизированные системы контроля технического состояния магистральных трубопроводов / Р.Г. Дубровин, В.Н. Таламанов, Г.Л. Козенкова [и др.] — DOI 10.34046/aumsuomt107/18. // Эксплуатация морского транспорта. — 2023. — № 2(107). — С. 107–113 — EDN FISIGZ.
13. Кашинский, И.Д. Архитектура систем управления проектами / И.Д. Кашинский // Студенческий. — 2020. — № 20-1(106). — С. 45–46. — EDN KAZQCA.
14. Краснокутский, Е.Л. Формирование архитектуры системы проектного управления клиентоориентированной компании на основе комплексного моделирования бизнес-процессов / Е.Л. Краснокутский // Наука, образование, инновации: актуальные вопросы и современные АСПЕКТЫ: сборник статей VII Международной научно-практической конференции. В 2 ч., Пенза, 10 мая 2021 года. Том 2. — Пенза: Наука и Просвещение, 2021. — С. 10–12. — EDN YGIDTN.
15. Методика разработки отказоустойчивых программных средств автоматизированных систем управления технологическими процессами / А.В. Баев, А.В. Самонов, С.В. Краснов, С.Р. Малышев — DOI 10.35752/1991-2927_2022_3_69_88. // Автоматизация процессов управления. — 2022. — № 3(69). — С. 88–96 — EDN PFECNB.
16. Прокопайло, А.А. Отказоустойчивость систем / А.А. Прокопайло, А.С. Отакулов // Modern Science. — 2020. — № 12-3. — С. 316–318. — EDN ODKCMH.

Goncharov Andrey Vitalievich

Moscow State University of Technology and Management
named after K.G. Razumovsky (First Cossack University), Moscow, Russia
E-mail: a.goncharov@mguttm.ru

Cherkassova Maria Anatolyevna

Moscow State University of Technology and Management
named after K.G. Razumovsky (First Cossack University), Moscow, Russia
E-mail: marusya.7908@mail.ru

Formation of methodological foundations for building fault-tolerant distributed control systems for technological processes with elements of artificial intelligence

Abstract. The study is devoted to the analysis of methodological approaches to building fault-tolerant distributed process control systems (DPCS) using elements of artificial intelligence (AI). The paper presents a retrospective analysis of the evolution of fault-tolerance concepts, tracing the path from the basic principles of redundancy to modern adaptive architectures based on predictive analytics. The key principles and methods for ensuring fault tolerance are systematized, including multi-level redundancy, functional decomposition, proactive reconfiguration and intelligent monitoring. Particular attention is paid to the analysis of the application of AI methods for solving problems of early anomaly detection, fault diagnostics, failure prediction and recovery planning. Promising architectures for integrating AI components into the fault-tolerance control loop of DPCS are considered. A comparative analysis of modern methodologies for building intelligent fault-tolerant systems is carried out, their features, advantages and limitations are identified. Practical recommendations are offered for the selection and adaptation of the methodology, taking into account the specifics of the subject area and system reliability requirements. The results of the conducted study convincingly demonstrate that the effective use of artificial intelligence elements allows for a qualitative increase in the stability of distributed process control systems to various types of failures and anomalies. However, the realization of the potential of intelligent technologies requires a comprehensive methodological approach that takes into account the structural and functional features of a specific system, existing resource constraints and potential risks associated with the integration of new technologies into critical production systems.

Keywords: distributed control systems; fault tolerance; artificial intelligence; intelligent data analysis; machine learning; proactive control; multi-agent systems; adaptive architectures; functional safety; reliability