

УДК 004.89:004.78

© С.А. Бояшов, В.Д. Колычев, 2025

Использование цифровых двойников и технологий искусственного интеллекта в автоматизированных системах управления технологическими процессами

С.А. Бояшов

студент 1 курса магистратуры НИЯУ МИФИ, Москва

E-mail: seralboyashov@rasu.ru

В.Д. Колычев

к.т.н, доцент кафедры финансового мониторинга НИЯУ МИФИ, Москва

E-mail: vdkolychev@gmail.com

Аннотация: Актуальность тематики исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности и надёжности эксплуатации атомных электростанций в условиях растущих требований к безаварийности работы, устойчивости, надёжности, сокращению фактора случайных воздействий и цифровизации инфраструктуры промышленных предприятий в современных условиях. Развитие и внедрение цифровых двойников с элементами искусственного интеллекта в АСУ ТП АЭС позволяют создать принципиально новые подходы к диагностике, прогнозированию и оптимизации технологических процессов, что особенно важно в условиях удлинения сроков эксплуатации энергоблоков и необходимости их модернизации без остановки производства.

Ключевые слова: киберфизические комплексы, жизненный цикл, цифровые двойники реакторных установок, технологии искусственного интеллекта, управление технологическими процессами.

Using digital twins and artificial intelligence technologies in automated process control systems

S.A. Boyashov

1-st year Master's student at NRNU MEPhI, Moscow

E-mail: seralboyashov@rasu.ru

V.D. Kolychev

PhD, Associate Professor, Department of Financial Monitoring

NRNU MEPhI, Moscow

E-mail: vdkolychev@gmail.com

Abstract: The relevance of the research topic is due to the need to improve the efficiency and reliability of nuclear power plant operation in the context of increasing requirements for accident-free operation, stability, reliability, reduction of the factor of random influences, and digitalization of the infrastructure of industrial enterprises in modern conditions. The development and implementation of digital twins with elements of artificial intelligence in the automated process control systems of nuclear power plants allow for the creation of fundamentally new approaches to diagnostics, forecasting, and optimization of technological processes, which is especially important in the context of extending the operating life of power units and the need to modernize them without stopping production.

Keywords: cyber-physical systems, life cycle, digital twins of reactor units, artificial intelligence technologies, and process control.

Введение

Современная промышленность переживает глубокую трансформацию, обусловленную переходом к цифровым технологиям и интеграцией интеллектуальных систем в процессы управления производством. В энергетическом секторе, и особенно в атомной отрасли, эти изменения приобретают стратегическое значение, поскольку от эффективности и надёжности автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) напрямую зависят безопасность, производительность и экономическая целесообразность принимаемых решений на предприятиях.

В последние годы развитие цифровых технологий, искусственного интеллекта (ИИ) и концепции цифровых двойников (Digital Twin) определяет новые принципы функционирования промышленных систем. Цифровой двойник, представляющий собой виртуальную модель физического объекта или процесса, позволяет в реальном времени выполнять мониторинг состояния оборудования, прогнозировать возможные отклонения и оптимизировать технологические режимы. Интеграция предлагаемых моделей с компонентами и технологиями искусственного интеллекта обеспечивает переход от реактивного к проактивному управлению, когда система способна не только фиксировать отклонения, но и прогнозировать их возникновение.

Методы исследования

Надёжность и безопасность имеют критическое значение для объектов атомной энергетики, поэтому масштабное формирование цифровых двойников и внедрение технологий ИИ является эволюционным механизмом развития систем управления. В настоящее время АСУ ТП АЭС представляют собой сложные киберфизические комплексы, объединяющие датчики, контроллеры, вычислительные системы и программные модули в

единую интеллектуальную среду. Применение цифровых двойников в сочетании с алгоритмами машинного обучения и нейронными сетями раскрывает возможности разработки интеллектуальных систем мониторинга и управления, способных обеспечивать устойчивую работу энергоблоков в различных режимах, включая переходные и аварийные.

Программа «Цифровой Росатом», начиная с 2018 года, ориентирована на создание единой унифицированной цифровой среды управления процессами жизненного цикла АЭС, включающей прототипирование и разработку, строительство, эксплуатацию и вывод из эксплуатации объектов на основе цифровых двойников реакторных установок и внедрения технологий искусственного интеллекта в основные и обеспечивающие процессы.

Предлагаемые методы исследования позволяют получить результаты при разработке и модернизации систем управления атомными электростанциями, при разработки цифровых платформенных решений технического обслуживания и диагностики состояния сложных объектов и могут быть применены в рамках реализации программ цифровизации Госкорпорации «Росатом» и повышения конкурентоспособности российской атомной энергетики на международном рынке.

Используемые подходы при воздании современных автоматизированных систем управления технологическими процессами

Развитие автоматизированных систем управления технологическими процессами атомных электростанций представляет собой последовательную трансформацию технологических подходов, обусловленную как совершенствованием элементной базы и вычислительных возможностей, так и ужесточающимися требованиями к безопасности, эффективности и адаптивности управления ядерными энергетическими установками.

Принципиальным преимуществом цифровых систем управления стала возможность программной реализации практически любых алгоритмов управления, включая адаптивные, нечёткие и предиктивно-прогнозные стратегии, без изменения аппаратной конфигурации оборудования. Это обеспечило высокий уровень гибкости при адаптации систем управления к изменяющимся требованиям эксплуатации и позволило оперативно вносить коррективы в алгоритмы функционирования защит и блокировок на основе накопленного опыта эксплуатации и результатов анализа критических или нежелательных ситуаций.

Формирование распределённых систем управления, построенных на базе цифровых промышленных сетей транслирования данных с технологией пакетной коммутации и стандартизированными механизмами взаимодействия позволяет перераспределить функции управления между

множеством взаимодействующих контроллеров и интеллектуальных полевых устройств, способных выполнять локальный анализ данных и начальную диагностику своего состояния.

Развитие современных АСУ ТП атомных электростанций характеризуется переходом к интеллектуальным платформенным решениям, объединяющим промышленные технологии интернета вещей с подключением десятков тысяч интеллектуальных датчиков и устройств, системы формирования, сбора, обработки и анализа данных большого объема до петабайтов в течение жизненного цикла энергоблока и элементами искусственного интеллекта на основе методов глубокого машинного обучения и механизмов нейронных сетей.

Повышение эффективности и безопасности эксплуатации АЭС, реализуется за счет трансформации реактивного управления, основанного на реагировании на отклонения контролируемых параметров от заданных установок после их возникновения, к предиктивному управлению, основанному на прогнозировании состояния оборудования с горизонтом от нескольких часов до квартала и предупреждении нештатных ситуаций до их развития.

Внедрение алгоритмов машинного обучения, включая методы случайного леса, градиентного бустинга и рекуррентных нейронных сетей, позволяет определить скрытые закономерности в поведении технологических систем, недоступные для обнаружения известными и широко используемыми статистическими методами или методами экспертного анализа, и формировать модели износа оборудования для оптимизации стратегий технического обслуживания и планово-предупредительных ремонтов с переходом от планово-предупредительной системы к обслуживанию по фактическому состоянию.

В настоящее время интеллектуальные платформы обеспечивают интеграцию данных не только от штатных систем контроля и управления технологическими параметрами, включающих десятки тысяч измерительных каналов, но и от дополнительных приборов, собирающих информацию о техническом состоянии оборудования, включая системы вибродиагностики с частотой скважности до 100 кГц для мониторинга состояния подшипников и роторов вращающихся механизмов, систем контроля разрушения и искривления поверхностей за счет тепловизионного анализа с разрешением 0,1 градуса Цельсия для обнаружения локальных перегревов электрооборудования, акустической эмиссии для выявления зарождающихся трещин в сварных соединениях и металлических конструкциях, триботехнического мониторинга для анализа продуктов износа в смазочных материалах, что формирует целостную картину технического состояния всех критически важных систем энергоблока в режиме реального времени. Применение методов

многомерного статистического анализа, включая анализ главных компонент и кластерный анализ, а также технологий нейросетевого анализа с архитектурой типа автоэнкодера позволяет идентифицировать аномальные режимы работы оборудования на ранних этапах формирования отклонений, задолго до срабатывания штатных защит и блокировок, что обеспечивает возможность планового вывода оборудования в ремонт без аварийных остановов энергоблока.

В 2018 году Госкорпорация «Росатом» сформировало стратегию «Цифровой Росатом», определяющую приоритеты развития цифровых технологий в отрасли до 2030 года и интеграцию атомной энергетики в общемировые тенденции индустрии 4.0. Стратегия предусматривает формирование единой цифровой платформы управления этапами жизненного цикла АЭС на основе облачных технологий, внедрение технологий промышленного интернета вещей с подключением интеллектуальных датчиков и устройств, применение искусственного интеллекта и машинного обучения для оптимизации технологических процессов и режимов эксплуатации оборудования, разработка систем дистанционного мониторинга и управления с возможностью централизованного контроля нескольких энергоблоков из единого центра управления.

Параллельно развивались работы по созданию отечественных средств автоматизации и элементной базы, независимых от зарубежных поставщиков, что приобрело особую актуальность в контексте программы импортозамещения. В условиях международных санкций, введённых после 2014 года, задача технологической независимости в сфере критически важных технологий управления получила стратегическое значение для обеспечения энергетической безопасности государства. Российские производители, включая концерн «Автоматика» Госкорпорации «Росатом», ВНИИА им. Н.Л. Духова, НПО «Марс» и ряд других предприятий оборонно-промышленного комплекса, создали линейки программируемых контроллеров, серверного оборудования и специализированного и доверенного программного обеспечения, соответствующих требованиям атомной энергетики по безопасности, надёжности и радиационной стойкости.

К 2020 году завершилась реализация масштабного проекта цифровизации систем обработки информации и управления процессами для Балаковской АЭС, ставшего пилотным для программы модернизации парка действующих станций. Полученные результаты реализованного проекта продемонстрировал возможность поэтапной замены морально устаревших аналоговых систем современными цифровыми без остановки энергоблоков, являясь критически важным для сохранения выработки электроэнергии, и подтвердил экономическую эффективность такой

модернизации за счёт снижения эксплуатационных затрат на 12-15%, повышения коэффициента использования установленной мощности до 85-90% и сокращения продолжительности плановых ремонтов на 10-20%.

Использование цифровых двойников при создании систем автоматизации и управления процессами

Современный этап развития АСУ ТП атомных электростанций характеризуется переходом к интеллектуальным системам управления нового поколения, использующим передовые технологии искусственного интеллекта, включая алгоритмы глубокого обучения, рекуррентные и свёрточные нейронные сети, а также концепцию цифровых двойников для виртуального моделирования и оптимизации технологических процессов. В 2021-2024 годах на нескольких российских АЭС, включая Калининскую, Ростовскую и Смоленскую, были внедрены в опытно-промышленную эксплуатацию системы предиктивной аналитики и диагностирования работы технологического оборудования, способные прогнозировать возникновение неисправностей с горизонтом от нескольких суток до нескольких месяцев на основе анализа тенденции изменения параметров, а также вибрационных характеристик и результатов статистического анализа и обработки собранных данных эксплуатации за десятки лет функционирования. Эти системы интегрированы с цифровыми двойниками основного оборудования, представляющими собой высокоточные математические алгоритмы и модели главного реактора, турбины, парогенераторов и вспомогательного оборудования, и обеспечивают оптимизацию графиков планово-предупредительных ремонтов с переходом к обслуживанию по фактическому техническому состоянию.

В рамках промышленной революции Industry 4.0 цифровые двойники стали одним из ключевых элементов умного производства и киберфизических систем.

Современные разработанные цифровые двойники оказываются возможным классифицировать по объекту моделирования, целям применения и степени интеграции в производственные процессы. Наиболее распространённая классификация выделяет три типа двойников: цифровой двойник продукта, цифровой двойник процесса и цифровой двойник производства.

Цифровые двойники различаются также по масштабам применения: от отдельных узлов и агрегатов (asset-level) до современных корпоративных систем уровня (enterprise-level).

Структура цифрового двойника представляет собой совокупность взаимосвязанных компонентов, включающих физический объект, виртуальную модель, систему передачи данных и аналитическую платформу.

Аналитическая часть системы применяет методы статистической обработки, машинного обучения и прогнозной аналитики, что позволяет выявлять скрытые закономерности и прогнозировать поведение объекта при различных условиях эксплуатации.

Основу функционирования цифровых двойников составляют промышленные сети передачи данных и стандарты взаимодействия, такие как OPC UA, MQTT или Modbus TCP, которые обеспечивают двусторонний обмен данными между физическими и виртуальными элементами. Ключевую роль играет механизм интеграции с существующими на предприятии системами автоматизации — MES, SCADA и PDM, что позволяет использовать цифровой двойник как надстроечный уровень для оптимизации управления технологическими и организационными процессами.

Важное значение цифровые двойники имеют в системах предиктивной диагностики. Интеграция цифровой модели с реальными данными позволяет прогнозировать возможные неисправности оборудования задолго до их возникновения.

Ключевыми ограничениями при внедрении цифровых двойников в атомной отрасли являются аспекты кибербезопасности и защиты критически важных данных. Ввиду того, что цифровой двойник требует непрерывного обмена данными в режиме реального времени с другими системами, необходимо гарантировать целостность каналов передачи информации и минимизировать риски внешнего вмешательства.

Применение цифровых двойников в промышленности, особенно в атомной энергетике, позволяет создавать интегрированные интеллектуальные системы управления, обеспечивающие высокий уровень безопасности, отказоустойчивости и экономической эффективности эксплуатации сложных технологических объектов.

Цифровые двойники становятся инструментом оптимизации производственных процессов и технологией формирования единого цифрового пространства предприятия, где проектирование, эксплуатация и обслуживание оборудования объединены в единую цифровую среду.

В сочетании с современными методами искусственного интеллекта цифровые двойники открывают возможности для перехода к полностью автоматическим киберфизическим системам управления, что определяет их ключевую роль в будущих тенденциях в области промышленной автоматизации.

Классификация технологий искусственного интеллекта, применимых в автоматизированных системах управления технологическими процессами (АСУ ТП), включает несколько направлений, каждое из которых выполняет определённые функции в контуре управления, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Классификация технологий искусственного интеллекта, применимых в АСУ ТП АЭС

Направление ИИ	Основные методы	Цель и область применения	Примеры в энергетике
Машинное обучение	Регрессия, деревья решений, случайный лес	Прогнозирование параметров, анализ технического состояния оборудования	Предиктивная диагностика турбин и насосов
Глубокое обучение	Свёрточные и рекуррентные нейронные сети	Распознавание сложных зависимостей, обработка сигналов и изображений	Анализ вибрационных и тепловых данных
Экспертные системы	Правила логического вывода, базы знаний	Поддержка принятия решений оператором	Анализ аварийных ситуаций на АЭС
Нечёткая логика	Fuzzy-модели и гибридные алгоритмы	Управление при неопределённости, адаптация к изменяющимся условиям	Оптимизация регулирования температуры и давления
Системы поддержки решений	Байесовские сети, сценарное моделирование	Интеллектуальная помощь при выборе управляющих воздействий	Поддержка оперативного управления энергоблоками

На Нововоронежской и Калининской АЭС действуют пилотные системы, использующие технологии глубокого машинного обучения для прогнозирования состояния насосных агрегатов и теплообменников, что позволяет снизить риск внеплановых простоев и повысить эффективность эксплуатации энергоблоков.

Основные тенденции и тренды в развитии современных технологий ИИ в энергетике и промышленности представлены в таблице 2. Они содержат интеллектуальные методы анализа данных эксплуатации оборудования, методы и модели предиктивной диагностики, методы и модели автоматизации инженерных расчётов и моделирование на основе цифровых двойников, формируя положительный эффект от их использования.

Таблица 2 – Примеры интеграции технологий искусственного интеллекта в промышленные системы управления

Отрасль применения	Цель внедрения ИИ	Используемые технологии	Эффект от использования
Теплоэнергетика	Предиктивная диагностика турбин	Нейронные сети, машинное обучение	Снижение аварийных простоев на 25–30%
Атомная энергетика	Мониторинг состояния реакторного оборудования	Гибридные экспертные системы	Повышение надёжности и безопасности эксплуатации
Нефтегазовая отрасль	Оптимизация бурения и транспорта нефти	Глубокое обучение, анализ больших данных	Сокращение издержек на 15–20%
Металлургия	Управление технологическими режимами	Fuzzy-логика, системы поддержки решений	Повышение качества продукции и энергоэффективности
Машиностроение	Автоматизация проектирования	Генеративные алгоритмы ИИ	Сокращение цикла разработки изделий

В энергетике активно развиваются интеллектуальные системы прогнозирования нагрузки и распределения мощности, использующие нейронные сети для оценки изменения потребления электроэнергии в зависимости от времени суток, температуры, сезонных факторов и технологических условий. Применение подобных алгоритмов позволяет повышать эффективность работы энергосистемы, снижать потери и обеспечивать стабильность режима.

Мировой опыт демонстрирует значительное ускорение внедрения технологий искусственного интеллекта в промышленный сектор за последнее десятилетие. Компании Siemens, General Electric, Schneider Electric и Honeywell используют ИИ в системах управления производственными линиями, контроле качества и оптимизации энергопотребления. На электростанциях EDF во Франции применяются нейронные сети для прогнозирования состояния реакторного оборудования и предотвращения нештатных ситуаций. В Японии корпорации Hitachi и Mitsubishi внедряют интеллектуальные системы анализа данных вибродиагностики и акустического мониторинга для раннего выявления деградации оборудования.

Заключение

Интеграция ИИ с цифровыми двойниками промышленных объектов обеспечивает формирование самонастраивающихся киберфизических

систем, где виртуальная модель не только отражает текущее состояние, но и прогнозирует его изменение на основе обучаемых алгоритмов.

Возникающий при этом синергетический эффект открывает возможность перехода к адаптивным системам управления, в которых искусственный интеллект использует данные цифрового двойника для оптимизации производственных параметров, а цифровой двойник уточняет расчёты на основе реальных данных эксплуатации.

Широкое использование технологий искусственного интеллекта сопровождается рядом ограничений. Основные из них связаны с необходимостью сертификации моделей, обеспечением прозрачности алгоритмов принятия решений, защитой данных и требованиями информационной безопасности критически важных объектов.

В атомной отрасли эти вопросы имеют важнейшее значение, так как сбои или ошибки в функционировании алгоритмов, построенных на основе технологий ИИ могут привести к критическим последствиям.

Развитие технологий искусственного интеллекта в данной сфере должно основываться на принципах надёжности, объяснимости и управляемости с обязательным сохранением роли человека в контуре принятия решений.

Таким образом, искусственный интеллект становится фундаментом новой эпохи промышленной автоматизации. Его интеграция с цифровыми двойниками и технологиями промышленного интернета вещей создаёт предпосылки для появления интеллектуальных, самообучающихся и адаптивных методов управления, обеспечивающих повышенную безопасность, надёжность и высокую эффективность эксплуатации объектов атомной энергетики и других отраслей критической инфраструктуры.

Список использованных источников:

1. Аверкин, А.Н. Применение технологий искусственного интеллекта в системах управления атомных электростанций / А.Н. Аверкин, С.А. Рыжов // Программная инженерия. – 2019. – Т. 10, № 3. – С. 131-140.
2. Баранов, В.Г. Автоматизация управления непрерывными технологическими процессами / В.Г. Баранов, Г.Л. Зайцев, В.А. Карпенко. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 560 с.
3. Башлыков, А.А. Безопасность и надёжность технических систем: учебник / А.А. Башлыков, Б.Г. Ильясов, Е.Ю. Барзилович. – М.: Машиностроение, 2012. – 424 с.
4. Гривз, М. Цифровой двойник: производственное превосходство через виртуальное совершенство продукта / М. Гривз // Инновации. – 2016. – № 7 (213). – С. 34-42.

5. ГОСТ Р МЭК 61513-2014. Атомные станции. Контрольно-измерительные приборы и системы управления, важные для безопасности. Общие требования к системам.

6. Демин, В.В. Концепция цифрового двойника для атомной энергетики / В.В. Демин, А.И. Петров // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2020. – № 2. – С. 5-15.

7. Жук, И.М. Эволюция систем управления и защиты энергоблоков АЭС с реакторами ВВЭР / И.М. Жук, В.К. Долгов // Атомная энергия. – 2018. – Т. 124, вып. 2. – С. 67-74.

8. Королёв, С.А. Применение методов машинного обучения для предиктивной диагностики оборудования АЭС / С.А. Королёв, Д.В. Иванов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Приборостроение». – 2021. – № 1. – С. 108-121.

9. Левин, В.И. Структурно-логические методы исследования сложных систем с применением ЭВМ / В.И. Левин. – М.: Наука, 1987. – 304 с.

10. Махутов, Н.А. Цифровые технологии для оценки технического состояния и прогнозирования ресурса объектов критически важной инфраструктуры / Н.А. Махутов, Д.О. Резников // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2019. – № 4. – С. 5-17.

11. Михайлов, В.Н. Цифровизация атомной отрасли: стратегия и перспективы / В.Н. Михайлов // Автоматизация в промышленности. – 2019. – № 9. – С. 14-19.

12. НП-001-15. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. – М.: Ростехнадзор, 2016.

13. НП-026-16. Требования к управляющим системам, важным для безопасности атомных станций. – М.: Ростехнадзор, 2016.

14. Острейковский, В.А. Теория надёжности: учебник для вузов / В.А. Острейковский. – М.: Высшая школа, 2003. – 463 с.

15. Отчёт о деятельности концерна «Росэнергоатом» за 2022 год. – М.: Росэнергоатом, 2023. – 156 с.

16. Поваров, В.П. Интеллектуальные системы управления энергоблоками АЭС / В.П. Поваров, И.А. Беседин // Теплоэнергетика. – 2020. – № 5. – С. 23-32.

17. РБ-152-18. Рекомендации по верификации и валидации программного обеспечения систем, важных для безопасности атомных станций. – М.: Ростехнадзор, 2018.

18. Стратегия цифровой трансформации Госкорпорации «Росатом». – М.: Росатом, 2018. – 42 с.

19. Федеральный закон от 21 ноября 1995 г. № 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии» (с изменениями и дополнениями).

20. Grieves, M. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication / M. Grieves // White Paper. – 2014. – 7 p.

21. IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-3.12. Core Knowledge on Instrumentation and Control Systems in Nuclear Power Plants / International Atomic Energy Agency. – Vienna, 2011. – 156 p.
22. IEC 61513:2011. Nuclear power plants – Instrumentation and control important to safety – General requirements for systems / International Electrotechnical Commission. – Geneva, 2011.
23. Lee, J. Industrial Artificial Intelligence for industry 4.0-based manufacturing systems / J. Lee, H. Davari, J. Singh, V. Pandhare // Manufacturing Letters. – 2018. – Vol. 18. – P. 20-23.
24. NUREG/CR-6303. Method for Performing Diversity and Defense-in-Depth Analyses of Reactor Protection Systems / U.S. Nuclear Regulatory Commission. – Washington, 1994. – 98 p.
25. Tao, F. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art / F. Tao, H. Zhang, A. Liu, A.Y.C. Nee // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2019. – Vol. 15, No. 4. – P. 2405-2415.