

СТАТЬЯ

УДК 338.3:330
DOI 10.17513/fr.43934

**ЦИФРОВЫЕ АДАПТИВНЫЕ МОДЕЛИ И ТЕХНОЛОГИИ
КАК ФАКТОР ЭВОЛЮЦИИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
В ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ОТРАСЛЯХ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

**Митяков Е.С. ORCID ID 0000-0001-6579-0988,
Карпухина Н.Н. ORCID ID 0000-0003-3378-5230,
Ладынин А.И. ORCID ID 0000-0001-7659-2581**

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«МИРЭА – Российский технологический университет», Москва, Российская Федерация,
e-mail: andrey.ladynin@hotmail.com*

Современный этап технологического развития, характеризующийся переходом к шестому технологическому укладу и реализацией принципов Индустрии 5.0, порождает новые требования к системам управления промышленными предприятиями. В условиях непрерывного роста сложности производственных процессов и усиления неопределенности операционной среды традиционные системы управления не в полной мере удовлетворяют задачам оперативной адаптации к возникающим вызовам. Сохраняется разрыв между возможностями концепции цифровых двойников и требованиями к проактивной адаптивности. Целью работы является концептуальное проектирование архитектуры производственных систем управления на базе цифровых адаптивных моделей, представляющих следующий этап развития цифровых двойников. Предложена и формализована концепция цифровой адаптивной модели с трехуровневой архитектурой, включающей когнитивный, прогнозный и исполнительный контуры. Представлена архитектура систем управления на основе кооперации цифровых адаптивных моделей. Проведена систематизация методов и технологий для их построения, результатом которой является вывод о значимости гибридного подхода, объединяющего методы машинного обучения и численной оптимизации. Разработана методика оценки эффективности, охватывающая операционные, экономические и системные аспекты функционирования адаптивных систем управления. Показано, что для достижения эффектов от интеграции цифровых адаптивных моделей с архитектурой систем управления необходимо обеспечить синергию взаимодействия их компонентов.

Ключевые слова: промышленные экосистемы, цифровая адаптивная модель, адаптивная система управления, цифровой двойник, искусственный интеллект, Интернет вещей

**DIGITAL ADAPTIVE MODELS AND TECHNOLOGIES
AS HIGH-TECH INDUSTRIES CONTROL SYSTEMS
EVOLUTION FACTOR**

**Mityakov E.S. ORCID ID 0000-0001-6579-0988,
Karpukhina N.N. ORCID ID 0000-0003-3378-5230,
Ladynin A.I. ORCID ID 0000-0001-7659-2581**

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“MIREA – Russian Technological University”, Moscow,
Russian Federation, e-mail: andrey.ladynin@hotmail.com*

Current technological development stage, marked by the transition to sixth technological paradigm and Industry 5.0 principles implementation, generates new requirements for industrial enterprise management systems. Considering production processes complexity increase and operational environment uncertainty growth, traditional management systems demonstrate insufficient capabilities for rapid adaptation. Despite digital twin concepts widespread adoption, a gap persists between its functionalities and proactive adaptability demands. Study's aim is in industrial control system architecture conceptual design, with digital adaptive models, the next evolutionary step beyond digital twins. The paper proposes and formalizes digital adaptive model concept featuring a three-level architecture, comprising cognitive, predictive, and executive loops. Management systems architecture is introduced, built upon cooperating digital adaptive models. Methods and technologies review for constructing such models reveals that a hybrid approach, which integrates machine learning and numerical optimization techniques, holds significant promise. Furthermore, an evaluation methodic is developed that encompasses systems' performance operational, economic and systemic aspects. The study demonstrates that digital adaptive models' integration benefits into management system architectures requires ensuring synergistic interaction among its components.

Keywords: industrial ecosystems, digital adaptive model, adaptive control system, digital twin, artificial intelligence, Internet of Things

Введение

Шестой технологический уклад и парадигма Индустрии 5.0, затрагивают не только производственные процессы, но саму архитектуру мировой экономики. В условиях

глобализации, фрагментации международных цепочек создания стоимости и роста геополитической и макроэкономической волатильности возникают принципиально новые требования к системам управления

в высокотехнологичных секторах мировой экономики. Одной из ключевых особенностей нового витка развития промышленных экосистем является рост сложности межорганизационных отношений и неопределенность операционной среды, обусловленные действием множества факторов. К основным из них относятся: персонализация глобального потребительского спроса, изменения жизненных циклов продукта, усложнение логистики и ужесточение ESG-требований на международных рынках. В этих условиях традиционные иерархические системы, в основе которых лежат детерминированные модели управления и локальной оптимизации, демонстрируют неспособность к оперативной адаптации в условиях глобальных шоков. Особенно остро эта проблема проявляется в контексте глобальных производственных экосистем, где устойчивость системы зависит от устойчивости каждого отдельного предприятия – ее компонента.

Несмотря на широкое распространение концепции цифровых двойников (ЦД) в промышленно развитых странах и их активное внедрение в рамках национальных стратегий цифровой трансформации, анализ прикладных решений свидетельствует о сохранении разрыва между декларируемым потенциалом технологии и ее реальной способностью обеспечивать проактивную адаптивность. Значительная часть существующих решений остается статической или реактивной: они позволяют отслеживать состояние объекта в реальном времени или моделировать последствия уже произошедших событий, но не способны к автономной реконфигурации поведения системы в ответ на прогнозируемые внешние возмущения.

Актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью преодоления этого разрыва через объединение двух актуальных направлений цифровой трансформации в глобальном контексте. Во-первых, это развитие концептуальных основ цифровых адаптивных моделей (ЦАМ) как следующего эволюционного этапа ЦД. Во-вторых, разработка сетевидной архитектуры систем управления, ядром которой выступают кооперирующиеся ЦАМ, интегрированные с передовыми технологиями: машинным обучением, промышленным Интернетом вещей, облачными вычислениями. Такой подход позволяет не только повысить устойчивость отдельных предприятий, но и обеспечить устойчивость и эффективность транснациональных производственных и логистических сетей в условиях нестабильной глобальной экономической среды.

Материалы и методы исследования

Анализ отечественных и зарубежных научных работ демонстрирует последовательную эволюцию подходов к созданию цифровых моделей управления производственными системами. Как справедливо отмечают С.В. Смирнов и соавт. [1], фундаментальные основы концепции цифровых двойников заложены в разработке моделей с применением сквозных технологий для проектирования производственных систем. Этот подход находит дальнейшее развитие в работе В.С. Кудряшова и коллег [2], где предлагается синтез адаптивной цифровой системы управления с заданным запасом устойчивости.

Переход от теоретических основ к практической реализации демонстрируется в исследовании А.Р. Ингеманссона [3], где разрабатываются математические модели для адаптивного управления технологическими процессами. По мнению автора, адаптивное управление позволяет повысить стабильность выходных параметров при колебаниях состояния технологической системы. Это положение находит подтверждение в более масштабных исследованиях промышленного применения адаптивных систем. Эволюция подхода представлена в работе В.И. Городецкого и соавт. [4], где предложена концептуальная модель платформы для киберфизического управления. Развивая эту идею, авторы определяют цифровую экосистему как открытую, распределенную, самоорганизующуюся систему систем умных сервисов. Эта концепция прослеживается в исследованиях Н.В. Сироткиной [5] в части адаптивного развития систем управления высокотехнологичными предприятиями.

Практическая значимость разрабатываемых подходов подтверждается работами в области транспортно-логистических систем. Как демонстрируют А.Г. Некрасов и соавт. [6], принципы перехода к инновационным методам управления требуют построения адаптивных цифровых моделей на основе взаимодействия процессно-технических модулей. Это направление исследований получает дальнейшее развитие в контексте интеллектуальной трансформации, которую Р.В. Молчанова [7] определяет как этап цифровой эволюции, основанный на интеграции искусственного интеллекта и машинного обучения. Эволюционный характер преобразований подчеркивается в исследовании Ю.М. Грузиной [8], где анализируется трансформация управленческих парадигм. Переход от иерархических структур к сетевым моделям представляет собой качественное изменение подходов к управлению. Этот тезис находит подтверждение

в работе С.А. Клятецкого [9] на примере построения адаптивных организационных структур в инжиниринговом дивизионе Госкорпорации «Росатом».

Вопросы оценки эффективности адаптивных систем управления (адаптивных СУ) рассматриваются в исследованиях Л.А. Корнева [10] и А.В. Герцевой [11]. Л.А. Корнев фокусирует внимание на необходимости перехода от статичных КРП к адаптивным системам оценки, а в работе А.В. Герцевой представлена система показателей эффективности подготовки руководящих кадров в условиях цифровой трансформации. Отраслевые аспекты внедрения адаптивных систем находят отражение в работах С.А. Белоусова и соавт. [12] по агропромышленному комплексу, Ф.Ф. Мулика [13] – по нефтегазовой отрасли и И.В. Юдаева с коллегами [14] – по рациональному использованию. Обобщая их, можно прийти к выводу, что реализация адаптивных моделей управления обеспечивает значительное повышение эффективности в различных отраслях промышленности.

Междисциплинарный характер проблемы подчеркивается в работах, посвященных более широкому контексту применения цифровых технологий. Так, Т.Д. Бадараев [15] предлагает механизм цифровой трансформации как адаптивную итеративную систему, в то время как А.А. Павлов [16] проводит сравнительный анализ российской и скандинавской практик трансформации моделей управления. Работа [17] дополняет существующие разработки анализом архитектурных принципов и функциональных возможностей цифровых двойников в макроэкономическом моделировании. При этом автор справедливо отмечает существующие ограничения в части прозрачности алгоритмов и сложности управления. В контексте экономического обоснования цифровой трансформации представляет интерес исследование [18], где доказывается, что принципы Индустрии 5.0 являются необходимым развитием классической модели экономического роста Солоу. Авторы рассматривают расширенную модель с включением человеческого капитала, природных ресурсов и уровня технологий, позволяющая разрабатывать конкретные стратегии экономической политики для перехода к новому технологическому укладу.

Проблемам управления в экономике с применением цифровых технологий посвящены работы И.В. Казьминой [19] и А.В. Жаловской [20]. Применение принципов оптимизационного управления в условиях цифровой трансформации экономических систем представлено в работе М.Г. Исаева

[21]. В работе [22] А.Ю. Пошибаев исследует влияние цифровизации на эффективность деятельности организации. Цифровая трансформация открывает возможности к удаленному взаимодействию в структуре экономических систем. Например, А.А. Никифоров рассмотрел промышленные экосистемы как составляющие децентрализованного контура экономического развития [23].

Перспективы дальнейшего развития адаптивных СУ прослеживаются в исследованиях Д.Р. Мухаметова [24] и Р.В. Хуриева [25]. Проведенный анализ позволяет констатировать, что, несмотря на значительный научный задел в рассматриваемой области, остается пространство для применения теоретических подходов к существующим прикладным задачам промышленности. Обозначенные исследования выявляют необходимость создания целостной архитектуры, способной интегрировать разноуровневые решения в единую управленческую экосистему.

Цель исследования – развитие концепции цифровых двойников на основе синергии адаптивных систем управления и кооперирующихся цифровых адаптивных моделей для повышения устойчивости и эффективности промышленных систем в условиях нестабильности операционной среды.

В рамках настоящего исследования был применен комплекс теоретических и аналитических методов, среди которых необходимо выделить, инструменты системного анализа, декомпозиции и аналогии, что позволило выявить эволюцию концепции цифровых двойников и обосновать переход к цифровым адаптивным моделям. Для структурирования знаний о развитии технологии была построена классификация, на основе которой разработана таксономия цифровых двойников по уровням зрелости (дескриптивный, диагностический, прогностический, предскриптивный). Кроме того, для формализации предложенной концепции использовался математический аппарат теории множеств, позволивший представить ЦАМ и адаптивную систему управления в качестве соответствующих кортежей параметров.

Для оценки применимости различных алгоритмов и технологий при построении контуров ЦАМ был проведен сравнительный анализ методов, включающих глубокое обучение, ансамблевые модели, байесовские методы и обучение с подкреплением. Критериями сравнения выступили ключевые преимущества, ограничения и применимость в рамках предложенной архитектуры. Также была построена имитационная модель трехуровневой архитектуры ЦАМ, включающая когнитивный, прогнозный, ис-

полнительный контуры и сетевой архитектуры кооперирующихся моделей. Для оценки эффективности внедрения ЦАМ была разработана авторская методика и система индикаторов, включающая операционную, экономическую и системную проекции, агрегируемые в интегральный показатель эффективности.

Результаты исследования и их обсуждение

Актуальность эволюции концепции цифровых двойников для соответствия современным задачам промышленности представляется одним из приоритетных механизмов развития индустрии. В этой связи рассмотрим теоретический базис, формирующий основу современных профильных исследований. *Цифровой двойник (ЦД) – это динамическая цифровая реплика физического объекта, процесса или системы, обеспечивающая двустороннюю информационную связь в реальном времени между виртуальной моделью и ее физическим прототипом.* Согласно ГОСТ Р 57700.37-2021, ЦД представляет собой «систему, состоящую из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием (при наличии изделия) и (или) его составными частями» [26]. Современное понимание цифровых двойников выходит далеко за рамки статической 3D-модели: ав-

торы подчеркивают, что ЦД – это киберфизическая система, интегрирующая данные, модели, алгоритмы и знания для поддержки принятия решений на всех этапах жизненного цикла объекта.

В последние годы концепция цифровых двойников претерпела значительную трансформацию. Если на ранних этапах развития ЦД рассматривались преимущественно как инструмент виртуального прототипирования и мониторинга, то сегодня они эволюционировали в интеллектуальные и даже когнитивные системы, способные к обучению, рассуждению, прогнозированию и автономному принятию решений [27]. Как отмечают авторы [28], новое поколение ЦД становится основой промышленной метавселенной и ключевым элементом парадигмы Индустрии 5.0, ориентированной на синергию человека, технологий и устойчивого развития [29].

С учетом современных технологий, таких как SCADA-системы (supervisory control and data acquisition), MES-системы (manufacturing execution system), ERP-системы (Enterprise resource planning), интеграция искусственного интеллекта (ИИ), больших языковых моделей, графов знаний, Интернета вещей (IoT), предлагается обновленная классификация цифровых двойников по уровням зрелости, объединяющая подходы, представленные в указанных работах.

Таблица 1

Классификация цифровых двойников по уровням зрелости

Уровень зрелости	Тип цифрового двойника	Ключевые характеристики	Функциональные возможности
Дескриптивный	Прототипный	Статическая цифровая модель, содержащая технические спецификации, документацию, данные о конструкции. Отсутствует связь с физическим объектом в реальном времени	Хранение паспортных данных, визуализация, виртуальное проектирование и тестирование на этапе разработки
Диагностический	Экземплярный	Интеграция с IoT-датчиками и промышленными системами (SCADA, ERP, MES); потоковая передача телеметрии; хранение исторических данных	Отслеживание текущего состояния, диагностика отклонений, базовая аналитика, генерация оповещений, поддержка эксплуатации
Прогностический	Интеллектуальный	Использование моделей машинного и глубокого обучения, симуляций «что – если», мультимодальных данных (включая изображения и видео)	Прогнозирование отказов, оптимизация параметров, обнаружение аномалий, поддержка принятия решений в реальном времени
Прескриптивный	Когнитивный	Интеграция графов знаний, онтологий, больших языковых моделей, систем рассуждения; способность к обучению и адаптации в неопределенной среде	Автономная оптимизация, моделирование, принятие решений на основе семантического анализа, взаимодействие в сетях когнитивных двойников

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Представленная классификация отражает не только технологическую эволюцию цифровых двойников, но и их функциональное наполнение: реализация ЦД эволюционировала от хранения данных в электронной форме к активному управлению промышленными системами. На уровнях 1 и 2 ЦД выступают как инструменты поддержки человека, тогда как на уровнях 3 и 4 они трансформируются в автономных цифровых агентов, способных к самоорганизации и коллективному интеллекту. Когнитивные цифровые двойники становятся строительными блоками промышленной цифровой экосистемы, в которой физический и виртуальный миры объединяются в единое пространство для моделирования, сотрудничества и устойчивого развития. Развитие концепции цифровых двойников –

это не статическое представление реальности, а интеллектуальное проектирование, формирующее основу цифровой трансформации в эпоху Индустрии 5.0.

*Концептуальная модель ЦАМ
как ядра системы управления*

Цифровая адаптивная модель предлагается к рассмотрению в качестве активного, эволюционирующего компонента адаптивной СУ, принципиально отличающегося от статических цифровых двойников наличием трехуровневой архитектуры с замкнутыми контурами управления, обеспечивающими свойство проактивной адаптации. Концептуальной основой ЦАМ выступает ее способность к адаптации в условиях нестационарности промышленной среды (рис. 1).



Рис. 1. Концептуальная модель цифровой адаптивной модели с тремя контурами управления
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Рассмотрим составляющие предлагаемой модели более подробно. *Когнитивный контур* выполняет функцию сенсорной системы ЦАМ, обеспечивая непрерывное восприятие гетерогенных данных из физического мира через распределенную сеть IoT-сенсоров и промышленные системы сбора данных (SCADA, ERP, MES). На данном уровне реализуются алгоритмы предобработки потоковых данных, включая фильтрацию шумов, компенсацию запаздываний и идентификацию аномалий, результатом чего становится формирование актуального и достоверного цифрового следа (Digital Shadow) производственного объекта. Важнейшей характеристикой когнитивного контура является его возможность адаптации к изменениям в конфигурации системы.

Прогнозный контур представляет собой аналитическое ядро ЦАМ, осуществляющее преобразование цифрового следа в прогнозные оценки будущих состояний системы. На данном уровне применяются ансамбли моделей машинного обучения, комбинирующие детерминированные физические модели с подходами на основе данных, что позволяет существенно повысить точность и устойчивость прогнозов. Особенность прогнозного контура – оценка неопределенности прогнозов и оптимизация ансамбля моделей на основе ретроспективного анализа. Это обеспечивает адаптацию прогнозных алгоритмов к изменениям в режимах работы оборудования и характеристиках производственных процессов.

Исполнительный контур с блоком адаптации выполняет функции принятия решений и управления, трансформируя прогнозные оценки в целенаправленные управляющие воздействия. Блок адаптации способствует мониторингу эффективности текущей конфигурации ЦАМ и инициирует реконфигурацию параметров и структуры прогнозных и исполнительных моделей при превышении пороговых значений ошибки прогнозирования или при изменении целевых функций системы. Он реализует механизмы непрерывного и трансферного обучения, позволяющие осуществлять дообучение моделей на ограниченных выборках новых данных.

Отличительной особенностью предложенной концепции от традиционных подходов является синергетическое взаимодействие трех контуров, образующих замкнутую систему. Когнитивный контур обеспечивает репрезентативность данных, прогнозный контур – точность предсказаний, а исполнительный контур – управляющие воздействия и способность системы к развитию. Такая архитектура позволяет ЦАМ не только адекватно отражать текущее состояние производ-

ственного объекта, но и проактивно адаптироваться к изменяющимся условиям эксплуатации, эволюционируя вместе с управляемым физическим объектом.

Формализация цифровой адаптивной модели

Для интеграции в вычислительные системы и описания концепции ЦАМ формализуется в виде следующего кортежа:

$$\text{ЦАМ} = \langle P, S, M, A, O \rangle.$$

Элементы кортежа непосредственно отражают функционирование трех контуров:

– P – множество параметров физического объекта, считываемых когнитивным контуром;

– S – состояние цифрового следа, $S = F(P)$, являющееся выходом когнитивного контура после предобработки;

– M – множество прогнозных моделей ($M_i: S \rightarrow \hat{S}$), образующих ядро прогнозного контура.

– A представляет алгоритм адаптации ($A: (S, \hat{S}, E) \rightarrow M'$), реализующий функции блока адаптации в исполнительном контуре. На основе анализа рассогласования между актуальным (S) и прогнозным ($\hat{S}$) состоянием, а также внешнего контекста (E), данный алгоритм производит адаптацию множества моделей M ;

– O соответствует функция генерации управляющих воздействий ($O: \hat{S} \rightarrow U$), представляющая собой решение исполнительного контура, которое передается на физический объект.

Данная формализация позволяет перейти от концептуального описания к проектированию архитектуры системы, состоящей из множества взаимодействующих ЦАМ. Адаптивную систему управления предлагается строить как сетевую структуру, где глобальное управление возникает в результате децентрализованного взаимодействия ЦАМ, представляющих различные активы и процессы (рис. 2).

Формально система управления определяется как кортеж:

$$\text{Адаптивная CV} = \langle A, D, C, G \rangle,$$

где $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ – множество физических активов (промышленное оборудование, складская система, транспортная система);

$D = \{D_1, D_2, \dots, D_n\}$ – множество ЦАМ, где каждый элемент $D_i = \langle P_i, S_i, M_i, A_i, O_i \rangle$ является формальным представлением актива A_i , реализующим трехконтурную архитектуру;

$C = \{C_1, C_2, \dots, C_m\}$ – множество сквозных цифровых технологий, обеспечивающих функционирование и кооперацию ЦАМ.

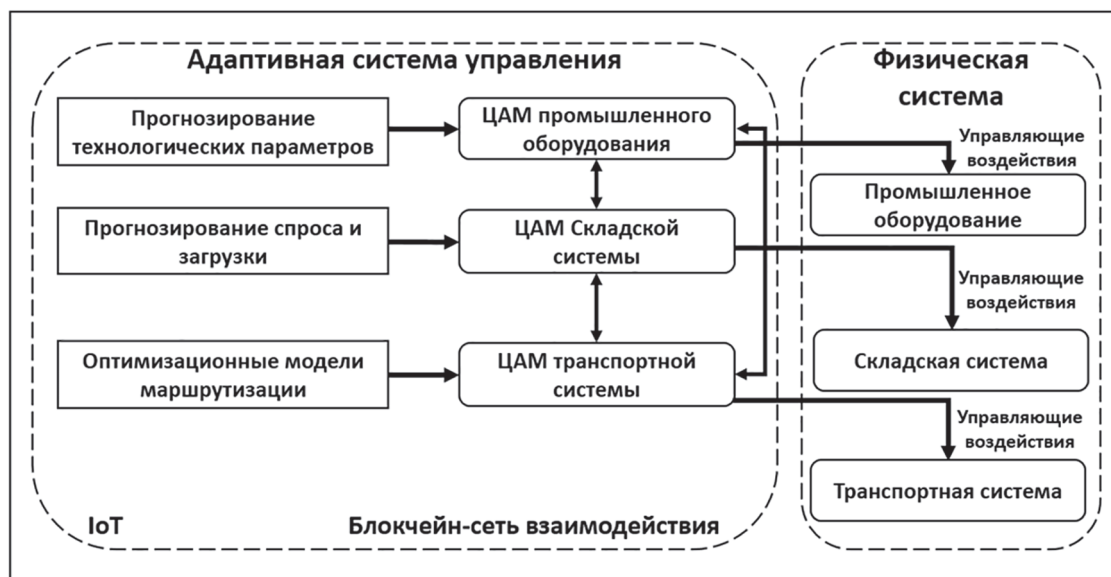


Рис. 2. Архитектура адаптивной системы управления на основе кооперации цифровых адаптивных моделей
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

К ним относятся:

- IoT-платформа (канал для передачи параметров P и управляющих воздействий U);
- интеллектуальная инфраструктура (среда выполнения для множеств моделей M и алгоритмов адаптации A);
- блокчейн-сеть (обеспечивает достоверность, неизменяемость и синхронизацию цифровых следов S между независимыми ЦАМ);
- глобальная целевая функция системы определяется как G .

Рассмотрим процесс функционирования системы, изображенной на рис. 2. Цифровые адаптивные модели станка D_1 , склада D_2 и транспорта D_3 взаимодействуют напрямую, обмениваясь данными своих состояний S и прогнозами $\hat{S}$. Каждая ЦАМ, используя свои формально описанные функции A , O , преследует локальные цели, но алгоритмы их взаимодействия согласованы таким образом, чтобы в конечном счете оптимизации подвергалась глобальная целевая функция G . Например, прогноз спроса $\hat{S}$ от ЦАМ склада становится входным контекстом E для алгоритма адаптации A ЦАМ промышленного оборудования, которая может скорректировать свою производственную модель M .

Это реализует сетцентричный принцип управления, при котором система реализует свойства самоорганизации и устойчивости, а блокчейн выступает инфраструктурой доверия для этого децентрализованного взаимодействия. Таким образом,

архитектура системы управления представляет взаимодействие цифровых адаптивных моделей – когнитивных агентов, а их кооперация способствует повышению управленческой гибкости и устойчивости системы в условиях неопределенности. Необходимо отметить, что переход от проектирования к инженерной реализации сопряжен с решением комплекса задач, одной из которых является систематизация инструментария, обеспечивающего жизненный цикл ЦАМ от момента сбора данных до формирования проактивных управляющих воздействий. В этом контексте целесообразно рассмотреть сравнительный анализ алгоритмов и подходов, применимых для построения трех контуров модели. В табл. 2 представлен набор методов, оцениваемых по ключевым для адаптивных систем критериям.

Таким образом, сравнительный анализ методов построения ЦАМ демонстрирует отсутствие универсального решения: эффективная реализация требует компромиссного выбора, основанного на специфике управляемого актива и целевых показателях. Ключевым выводом является необходимость гибридного подхода, комбинирующего, например, байесовские методы для оценки неопределенности в прогнозном контуре с детерминированными алгоритмами для быстрого планирования в исполнительном, что в совокупности обеспечивает устойчивость и адаптивность модели управления.

Таблица 2

Сравнительный анализ методов и технологий для построения ЦАМ

Компонент ЦАМ	Метод	Ключевые преимущества	Ограничения	Применимость в ЦАМ
Когнитивный контур	Платформы промышленного Интернета вещей (AWS IoT, Azure IoT)	Высокая масштабируемость, поддержка работы с данными в реальном времени	Высокие эксплуатационные затраты, риски обеспечения информационной безопасности	Высокая. Формирует основу для сбора данных с физических активов
	Системы потоковой обработки данных (Apache Kafka, Apache Flink)	Низкая задержка обработки, возможность к онлайн-анализу данных	Высокие требования к квалификации персонала, сложность конфигурирования	Высокая. Критически важна для реализации механизмов оперативной адаптации
	Методы глубокого обучения (LSTM, Transformer)	Высокая точность аппроксимации нелинейных временных рядов	Необходимость больших объемов данных для обучения, низкая интерпретируемость результатов	Высокая. Позволяет осуществить моделирование сложных нелинейных процессов
Прогнозный контур	Ансамблевые модели машинного обучения (Random Forest, XGBoost)	Устойчивость к зашумленным данным, прозрачность принимаемых решений	Ограниченная эффективность при работе с временными рядами	Высокая. Применимы для класса задач классификации и регрессии в статических условиях
	Байесовские вероятностные методы	Возможность количественной оценки неопределенности прогнозных оценок	Вычислительная сложность, требующая значительных ресурсов	Высокая. Важна для функционирования блока адаптации, оперирующего оценками достоверности
	Обучение с подкреплением (Reinforcement Learning)	Способность к автономному поиску оптимальных стратегий управления в сложных средах	Продолжительный и ресурсоемкий процесс обучения, нестабильность сходимости	Средняя. Применяется для достижения полной автоматизации управления
Блок адаптации	Детерминированные оптимизационные алгоритмы (Линейное программирование, Смешанно-целочисленное программирование)	Позволяет найти оптимальное решение для формализованных задач	Низкая адекватность в условиях стохастичности и неопределенности внешней среды	Высокая. Решение структурированных задач планирования
	Методы трансферного обучения (Transfer Learning)	Возможность дообучения моделей на репрезентативных выборках ограниченного объема	Риск негативного переноса знаний при несоответствии доменов	Высокая. Обеспечивает оперативную адаптацию к изменяющимся условиям
	Автоматизированное машинное обучение (AutoML)	Автоматизация процессов выбора и настройки алгоритмов машинного обучения	Значительные вычислительные затраты на процесс автоматизированного поиска	Средняя. Применяется для первоначальной настройки и базового конфигурирования среды

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования

Таблица 3

Совокупность цифровых технологий для адаптивных систем управления

Цифровая технология	Ключевые функции в адаптивной СУ	Вклад в адаптивность	Существующий инструментарий
Интернет вещей	Сбор данных с активов в реальном времени; мониторинг	Формирование системы сбора информации адаптивной СУ	PTC ThingWorx, Siemens MindSphere
Цифровые адаптивные модели	Динамические модели; симуляция и прогнозирование	Тестирование решений в виртуальной среде	ANSYS Twin Builder, NVIDIA Omniverse
Машинное обучение	Анализ данных, прогнозирование, принятие решений	Обеспечивает проактивность управления и интеллектуальную оптимизацию	TensorFlow, PyTorch, Azure ML
Предиктивная аналитика	Прогнозирование технико-экономических параметров среды	Снижает неопределенность	SAS Predictive Analytics, IBM SPSS
Обучение с подкреплением	Нахождение неочевидных решений в условиях неопределенности	Самообучение Адаптивной СУ	OpenAI Gym, Ray RLlib

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования

Методические подходы необходимо рассматривать в комплексе с интеграцией в конкретную промышленную экосистему. Для ее формирования требуется системный взгляд на цифровые технологии не как на разрозненный набор инструментов, а как на взаимосвязанные конструктивные элементы архитектуры адаптивной системы управления, чьи роль и место четко определены. Цифровые технологии выступают в роли системообразующих составляющих, обеспечивающих жизнеспособность отдельных ЦАМ, и их кооперацию (табл. 3).

Представленная совокупность демонстрирует, что современные цифровые технологии образуют целостный технологический стек, где каждый уровень решает свою задачу в обеспечении адаптивности. Так, IoT выступает сенсорной системой, ЦАМ и ИИ – когнитивным ядром, а блокчейн – инфраструктурой доверия. Их синергия позволяет трансформировать традиционную систему управления из реактивной, работающей по факту событий, в проактивную, способную предвидеть изменения и адаптироваться к ним автономно. Однако внедрение новых сложных систем порождает необходимость поиска методов количественной верификации гипотезы о целесообразности наращивания технологической сложности.

Методика оценки эффективности внедрения ЦАМ в адаптивных системах управления

Переход к адаптивным системам управления индуцирует процесс трансформации

управленческих парадигм. Традиционные детерминистические модели управления, основанные на принципах обратной связи и реагирования на свершившиеся события, демонстрируют свою ограниченность в условиях высокой стохастичности операционной среды. В противоположность этому предложенная архитектура реализует принцип опережающего отражения, при котором система формирует управляющие воздействия на основе прогнозных моделей будущих состояний. Качественное преобразование характера управленческой деятельности проявляется в переходе от дискретных корректирующих воздействий к непрерывной оптимизации производственных процессов. Развивается природа управленческих решений, что порождает новые методологические вызовы в области верификации и валидации принимаемых решений. Эффективность функционирования адаптивной системы в значительной степени определяется синергией взаимодействия ее компонентов. Нарушение на любом из уровней иерархии приводит к деградации свойств агентов и снижению адаптационного потенциала. Это обуславливает необходимость разработки комплексных метрик для оценки как отдельных компонентов, так и системы в целом.

Предлагаемая методика основана на сценарном моделировании среды функционирования. Моделирование различных сценариев операционной среды создает условия для измерения адаптационного потенциала системы в контролируемых условиях.

Таблица 4

Система показателей оценки эффективности ЦАМ и адаптивных систем управления

Проекция оценки	Показатель (KPI)	Формула расчета	Методическое пояснение
Операционная	Коэффициент адаптивности системы	$K_{\text{адап}} = N_{\text{усп}} / N$	Количественная оценка способности системы к реконфигурации алгоритмического обеспечения при изменении параметров технологического процесса, что обеспечивает верификацию ключевого преимущества адаптивных моделей перед традиционными статическими аналогами
	Снижение времени реакции	$\Delta TTR = 1 - (TTR_{\text{ЦАМ}} / TTR_{\text{баз}})$	Оценка потенциала системы в области оперативного управления производственными мощностями, что имеет критическое значение для минимизации операционных рисков и повышения устойчивости производственного контура в условиях возникновения нештатных ситуаций
Экономическая	Снижение операционных затрат	$\Delta OC = (OC_{\text{баз}} - OC_{\text{ЦАМ}}) / OC_{\text{баз}}$	Оценка экономической целесообразности внедрения цифровых адаптивных моделей – количественная оценка снижения эксплуатационных расходов как ключевого фактора при принятии инвестиционных решений в области цифровизации производства
	Сокращение потерь от простоев	$\Delta L = (L_{\text{баз}} - L_{\text{ЦАМ}}) / L_{\text{баз}}$	Оценка эффективности системы предиктивного обслуживания и адаптивного управления производственным оборудованием
Системная	Улучшение времени восстановления	$\Delta TTRec = 1 - (TTRec_{\text{ЦАМ}} / TTRec_{\text{баз}})$	Оценка способности к оперативной самодиагностике и реконфигурации рабочих параметров, что существенно повышает показатели надежности и отказоустойчивости производственного комплекса
	Повышение устойчивости системы	$\Delta SR = (SR_{\text{ЦАМ}} - SR_{\text{баз}}) / SR_{\text{баз}}$	Оценка системного эффекта от внедрения цифровых адаптивных моделей, выражающегося в способности сохранять целевую производительность в условиях действия внутренних и внешних факторов

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования

Многоуровневый характер оценки охватывает операционные, экономические и системные аспекты функционирования системы управления. В рамках методики предложена система показателей, отражающих специфику адаптивных систем. Такие показатели, как коэффициент адаптивности и время восстановления, позволяющие количественно измерить ключевые свойства системы – гибкость и устойчивость. Выбранные метрики позволяют оценить способность системы поддерживать эффективность в условиях изменчивости среды (табл. 4). В таблице используются следующие обозначения:

– $K_{\text{адап}}$ – коэффициент адаптивности системы, рассчитываемый как отношение числа успешных $N_{\text{усп}}$ к общему числу N попыток адаптации системы;

– ΔTTR (Time To Response) – показатель снижения времени реакции, рассчитываемый как отношение времени отклика системы с внедренной ЦАМ ($TTR_{\text{ЦАМ}}$) к отклику без ЦАМ ($TTR_{\text{баз}}$);

– ΔOC (Operational Costs) – показатель снижения операционных затрат, рассчиты-

ваемый как отношение разности операционных затрат без ($OC_{\text{баз}}$) и с внедренными ЦАМ ($OC_{\text{ЦАМ}}$) к начальным операционным затратам $OC_{\text{баз}}$;

– ΔL (Losses) – сокращение потерь от простоев, рассчитываемый как отношение разности потерь от простоев без ($L_{\text{баз}}$) и с внедренными ЦАМ ($L_{\text{ЦАМ}}$) к начальным потерям от простоя $L_{\text{баз}}$;

– ΔTTR_{rec} (Time To Recover) – показатель улучшения времени восстановления системы после сбоя, рассчитывается как разность единицы и отношения времени восстановления системы с ЦАМ ($TTR_{\text{rec, ЦАМ}}$) к базовому времени восстановления системы $TTR_{\text{rec, баз}}$;

– ΔSRE (System Resilience) – показатель повышения устойчивости системы, рассчитывается как отношение разности числа предотвращенных сбоев после $SR_{\text{ЦАМ}}$ и до ($SR_{\text{баз}}$) интеграции ЦАМ в промышленную систему к $SR_{\text{баз}}$.

После получения индивидуальных оценок по каждому из показателей, рассчитывается общий индикатор эффективности как среднее арифметическое суммы с весами:

$$I = \frac{1}{N} \vec{W} (K_{\text{адап}} + \Delta TTR + \Delta OC + \Delta L + \Delta TTR_{\text{rec}} + \Delta SR) \times 100\%,$$

где $\vec{W} = (w_K, w_{TTR}, w_{OC}, w_L, w_{TTR_{\text{rec}}}, w_{SR})$, $w_i \in \{0, \dots, 1\}$ – вектор весов, характеризующий значимость каждой из составляющих оценки в интегральном показателе, N – число параметров оценки.

Предлагаемая методика оценки эффективности цифровых адаптивных моделей и систем управления позволяет проводить количественную верификацию преимуществ внедрения адаптивных технологий в высокотехнологичных отраслях промышленности. Методика основана на трехуровневой системе показателей, охватывающей операционные, экономические и системные аспекты функционирования производственных комплексов. Нормирование рассчитываемых показателей позволяет осуществлять их непосредственное сравнение и последующее агрегирование в интегральный показатель эффективности, обеспечивая сопоставимость результатов для различных типов производств. Применение сравнительного анализа показателей базовой системы и системы с цифровыми адаптивными моделями позволяет количественно оценить степень достижения целевых показателей адаптивности. Методика может быть адаптирована к специфике различных высокотехнологичных отраслей промышленности путем корректирования

весовых коэффициентов при сохранении общей структуры оценки. Перспективы развития предложенного подхода связаны с интеграцией технологий искусственного интеллекта и глубокого обучения. Это позволит перейти от измерения отдельных аспектов адаптивности к многофакторной оценке эмерджентных свойств системы, возникающих в результате синергетического взаимодействия ее компонентов.

Заключение

В работе представлены методические основы построения систем управления с применением цифровых адаптивных моделей. Разработана концепция ЦАМ как активного ядра адаптивных систем управления, преодолевающая ограничения статических цифровых двойников. Предлагаемая трехуровневая архитектура с когнитивным, прогнозным и исполнительным контурами способствует оптимизации моделей в нестационарной производственной среде. Для обеспечения взаимодействия рассмотрена сетцентричная архитектура адаптивных систем управления на осно-

ве кооперирующихся ЦАМ. Проведенный сравнительный анализ методов построения ЦАМ показал отсутствие универсальных решений и актуальность применения гибридного подхода. Классификация цифровых технологий выявила их взаимодополняющий характер в формировании целостного технологического стека адаптивных систем. Для оценки эффективности ЦАМ в системах управления разработана соответствующая методика. Отметим, что внедрение разработанных решений сопряжено с рядом вызовов. К числу основных относятся: обеспечение интероперабельности разнородных ЦАМ, разработка методов верификации решений самообучающихся систем, трансформация управленческих парадигм.

Перспективы дальнейшего развития связаны с решением ряда методологических и прикладных задач. Основное внимание следует уделить разработке стандартов интероперабельности для обеспечения эффективного взаимодействия разнородных ЦАМ в распределенных системах. Задачей является создание формальных методов верификации и валидации решений, принимаемых агентами общей модели. Актуальной остается задача разработки архитектурных решений координации крупных ансамблей ЦАМ, отвечающих требованиям устойчивости. Значительные усилия должны быть направлены на создание инструментов мониторинга и управления жизненным циклом ЦАМ в промышленной эксплуатации. Отдельным направлением является разработка нормативно-правовой базы, регламентирующей вопросы ответственности за решения, принимаемые автономными системами. Решение этих задач позволит перейти от частных экспериментов к промышленной эксплуатации адаптивных систем управления в масштабах предприятий и промышленных экосистем в глобальном экономическом контексте.

Список литературы

1. Smirnov S.V., Mardanov G.D., Morozov G.A., Nasybulin A.R. Introduction of digital twin systems in the production // Вестник НЦБЖД. 2021. № 4 (50). P. 160–165. EDN: CCVVJP.
2. Кудряшов В.С., Алексеев М.В., Иванов А.В., Орловцева О.А., Иванова И.В. Синтез адаптивной цифровой системы управления с заданным запасом устойчивости // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15. № 3. С. 42–50. DOI: 10.25987/VSTU.2019.15.3.006. EDN: LKZEQV.
3. Ингеманссон А.Р. Разработка математических моделей для технологической подготовки производства и адаптивного управления токарной и фрезерной обработкой в цифровых производственных системах // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2020. Т. 22. № 1. С. 27–40. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-27-40. EDN: DJAHMP.
4. Городецкий В.И., Ларюхин В.Б., Скобелев П.О. Концептуальная модель цифровой платформы для киберфизического управления современным предприятием. Ч. 1. Цифровая платформа и цифровая экосистема // Мехатроника, автоматизация, управление. 2019. Т. 20. № 6. С. 323–332. DOI: 10.17587/mau.20.323-332. EDN: FNFLIN.
5. Сироткина Н.В., Щеголева Т.В., Казьмина И.В. Содержательные аспекты адаптивного развития системы управления высокотехнологичным предприятием // Организатор производства. 2022. Т. 30. № 1. С. 9–17. DOI: 10.36622/VSTU.2022.73.47.001. EDN: VCBRPX.
6. Некрасов А.Г., Фаддеева Е.Ю., Стыскин М.М., Синицына А.С. Инновационные методы управления жизненным циклом процессов в транспортно-логистических системах // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. 2018. № 10. С. 3–7. EDN: PHXUEF.
7. Молчанова Р.В. Интеллектуальная трансформация процессов как часть стратегического развития компаний // Экономика и управление: проблемы, решения. 2025. Т. 1. № 5 (158). С. 47–54. DOI: 10.36871/ek.up.p.r.2025.05.01.006. EDN: JTEQBY.
8. Грузина Ю.М. Эволюция управленческих парадигм в условиях цифровой трансформации организаций // Вестник евразийской науки. 2025. Т. 17. № S2. EDN: FLCZDF.
9. Клятецкий С.А. Разработка модели целевой системы управления и адаптивной организационной структуры ИТ в инжиниринговом дивизионе Госкорпорации «Росатом» // International Journal of Open Information Technologies. 2021. Т. 9. № 8. С. 65–73. EDN: KHHNUX.
10. Корнев Л.А. Методы оценки эффективности управления процессами реализации продукции e-commerce предприятий в условиях цифровой // Экономическое развитие России. 2025. Т. 32. № 7. С. 126–132. EDN: YBIRPU.
11. Герцева А.В. Показатели эффективности процесса подготовки руководящих кадров в условиях цифровой трансформации // Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 5. Экономика. Социология. Биология. 2021. Т. 11. № 2. С. 43–48. EDN: IHVYSS.
12. Белоусов С.А., Фролова О.А., Лайша А.К. Построение эффективной экономической модели агропромышленного комплекса при внедрении цифровых сервисов и автоматизированных систем класса АСУ ТП // Вестник евразийской науки. 2025. Т. 17. № S3. EDN: HBOSDB.
13. Мулик Ф.Ф. Исследование методов оптимизации автоматизации технологических процессов в нефтегазовом комплексе с использованием искусственного интеллекта // Вопросы природопользования. 2025. Т. 4. № 2. С. 52–63. DOI: 10.25726/v9650-6873-1044-e. EDN: XVHZZA.
14. Юдаев И.В., Глобин А.Н., Краснов И.Н., Суханова М.В. Цифровое геомоделирование и ресурсосберегающие технологии в системе рационального недропользования // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2025. № 2. С. 21–26. EDN: IEUAMG.
15. Бадараев Т.Д. Разработка механизма цифровой трансформации: интеграция технологий и бизнес-процессов для повышения конкурентоспособности организаций // Экономика и управление: проблемы, решения. 2025. Т. 6. № 3 (156). С. 10–21. DOI: 10.36871/ek.up.p.r.2025.03.06.002. EDN: LGMSOO.
16. Павлов А.А. Трансформация моделей управления в условиях цифровой экономики: сравнительный анализ российской и скандинавской практик // Вестник евразийской науки. 2025. Т. 17. № S1. EDN: RUIHLM.
17. Méndez R.E. Digital twins and macroeconomic modeling: potentials and limitations // Профессиональный вестник: Экономика и управление. 2025. № 2. P. 28–32. EDN: VTDEGR.
18. Карпухина Н.Н., Митяков Е.С., Пронин А.Ю. Промышленные революции: от Индустрии 3.0 к Индустрии 5.0 в контексте российской экономики // Russian Technological Journal. 2025. Т. 13. № 4. С. 123–134. EDN: XXKOTU. DOI: 10.32362/2500-316X-2025-13-4-123-134.

19. Казьмина И.В., Сабетова Т.В., Щеголева Т.В. Структура и содержание программы адаптивного развития системы управления // Финансовый вестник. 2024. № 3 (66). С. 16–24. EDN: OOTSHU.
20. Жагловская А.В. Роль цифровых платформ в управлении экономическим кризисом // Экономика промышленности. 2024. Т. 17. № 2. С. 156–160. DOI: 10.17073/2072-1633-2024-2-1291. EDN: JEWEX.
21. Исаев М.Г. Моделирование процесса цифрового развития экономических бизнес-систем в условиях оптимизационного управления цифровой трансформацией // Вестник евразийской науки. 2023. Т. 15. № 6. EDN: YWMZLA.
22. Пошибаев А.Ю. Влияние цифровых технологий на эффективность деятельности организации // Вестник евразийской науки. 2024. Т. 16. № S5. EDN: EUMNBZ.
23. Никифоров А.А., Никифорова Д.В. Исследование промышленных экосистем в контексте децентрализованного экономического развития // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Экономика и экологический менеджмент. 2025. № 1. С. 12–20. DOI: 10.17586/2310-1172-2025-18-1-12-20. EDN: PKLCGH.
24. Мухаметов Д.Р. Цифровое государство как экспоненциальная организация: новые технологии коммуникации // Мир новой экономики. 2022. Т. 16. № 2. С. 6–18. DOI: 10.26794/2220-6469-2022-16-2-6-18. EDN: ZXGRVS.
25. Хуриев Р.В., Мамбетова Ф.А. Адаптивная модель управления системой высшего образования в условиях цифровой трансформации экономики // МИР (Модернизация. Инновации. Развитие). 2024. Т. 15. № 1. С. 132–147. DOI: 10.18184/2079-4665.2024.15.1.132-147. EDN: RNAZUA.
26. ГОСТ Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. М.: Российский институт стандартизации, 2021. 16 с.
27. Сухомлин В.А., Намиот Д.Е., Гапанович Д.А. Анализ тенденций развития цифровых двойников нового поколения // International Journal of Open Information Technologies. 2024. Т. 12. № 7. С. 119–130. EDN: YFCLIS.
28. Шкарупета Е.В., Лукашин А.А., Малыгин А.Ю., Бабкина О.М. Цифровые двойники в условиях формирования Индустрии 5.0: классификация и особенности // Естественно-гуманитарные исследования. 2024. № 4 (54). С. 299–304. EDN: NSHLBY.
29. Кудинова М.Г., Туртулова И.Р. Цифровые двойники: исторический опыт, классификация, преимущества и риски // Дневник науки. 2023. № 12 (84). EDN: ITGMYR.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: Authors declare no conflict of interests.

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-78-10009).

Financing: This study was supported by the Russian Science Foundation (Project No. 23-78-10009).