

Научная статья

УДК 338.2

DOI: <https://doi.org/10.18721/JE.19102>

EDN: <https://elibrary/QSLDPO>



КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ЦИФРОВОЙ АДАПТИВНОЙ ЭКОСИСТЕМЫ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ В УСЛОВИЯХ ИНДУСТРИИ 4.0

А.Г. Ташкинов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Российская Федерация

alekss.perm@gmail.com

Аннотация. Цифровизация, роботизация, интернет вещей, искусственный интеллект и киберфизические системы кардинально меняют производственные процессы, цепочки создания стоимости и бизнес-модели. Сегодня понятие цифровой трансформации широко декларируется, ориентируя бизнес не просто на внедрение технологий, но на переосмысление будущего развития. Однако теоретико-методологический базис отстает от запросов практики: до сих пор не разработана концептуальная модель цифровой адаптивной экосистемы промышленного предприятия, которая интегрировала бы новые методы организации производства, логистики и межфирменного взаимодействия в единую, целостную и адаптивную систему управления. Востребованность исследования заключается в поиске новых организационно-управленческих форм, способных не просто внедрять отдельные технологии, но и обеспечить целостную адаптацию к технологическим изменениям. В основе работы лежит всесторонний литературный обзор и критический анализ существующих парадигм адаптивного управления. Автор синтезирует различные теоретико-методологические подходы, включая системно-кибернетический, эволюционно-синергетический, организационно-управленческий, а также положения теории сложных адаптивных систем. Цель исследования заключается в разработке концептуальной модели цифровой адаптивной экосистемы промышленного предприятия, способной обеспечить его долгосрочную конкурентоспособность в условиях вызовов Индустрии 4.0. В ходе исследования получены следующие научные результаты. Установлено отсутствие в научном дискурсе единого общепринятого определения цифровой адаптивной экосистемы предприятия. В научный оборот введено его авторское определение в контексте цифровой трансформации. Описаны структура и ключевые элементы цифровой адаптивной экосистемы предприятия. Разработана концептуальная модель цифровой адаптивной экосистемы предприятия, описаны основные этапы ее формирования. Осуществлена параметризация управленческих концепций на базе производственной функции Кобба–Дугласа, позволившая сформировать систему показателей для оценки экономической эффективности цифровой адаптивной экосистемы предприятия. Внедрение цифровой адаптивной экосистемы, опирающейся на управленческие концепции, позволяет сформировать единую стратегию цифровой трансформации для получения синергетического эффекта и обеспечения конкурентоспособности промышленных предприятий в условиях Индустрии 4.0.

Ключевые слова: адаптивное управление, Индустрия 4.0, отраслевые системы, производственная функция Кобба–Дугласа, регион, синергетический эффект, цифровая адаптивная экосистема предприятия

Для цитирования: Ташкинов А.Г. (2026) Концептуальная модель цифровой адаптивной экосистемы промышленного предприятия в условиях индустрии 4.0. П-Economy, 19 (1), 36–61. DOI: <https://doi.org/10.18721/JE.19102>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JE.19102>

CONCEPTUAL MODEL OF A DIGITAL ADAPTIVE ECOSYSTEM FOR AN INDUSTRIAL ENTERPRISE IN INDUSTRY 4.0

A.G. Tashkinov 

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

 alekss.perm@gmail.com

Abstract. Digitalization, robotics, the Internet of Things, artificial intelligence and cyber-physical systems are fundamentally changing production processes, value chains and business models. Today, the concept of digital transformation is widely proclaimed, guiding businesses not simply to implement technologies but to rethink their future development. However, the theoretical and methodological foundations lag behind practical demands: a conceptual model of a digital adaptive ecosystem for an industrial enterprise that would integrate new methods of organizing production, logistics and intercompany interactions into a unified, holistic and adaptive management system has yet to be developed. The relevance of this research lies in the search for new organizational and management forms capable of not simply implementing individual technologies but also ensuring holistic adaptation to technological change. This work is based on a comprehensive literature review and critical analysis of existing adaptive management paradigms. The author synthesizes various theoretical and methodological approaches, including systems-cybernetic, evolutionary-synergetic, organizational-managerial and complex adaptive systems theory. The objective of this study is to develop a conceptual model of a digital adaptive ecosystem for an industrial enterprise capable of ensuring its long-term competitiveness in the face of Industry 4.0 challenges. The following scientific results were obtained. The absence of a single, generally accepted definition of a “digital adaptive ecosystem for an enterprise” was established in scientific discourse. The author’s definition of the concept of “digital adaptive ecosystem for an enterprise” in the context of digital transformation was introduced into scientific circulation. The structure and key elements of a digital adaptive ecosystem for an enterprise were described. A conceptual model of a digital adaptive ecosystem for an enterprise has been developed, and the main stages of its formation are described. The parameterization of management concepts based on the Cobb-Douglas production function has made it possible to develop a system of metrics for assessing the economic efficiency of the digital adaptive ecosystem for an enterprise. The implementation of a digital adaptive ecosystem based on management concepts makes it possible to formulate a unified digital transformation strategy to achieve a synergistic effect and ensure the competitiveness of industrial enterprises in the context of Industry 4.0.

Keywords: adaptive management, Industry 4.0, industry systems, Cobb-Douglas production function, region, synergistic effect, digital adaptive enterprise ecosystem

Citation: Tashkinov A.G. (2026) Conceptual model of a digital adaptive ecosystem for an industrial enterprise in Industry 4.0. *П-Economy*, 19 (1), 36–61. DOI: <https://doi.org/10.18721/JE.19102>

Введение

Стремительное развитие цифровых технологий и их глубокое влияние на промышленные отрасли, новые методы организации производства, логистики, сбыта и потребления продукции приводят к масштабным преобразованиям во всех секторах экономики. Для достижения экономической эффективности в условиях цифровой экономики компаниям необходимо пересмотреть свои стратегии, провести существенную перестройку подходов к управлению и взаимодействию с партнерами в рамках экосистемы. Широко используемое сегодня понятие цифровой трансформации ориентирует не только на внедрение новых технологий, но и на осмысление того, как с их помощью предприятие будет развивать свой бизнес в будущем.

В современной научной парадигме, посвященной изучению цифровой трансформации в отраслях промышленности, проблема терминологической определенности признается одной из

фундаментальных. Ведущие отечественные специалисты в данной области, такие как А.В. Бабкин, В.В. Глухов, К.В. Фролов, А.К. Фролов и Е.В. Шкарупета, едины во мнении, что отсутствие логически структурированного и консенсусного определения базового понятия «цифровизация», а также сопряженной с ним терминологии создает существенные системные барьеры [1, 2]. Данная концептуальная нечеткость выступает серьезным препятствием для развития целостной и непротиворечивой методологии исследования и управления цифровыми экосистемами в условиях Индустрии 4.0.

Сегодня понятие цифровой трансформации широко декларируется, ориентируя бизнес не просто на внедрение технологий, но на переосмысление будущего развития. Однако теоретико-методологический базис отстает от запросов практики: до сих пор не разработана концептуальная модель цифровой адаптивной экосистемы промышленного предприятия, которая интегрировала бы новые методы организации производства, логистики и межфирменного взаимодействия в единую, целостную и адаптивную систему управления [3].

Актуальность исследования подтверждается значимостью цифровизации промышленности в ключевых стратегических документах. Правительство Пермского края последовательно реализует политику цифровой трансформации в русле указов Президента Российской Федерации (от 07.05.2018 № 204 и от 21.07.2020 № 474), направленную на достижение национальных целей развития на и выполнение поручений в сфере искусственного интеллекта (ИИ).

Региональное развитие в этой области определяет Стратегия цифровой трансформации Пермского края до 2030 года, утвержденная Координационным советом по развитию цифровой экономики 16 августа 2021 г. Ее положения охватывают ключевые секторы: экономику, отрасли промышленности, социальную сферу и государственное управление.

Предпринимаемые меры обеспечивают положительную динамику внедрения и использования информационных технологий, что позволяет Пермскому краю укреплять позиции одного из промышленно развитых регионов-лидеров в сфере цифровизации.

Таким образом, масштабные преобразования промышленности в эпоху Индустрии 4.0 актуализируют необходимость пересмотра подходов к управлению предприятием как участником цифровых экосистем. Исходя из этого, автором предлагается создание концептуальной модели цифровой адаптивной экосистемы предприятия (ЦАЭП), которая, в отличие от фрагментарных решений, предполагает целостную архитектуру проактивной реконфигурации стратегий, процессов и ресурсов для обеспечения долгосрочной экономической эффективности.

Литературный обзор

Теоретической основой для создания концептуальной модели ЦАЭП послужили разработки в области адаптивного управления, фрагментарно представленные в отраслевом контексте.

Отдельные аспекты методологии адаптивного управления применительно к отраслям промышленности нашли отражение в трудах зарубежных исследователей: П.У. Андерсона, К.Дж. Эрроу и Д. Пайнса [4], С.А. Кауфмана [5], Дж.М. Кафф [6], Н. Блума [7], К.С. Холлинга [8], Б.К. Уильямса, Р.С. Шаро и К.Д. Шапиро [9], К. Мейера и С. Дэвиса [10], Г. Николиса и И. Пригожина [11] и др., а также отечественных ученых: М.С. Агафоновой [12], К.А. Багриновского [13] Д.П. Деревницкого и А.Л. Фрадкова [14], Е.Ю. Елизаровой [15], Н.В. Зяблицкой [16], Г.Б. Клейнера [17], Б.А. Эфендиева [18].

Обращаясь к исследовательскому полю, стоит отметить, что концепция адаптивного управления не является абсолютно новой, однако ее приложение к отраслевой специфике промышленности в условиях Индустрии 4.0 остается малоизученным.

Цифровая трансформация промышленности в условиях Индустрии 4.0 ставит перед предприятиями комплекс взаимосвязанных вызовов: технологических, организационных и кадровых. Несмотря на обилие публикаций, отсутствует единая теоретическая рамка, позволяющая



рассматривать эти вызовы как элементы единой цифровой адаптивной экосистемы. В данной связи литературный обзор призван выполнить две задачи: выявить узкие места в существующих исследованиях и заложить основу для разработки интегрированного подхода к управлению трансформацией.

В рамках академического дискурса проблема цифровой трансформации в промышленности в контексте Индустрии 4.0 раскрывается через призму различных, но взаимодополняющих концептуальных и инструментальных подходов. Анализ указанных источников позволяет выделить несколько ключевых позиций, через которые авторы рассматривают цифровую экосистему.

Первая группа позиций связана с концептуализацией цифровых экосистем и трансформации бизнес-моделей.

Ряд исследований фокусируется на фундаментальном переустройстве экономических отношений и организационных структур. Так, А.В. Бабкин, П.А. Михайлов, Е.В. Шкарупета и Чэнь Лэйфэй предлагают рассматривать цифровую экосистему не как статичную платформу, а как интеллектуальную промышленную экосистему, эволюция которой основана на принципах коэволюции и синергии [19]. Их подход смещает акцент с технологической оснащенности на качество взаимодействия и взаимной адаптации элементов системы, где ценность создается через сетевые эффекты и обмен данными.

Этот тезис развивается в работах, посвященных изменению базовых принципов хозяйствования. М.Б. и М.Е. Яненко анализируют трансформационные изменения в экономике именно через призму развития цифровых бизнес-моделей [20]. Они рассматривают экосистему как результат и среду для такой трансформации, выделяя факторы (технологические, рыночные, регуляторные), которые стимулируют или тормозят переход от традиционных линейных моделей к сетевым, сервис-ориентированным и платформенным решениям. Аналогично И.Н. Краковская, Ю.В. Корокошко и Н.В. Аникина исследуют концептуальные аспекты развития бизнес-моделей промышленных предприятий, подчеркивая, что цифровая экосистема становится новой организационно-экономической формой, требующей пересмотра механизмов создания стоимости и конкурентных преимуществ [21].

Вторая группа позиций связана с разработкой конкретного методического аппарата для управления цифровой трансформацией. Здесь цифровая экосистема рассматривается как объект измерения и прогнозирования.

Вышеупомянутый подход А.В. Бабкина и соавторов получает практическое воплощение в виде инструментария оценки цифровой зрелости, основанного на измерении коэволюционных процессов и синергетического эффекта [19]. Это позволяет перейти от абстрактной концепции к диагностике состояния системы. М.В. Курникова в своем исследовании применяет схожий логический каркас, но на макроуровне, оценивая технологическую зрелость регионов как основу для формирования их экосистем и достижения технологического суверенитета [22]. К.В. Афанасьев и А.Р. Калинин предлагают иной, но комплементарный инструментарий. Они рассматривают цифровую экосистему как источник критических больших данных [23]. Их инструментарий прогнозирования экономического роста с использованием больших данных и бизнес-аналитики предполагает, что эффективная экосистема генерирует информационные потоки, анализ которых позволяет принимать стратегические решения и моделировать сценарии развития.

Третья позиция акцентирует прикладное, отраслевое и территориальное воплощение экосистем.

Н.Н. Булатова, В.С. Дудин и А.В. Алексеев конкретизируют концепцию на примере формирования цифровой экосистемы региональной транспортно-логистической инфраструктуры [24]. Их работа показывает, как абстрактные принципы Индустрии 4.0 адаптируются к специфике конкретной отрасли и географического контекста, требуя интеграции физических и цифровых

активов, а также согласования интересов множества стейкхолдеров (бизнес, государство, пользователи).

Таким образом, в представленных работах цифровая экосистема в условиях Индустрии 4.0 рассматривается многогранно:

- во-первых, как новая парадигма организации (коэволюционная, синергетическая, сетевая), трансформирующая бизнес-модели;
- во-вторых, как объект количественной оценки и прогноза, требующий специальных инструментов измерения зрелости и анализа данных;
- в-третьих, как практический проект цифровой трансформации, реализуемый в специфических отраслевых и региональных рамках.

В совокупности эти подходы формируют целостное представление, которое в первом приближении говорит о том, что цифровая экосистема – это одновременно и драйвер, и результат трансформации, требующие как теоретического осмысления, так и практического инструментария для воплощения и оценки на уровне предприятия, отрасли и региона.

Отметим, что в контексте Индустрии 4.0 предприятие сталкивается с необходимостью трансформации из обособленной хозяйственной единицы в узел динамичной сетевой структуры. Современные исследования в области цифровой экономики, региональной и отраслевой экономики, управления предприятием идентифицируют формирование цифровой адаптивной экосистемы как ключевой императив для обеспечения устойчивой конкурентоспособности. Данная экосистема представляет собой эволюционно развивающуюся коалицию взаимосвязанных субъектов (предприятий, потребителей, исследовательских центров, поставщиков технологий), интегрированных вокруг цифровой платформы и совместно создающих ценность через обмен данными, сервисами и ресурсами.

Анализ научной литературы позволяет систематизировать многоаспектность данного процесса и выделить следующие взаимодополняющие научные подходы к его осмыслению и реализации.

Так, например, многие авторы: А.С. Шишкова, В.В. Макаров и Е.В. Павлова [25, 26], П.С. Хамидова и З.Ш. Бабаева [27], О.Е. Каленов [28], С.Д. Сердюков и Н.К. Сердюкова [29] – подходят к определению цифровых экосистем как к многоаспектному междисциплинарному явлению, сочетая подходы из экономики, менеджмента, теории систем и информационных технологий.

Технологическо-экономический подход

А.С. Шишкова и В.В. Макаров [25], О.Е. Каленов [28] делают акцент на технологической платформе как ядре экосистемы. Они рассматривают ее как инфраструктуру, которая обеспечивает взаимодействие разнородных участников (провайдеров, потребителей, разработчиков) через стандартизированные интерфейсы. Ключевые атрибуты – масштабируемость, модульность и способность к самоорганизации.

Экономико-управленческий подход

В.В. Макаров и Е.В. Павлова [26] рассматривают цифровые экосистемы как новую форму организации бизнеса и создания ценности. Здесь на первый план выходят не цепочки поставок, а сети. Авторы изучают бизнес-модели экосистем, механизмы захвата и удержания пользовательской аудитории, конкурентные стратегии, основанные на владении данными и сетевыми эффектами.

Регионально-отраслевой подход

П.С. Хамидова и З.Ш. Бабаева [27] исследуют формирование отраслевых и региональных цифровых экосистем. Особое внимание уделяется факторам, способствующим или препятствующим их развитию в конкретных экономических и институциональных условиях, а также их роли в повышении конкурентоспособности региона или отрасли.

Системный и эволюционный подход

С.Д. Сердюков и Н.К. Сердюкова [29] предлагают рассматривать цифровые экосистемы как сложные адаптивные системы, которые проходят стадии зарождения, роста, зрелости и возможной трансформации. Подчеркивается важность коэволюции технологий, бизнес-практик и регулирования.

Таким образом, авторы признают, что цифровые экосистемы являются не просто следствием, а ключевым драйвером и акселератором цифровой трансформации на макро- и микроуровне:

- во-первых, происходит трансформация рыночной структуры. Экосистемы размывают традиционные отраслевые границы (например, банк становится маркетплейсом для услуг). Это создает новую конкурентную среду, где конкурируют не компании, а платформенные экосистемы;
- во-вторых, происходят повышение эффективности и создание инноваций. За счет сетевых эффектов, снижения транзакционных издержек и краудсорсинга экосистемы резко повышают эффективность распределения ресурсов и генерации инновационных решений;
- в-третьих, происходит формирование цифровой среды для бизнеса. Для малых и средних предприятий вхождение в экосистему крупной платформы становится каналом цифровизации, дающим доступ к технологиям, данным и клиентской базе, которые им самостоятельно не развить.

Исходя из представленного литературного обзора, цифровые экосистемы представляют собой парадигмальный сдвиг – от линейных цепочек создания стоимости к динамичным, самоорганизующимся сетевым структурам, где ценность создается совместно. Они являются центральным элементом цифровой трансформации, переопределяя конкурентную борьбу, стимулируя инновации и требуя новых подходов к управлению и регулированию. Развитие экосистем – это стратегический императив как для компаний, стремящихся к лидерству, так и для государств, ориентированных на рост цифровой экономики.

Таким образом, в контексте развития ЦАЭП в условиях Индустрии 4.0 успешность трансформации определяется четкой стратегической определенностью. Ее ядро составляет необходимость формулировки конкретной, измеримой цели, выступающей в роли системообразующего вектора изменений, и последующей операционализации этой цели через иерархическую структуру взаимосвязанных практических задач.

Несмотря на широкий дискурс вокруг проблем управления в цифровую эпоху, отраженный в литературном обзоре, в научной литературе до сих пор отсутствует целостная модель, синтезирующая подходы цифровой трансформации и адаптивного управления.

Исходя из обозначенной проблемной области и выявленных теоретических пробелов, формулируются цель и задачи настоящего исследования.

Цель исследования заключается в разработке концептуальной модели цифровой адаптивной экосистемы промышленного предприятия, способной обеспечить его долгосрочную конкурентоспособность в условиях вызовов Индустрии 4.0.

В соответствии с поставленной целью в исследовании решаются следующие задачи:

- 1) провести литературный обзор, анализ и синтез существующих теоретико-методологических подходов к цифровой экосистеме, адаптивному управлению для выявления ключевых закономерностей и принципов в условиях Индустрии 4.0;
- 2) систематизировать и уточнить понятийный аппарат и ввести в научный оборот авторское определение ключевого понятия «цифровая адаптивная экосистема предприятия»;
- 3) описать элементы ЦАЭП. Описать ее ключевые элементы, взаимосвязи и принципы функционирования. Разработать концептуальную модель цифровой адаптивной экосистемы промышленного предприятия;
- 4) разработать инструментарий для количественной оценки экономической эффективности ЦАЭП. Путем параметризации управленческих концепций на базе производственной функции Кобба–Дугласа (ПФКД) сформировать систему взаимосвязанных показателей.

Объектом исследования выступают отраслевые производственно-экономические системы, функционирующие в рамках ЦАЭП в условиях Индустрии 4.0. *Предметом исследования* являются процессы трансформации хозяйственной деятельности предприятий.

Методы и материалы исследования

Методологическая основа данного исследования представляет собой многоуровневый комплекс, сформированный для решения поставленных задач на различных этапах работы.

В качестве материала выступил базис современных научных публикаций, стратегические документы Российской Федерации и Пермского края, а также открытые данные по цифровизации промышленных предприятий.

На первом этапе, направленном на теоретический синтез и выявление исследовательского обзора, был применен комплекс аналитических и библиографических методов, в который входили:

- системный сравнительный анализ и критический обзор литературы для сопоставления российских и международных научных разработок, теоретических концепций и эмпирических данных;
- методологический синтез, позволивший интегрировать принципы и инструментарий из различных научных парадигм, системно-кибернетического, эволюционно-синергетического и организационно-управленческого подходов, а также положений теории сложных адаптивных систем и современных концепций бережливого и цифрового производства.

На втором, аналитико-оценочном этапе, для изучения практических аспектов цифровизации был использован структурно-функциональный анализ для описания архитектуры и взаимосвязей ЦАЭП.

На третьем, конструкторском этапе, основное внимание было уделено разработке концептуальной модели цифровой адаптивной экосистемы промышленного предприятия и использовались:

- метод концептуального моделирования для определения и введения в научный оборот базового понятия «цифровая адаптивная экосистема предприятия»;
- метод экономико-математического моделирования, в рамках которого была осуществлена параметризация управленческих концепций на базе ПФКД. Данный метод позволил перевести качественные характеристики адаптивности и цифровой зрелости в систему взаимосвязанных количественных показателей для оценки потенциальной экономической эффективности ЦАЭП.

На заключительном этапе для формулирования практических выводов применялся нормативно-рекомендательный метод, обеспечивший переход от теоретических моделей к конкретным предложениям по реализации концепции ЦАЭП в условиях Индустрии 4.0.

Таким образом, последовательное применение указанных методов на каждом этапе исследования обеспечило соблюдение принципов научной обоснованности, системности и практической ориентированности полученных результатов.

Результаты исследования

В рамках данной статьи управление трансформационными изменениями следует рассматривать как процесс, направленный на улучшение конкурентных позиций предприятия путем проведения структурных изменений в его деятельности [30, 31].

Поэтому в центре нашего внимания оказывается теоретическое осмысление новых закономерностей развития через призму интеграции цифровой трансформации и методологии адаптивного управления. Анализ, построенный на систематизации авторских позиций, сгруппированных вокруг ключевых идей в области адаптивного управления отраслевыми системами, позволил сформулировать основной результат исследования – теоретический фундамент для разработки принципов концепции ЦАЭП в условиях Индустрии 4.0.



Анализ будет построен на систематизации авторских позиций, сгруппированных вокруг ключевых идей в области адаптивного управления отраслевыми системами.

1. Системно-кибернетический и математический подход

В рамках системно-кибернетического и математического подхода К.А. Багриновский [13], Д.П. Деревицкий и А.Л. Фрадков [14] говорят о том, что адаптивное управление сводится к фундаментальной математической проблеме. Авторы закладывают основы теории адаптивных систем для объектов с неполной информацией, вводя три ключевых компонента:

- адаптацию как процесс автоматической настройки параметров системы в условиях неопределенности для достижения цели;
- методы синтеза как строгий математический инструментарий для создания адаптивных регуляторов;
- цель управления как обеспечение устойчивости и требуемого качества работы при меняющихся свойствах объекта.

Важным для нашего исследования является предложение авторов применять данный формальный аппарат к отраслевым производственно-экономическим системам, что открывает возможность их моделирования как кибернетических объектов.

2. Эволюционно-синергетический и нелинейный подход

Синергетический подход, основанный на классических работах Г. Николаса и И. Пригожина, раскрывает адаптацию и развитие как имманентные свойства сложных неравновесных систем, находящихся в постоянном обмене с внешней средой [11]. Данные ключевые концепции, имеющие прямое отношение к управлению отраслевыми системами, включают:

- диссипативные структуры, т.е. упорядоченность возникает из хаоса через флуктуации и в точках бифуркации. Именно такой диссипативной структурой, способной к самоорганизации, является отраслевая производственная система;
- неравновесность, как источник развития. Нормальное состояние адаптивной системы – эффективное функционирование вдали от равновесия, где она использует потоки энергии и информации для поддержания и наращивания сложности. Стабильность в данном контексте – признак стагнации;
- необратимость процессов. Управленческие решения носят нелинейный и часто необратимый характер, способный перевести систему на качественно новую траекторию развития.

Синергетический эффект данного подхода проявляется в том, что он обосновывает необходимость нелинейного управления в условиях Индустрии 4.0. Такой тип управления должен учитывать точки бифуркации (технологические разрывы, кризисы) и работать с эмерджентностью (самовозникающими свойствами системы), превращая хаотические изменения в источник новой структурной сложности и конкурентных преимуществ.

Подход Г.Б. Клейнера, рассматривающего отрасль как сложную эволюционную систему, задает ключевые принципы для проектирования цифровой адаптивной экосистемы. Ее главная цель – достижение синергетического эффекта от многоуровневой кооперации, что раскрывается через три управленческих императива, трансформированных изменений, цифровыми возможностями [17]:

- способность экосистемы к адаптации реализуется не просто через смену, а через динамическую рекомбинацию стратегий на основе данных. Цифровая среда позволяет в режиме реального времени выявлять точки перехода (например, от эксплуатационной фазы к инновационной) и перераспределять ресурсы;
- многоуровневая цифровая согласованность. Синергия возникает за счет создания единого цифрового контура, синхронизирующего действия предприятий (микроуровень), отраслевых институтов (мезоуровень) и регуляторов (макроуровень). Это превращает разнородных агентов в скоординированные узлы единой сети;

– управление цифровой гетерогенностью. Экосистема не нивелирует, а управляет неоднородностью адаптационного потенциала своих участников. Цифровые платформы позволяют гибко подключать, оценивать и вовлекать разнородные элементы (от крупных заводов до кооперации), превращая разнообразие в источник устойчивости и инноваций.

Таким образом, ЦАЭП становится инструментом эволюционного управления, который, следуя логике жизненного цикла отрасли, целенаправленно генерирует синергетический эффект, превышающий простую сумму вкладов ее участников.

3. *Организационно-управленческий и потенциал-ориентированный подходы*

Подходы Б.А. Эфендиева [18], Н.В. Зяблицкой [16] формируют важнейшие принципы построения цифровой адаптивной экосистемы, синергетический эффект которой возникает на стыке организационного дизайна и ресурсного потенциала.

На основе принципов Б.А. Эфендиева экосистема приобретает организационный каркас [18]:

- гибкая целостность, т.е. сочетание стабильного цифрового ядра (платформа, стандарты данных) с динамичными сетевыми структурами (проектные виртуальные команды);
- цифровой мониторинг, т.е. непрерывный сбор и анализ данных со всех узлов экосистемы для предиктивного управления;
- создание цифровой культуры, усиливающей кооперацию, обмен знаниями и интрапренерство.

Концепция Н.В. Зяблицкой наполняет этот каркас ресурсной логикой [16]:

- потенциал как цифровой актив, т.е. финансовые, технологические и человеческие ресурсы трансформируются в оцифрованные профили и метрики, становясь управляемыми активами экосистемы;
- диагностика на основе данных, т.е. оценка адаптационного потенциала происходит автоматически на основе анализа больших данных, что позволяет объективно ранжировать участников и выявлять слабые звенья.

Синергетический эффект цифровой адаптивной экосистемы заключается в том, что организационная гибкость, обеспеченная первым подходом, умножается на управляемый и измеримый адаптационный потенциал, формируемый вторым. Это создает систему, которая не просто реагирует на изменения, а предвосхищает их, целенаправленно развивая внутренние возможности для перехода на новые траектории роста.

Концепция «мозаики» М.В. Лосева, упомянутая у Е.Ю. Елизаровой [15], является теоретическим прообразом цифровой адаптивной экосистемы, где синергетический эффект возникает именно благодаря сетевому и комбинаторному логике. В высокотехнологичном секторе адаптивность рождается не в иерархии, а в сети, что реализуется через три принципа, усиленных цифровыми технологиями [15]:

1) *Динамическая кластеризация*

Цифровая платформа позволяет автономным элементам (создателям новой продукции, лабораториям) мгновенно формировать и перестраивать целевые кластеры вокруг конкретных задач или технологий, создавая синергию от специализированного сотрудничества.

2) *Комбинаторная инновационность*

Экосистема формализует и делает доступными компетенции и активы участников в виде цифровых сервисов, что ускоряет их перекомбинацию в новые продукты и бизнес-модели, генерируя инновационную синергию.

3) *Эмерджентная ценность*

В экосистеме конкурентное преимущество участника определяется его способностью создавать связи, а не только обладать ресурсами. Синергетический эффект проявляется здесь как эмерджентное свойство сети, т.е. появление новых возможностей и рыночных ниш, непредсказуемых для изолированных игроков.



Таким образом, цифровая адаптивная экосистема операционализирует концепцию «мозаики», превращая ее в рабочий инструмент, где синергия – это не случайный результат, а запланированный итог постоянной цифровой реконфигурации сетевых связей и компетенций.

4. Теория сложных адаптивных систем

Зарубежные исследователи: П.У. Андерсон, К.Дж. Эрроу и Д. Пайнс [4], С. Кауфман [5], Дж.М. Кафф [6], Н. Блум [7], К.С. Холлинг [8], Б.К. Уильямс, Р.С. Шаро и К.Д. Шапиро [9] – объясняют, почему в экономике Индустрии 4.0 необходим принципиально иной подход к управлению.

Цифровая адаптивная экосистема в этой логике предстает как инструмент для усиления естественных свойств сложных систем с целью получения управляемого синергетического эффекта.

Она легитимирует и поддерживает децентрализованную активность множества агентов, но повышает их взаимную «видимость» через общую цифровую среду.

Она не управляет напрямую, а создает условия для полезной эмерджентности, задавая правила игры, которые направляют самоорганизацию в сторону инноваций и роста.

Она работает не «вопреки», а благодаря нелинейности, выявляя и поддерживая перспективные траектории развития, которые могут дать максимальный мультипликативный эффект.

Она превращает коэволюцию из стихийного процесса в управляемый драйвер развития, облегчая агентам адаптацию друг к другу и формирование комплементарных компетенций.

Следовательно, релевантность данного теоретического фундамента заключается в том, что для достижения синергии в цифровую эпоху управление должно сместиться от прямого командования к архитектуре взаимодействий, к проектированию той самой цифровой среды, в которой самоорганизация агентов закономерно приводит к синергетическому эффекту, усиливающему конкурентоспособность всей отрасли.

Подход К. Мейера и С. Дэвиса [10], рассматривающий компанию как «живой организм», напрямую объясняет логику построения цифровой адаптивной экосистемы и источник ее синергетического эффекта.

В этой парадигме экосистема создается для реализации трех биологических принципов на новом уровне [10]:

– принцип гомеостаза через обучение, т.е. экосистема, подобно организму, поддерживает внутреннее равновесие через постоянное обучение и обмен знаниями между участниками. Синергия возникает как эффект взаимного обучения, когда опыт одного становится антителом или питательным веществом для другого;

– принцип периферийного реагирования. Для того чтобы быть быстрой, экосистема делегирует право реагирования «клеткам» и «органам» сотрудникам и партнерам. Синергия здесь – это эффект скоординированной децентрализации, когда множество локальных, но своевременных решений складывается в эффективную общую стратегию;

– принцип экстероцепции. В данном контексте экосистема развивает «органы чувств» – датчики интернета вещей, каналы обратной связи, аналитические системы. Синергия проявляется в согласованном ответе на стимул, когда воспринятая угроза или возможность вызывает не хаотичную, а скоординированную реакцию всей сети, усиленную цифровой коммуникацией.

Таким образом, цифровая адаптивная экосистема – это попытка инженерными средствами (платформами, аналитикой) воспроизвести и усилить те самые синергетические свойства, которые обеспечивают живым системам устойчивость, рост и эволюционное преимущество.

Синтез рассмотренных концепций позволяет утверждать, что в условиях Индустрии 4.0 отраслевая система обретает новое качество, она эволюционирует в цифровую адаптивную экосистему. Ее ядром становится не иерархия, а среда, целенаправленно генерирующая синергетический эффект через управляемую самоорганизацию.

Таким образом, актуальная парадигма адаптивного управления – это не просто интеграция принципов сложных систем, гибкости и распределенного интеллекта. Это практическая методология создания экосистемы как живого, самонастраивающегося механизма, где синергия является не побочным продуктом, а запланированным результатом архитектуры взаимодействий.

На основании проведенного анализа концептуальных основ адаптивного управления отраслевыми системами в табл. 1 представлен критический обзор ключевых литературных источников, систематизирующий их вклад в развитие соответствующих парадигм.

Проведенный анализ демонстрирует отчетливую траекторию развития: от жестких, механистических и статичных парадигм – к гибким, органическим и динамичным концепциям, разработанным в рамках теории сложных систем. Ключевым трендом данного перехода является повсеместное признание сложности, нелинейности и фундаментальной непредсказуемости среды, в которой функционирует отраслевая производственно-экономическая система. При этом анализ показал, что ни одна из рассмотренных парадигм в отдельности не обладает достаточной объяснительной и инструментальной силой для построения целостной системы адаптивного управления в условиях Индустрии 4.0. Сильные стороны одних подходов, такие как математическая строгость или институциональная глубина, нивелируются абстрактностью или инерционностью других.

Таким образом, возникает исследовательская потребность в синтетической модели, которая интегрировала бы достоинства рассмотренных подходов и преодолевала их внутренние ограничения. На основе литературного обзора, анализа литературных источников и синтеза ключевых идей в данном исследовании предлагается модель ЦАЭП.

Под ЦАЭП предлагается понимать самообучающуюся киберфизико-социальную систему. Ее ключевые структурные компоненты – цифровые платформы, сервисы и сообщества, которые не просто сосуществуют, а активно взаимодействуют, порождая синергетический эффект. Этот эффект проявляется в виде эмерджентного, т.е. принципиально нового, системного свойства: способности к непрерывной и автоматизированной оптимизации своей архитектуры. Благодаря синергии взаимосвязанных элементов экосистема не просто реагирует на изменения рынка, а превосходит их, гибко перестраивая процессы и создавая уникальные комбинации ценности, недоступные для традиционных, жестко связанных систем.

Предложенная модель ЦАЭП основана на пяти взаимодополняющих принципах, совместное действие которых порождает синергетический эффект, качественно преобразующий отраслевую систему.

1. Бимодальная архитектура

Данный принцип заключается в сочетании стабильного «стержня» (стратегия цифровой трансформации, цифровые компетенции, финансы с гибкими, самоорганизующимися проектными командами и цифровыми платформами).

2. Управление на основе данных и цифровых двойников

Цифровой двойник отраслевой системы становится центральным элементом контура управления, реализующим кибернетические принципы и позволяющим проводить предиктивную аналитику и сценарное моделирование в режиме, близком к реальному времени.

3. Развитие адаптационного потенциала как стратегическая цель

Управление направлено на постоянное наращивание и обновление четырех видов капитала: технологического, человеческого, организационного и социального.

4. Сетецентричность и экосистемность

Отраслевая система позиционируется не как замкнутая иерархия, а как узел в сети поставок и инноваций. Управление смещается от административного контроля к координации и созданию правил взаимодействия в экосистеме.



Таблица 1. Сравнительный анализ литературных источников по парадигмам адаптивного управления: преимущества и ограничения

Table 1. Comparative analysis of literature sources on adaptive management paradigms: advantages and limitations

Автор(ы)	Основной вклад/парадигма	Критический анализ	Отнесение к парадигме
Деревицкий Д.П., Фрадков А.Л. [14]	Техническая кибернетика. Парадигма адаптации как математической задачи стабилизации системы с неполной информацией.	Преимущество: строгий математический аппарат. Недостатки: редукционизм. Игнорирует социально-экономическую природу организаций.	Кибернетико-математическая
Багриновский К.А. [13]	Адаптация экономических систем. Применение кибернетических идей к управлению в переходной экономике.	Преимущество: попытка синтеза технического и экономического подходов. Недостатки: остается в рамках реактивной адаптации, слабо учитывает институциональные ограничения.	Кибернетико-экономическая
Кафф Дж.М. [6], Николис Г., Пригожин И. [11], Кауфман С., Эрроу К. [4, 5]	Синергетика и теория сложных адаптивных систем (CAS). Парадигма самоорганизации, эмерджентности и ко-эволюции. Экономика как развивающаяся сложная система.	Преимущество: наиболее адекватная онтология для турбулентной среды. Объясняет инновации и нелинейность. Недостатки: «паралич управления» – сложность операционализации для практического менеджмента. Не дает четких инструментов.	Синергетико-эволюционная
Клейнер Г.Б. [17]	Системная экономика и мезоуровень. Парадигма согласования жизненных циклов и стратегий на микро-, мезо- и макроуровнях.	Преимущество: Целостный взгляд на отрасль как сложную систему. Недостатки: высокий уровень абстракции, сложность применения на уровне отдельного предприятия.	Системно-эволюционная
Агафонова М.С. [12], Эфендиев Б.А. [18]	Организационное проектирование. Парадигма создания организационных структур и механизмов, обеспечивающих гибкость предприятия.	Преимущество: практическая ориентированность на перестройку управления. Недостатки: часто фокусируется на внутренней структуре, упуская интеграцию в экосистемы.	Организационно-управленческая
Зяблицкая Н.В. [16]	Диагностика адаптационного потенциала. Парадигма управления как накопления и оценки ресурсного потенциала для адаптации.	Преимущество: вводит измеримую категорию «потенциал». Недостатки: риск «гипердиагностики» без последующей эффективной мобилизации этого потенциала.	Потенциал-ориентированная
Елизарова Е.Ю. [15]	Сетевые и экосистемные модели. Парадигма «мозаики» — адаптации через рекомбинацию элементов в сетях и кластерах.	Преимущество: актуальна для Индустрии 4.0 и инновационного бизнеса. Недостатки: сложность применения в традиционных, капиталоемких отраслях. Проблемы управления сетью.	Сетевая-экосистемная
Мейер К., Дэвис С. [10]	«Живая организация». Биологическая метафора. Парадигма распределенного интеллекта и организационной гибкости.	Преимущество: мощная идеологическая основа для изменений. Акцент на культуре и людях. Недостатки: излишняя метафоричность, недостаток конкретных инструментов.	Организационно-поведенческая

Источник: составлено автором.

5. Принцип интеллектуализации и автономности

Высшее руководство задает «правила игры» (рамки, КПЭ, границы допустимого риска), в пределах которых операционные единицы обладают высокой автономией и способны к самоорганизации для решения задач.

Таким образом, сущность ЦАЭП – это создание гибкой системы, где синергия между участниками экосистемы, организацией и технологией становится основным механизмом проактивной адаптации. Она преодолевает традиционные разрывы, объединяя различные методологии в единый управленческий контур, где целенаправленно генерируется синергетический эффект как главный источник устойчивого конкурентного преимущества.

Исходя из изложенного, концептуальная схема модели цифровой адаптивной экосистемы промышленного предприятия представлена на рис. 1.

Взаимодействие цифровых платформ, сервисов и сообществ в рамках предложенной концептуальной модели ЦАЭП носит не линейный, а циклический, взаимно обусловленный и синергетический характер. Их единство порождает эффект, при котором экосистема обретает способностью к непрерывной автоматизированной самооптимизации – свойство, отсутствующее у каждого из компонентов по отдельности.

Исходя из этого, опишем, как это взаимодействие реализуется в практической деятельности промышленного предприятия.

В практической деятельности предприятия *цифровые платформы* выступают не просто хранилищем данных или набором программных продуктов, а единой операционной средой, в которой разворачиваются все процессы экосистемы.

Например, промышленная платформа интернета вещей собирает данные о загрузке оборудования, остатках сырья и ходе выполнения заказов. Эти данные не просто хранятся, а структурируются и становятся доступными для сервисов предиктивной аналитики и для диспетчеров (сообщество), которые видят актуальную картину производства.

Цифровые сервисы – это алгоритмическая и вычислительная мощность экосистемы. В практической деятельности они реализуют функции, которые ранее требовали ручного труда, экспертных оценок или длительных согласований, в автоматизированном или автономном режиме.



Источник: составлено автором.

Рис. 1. Концептуальная схема модели цифровой адаптивной экосистемы промышленного предприятия

Fig. 1. Conceptual diagram of the model of digital adaptive ecosystem of an industrial enterprise



Так, например, на основе данных с платформ сервисы выявляют отклонения, прогнозируют события, моделируют сценарии. Формируют управляющие воздействия: изменяют параметры процессов, перенаправляют материальные потоки, перестраивают графики производства. Адаптируются под запросы и критерии, задаваемые сообществами (например, приоритет скорости выполнения или минимизации затрат). Сервис предиктивной аналитики, используя данные платформ интернета вещей, прогнозирует выход из строя узла оборудования за 72 часа до отказа. Сервис планирования автоматически переносит заказы на другую линию, сервис закупок формирует заявку на замену узла, сервис уведомлений информирует ремонтную службу. Все это происходит без участия человека или с его минимальным контролем.

Сообщества (персонал, партнеры, потребители, заказчики продукции) в практической деятельности перестают быть только пользователями системы или объектами управления. Они становятся активными участниками экосистемы.

Так, например, они формируют цели, приоритеты и ограничения, в рамках которых работают сервисы. Оценивают результаты адаптации, подтверждая или корректируя решения. Обогащают экосистему контекстной, неформализуемой информацией, недоступной датчикам.

Персонал задает режимы работы «сейчас важнее скорость, а не себестоимость», сервисы перестраивают логику планирования.

Партнеры через интерфейсы платформы информируют об изменениях своих возможностей, система автоматически реконфигурирует цепочки поставок.

Потребители через обратную связь формируют паттерны спроса, сервисы корректируют продуктовые предложения.

Так, например, менеджер по продажам (сообщество) вносит в систему информацию о том, что ключевой клиент готов ждать дольше, но требует снижения цены. Сервис ценообразования пересчитывает себестоимость, сервис планирования удлиняет горизонт выполнения заказа, платформа синхронизирует данные с поставщиками. Экосистема адаптируется под новый приоритет без остановки производства и дополнительных совещаний.

Таким образом, ключевая суть взаимодействия структурных компонентов в практической деятельности заключается в том, что цифровые платформы, сервисы и сообщества перестают быть отдельными функциональными блоками, а превращаются в единый комплекс, в котором данные мгновенно становятся решениями, решения – действиями, а действия – новыми данными для обучения. Это и есть синергетический эффект, делающий экосистему цифровой, адаптивной и самообучающейся.

Используя упрощенную системно-кибернетическую модель, можно сказать, что эволюция бизнес-процессов от жесткого программного управления к гибкому синтезу управления создает основу для синергетического эффекта. Данный феномен анализируется в работах отечественных экспертов [2, 12, 17, 21, 30, 31].

В условиях стремительной цифровой трансформации промышленные предприятия сталкиваются с парадоксальным вызовом – с необходимостью одновременно повышать эффективность, гибкость и устойчивость. Традиционные подходы, успешные в прошлом, сегодня достигают своих естественных пределов. Бережливое производство, доказавшее свою эффективность за десятилетия внедрения, обеспечивает методологическую основу для создания ценности и системного устранения потерь. Однако его человеко-центрированная природа ограничивает скорость реакции и масштабируемость в цифровую эпоху, когда решения должны приниматься за миллисекунды, а не за недели. Цифровое производство предлагает технологический прорыв через промышленный интернет вещей, ИИ и роботизацию, но без системной философии рискует превратиться в набор разрозненных технологических «островков», не создающих синергетического эффекта.

Учитывая вышесказанное, создание цифровой адаптивной экосистемы промышленного предприятия требует фундаментального переосмысления производственной парадигмы. Это не просто автоматизация существующих процессов, а проектирование новой концептуальной модели (рис. 2).

Исходя из этого, концептуальная модель ЦАЭП представляет собой системный контур взаимодействия.



Источник: составлено автором.

Рис. 2. Концептуальная модель цифровой адаптивной экосистемы промышленного предприятия

Fig. 2. Conceptual model of the digital adaptive ecosystem of an industrial enterprise

Так, в представленной модели внешняя среда Индустрии 4.0 формирует требования и возможности, которые через экосистемный слой трансформируются в интегрированные потоки создания ценности между предприятиями, где бережливое производство обеспечивает методологическую основу для эффективности, а цифровое производство – технологическую платформу для интеграции и обмена данными в реальном времени; эти данные поступают в управленческий слой в центр принятия решений, который на их основе формирует стратегические и тактические команды, реализуемые через слой бизнес-приложений и сервисов, опирающихся на слой данных и аналитики для генерации интеллектуальных сайтов; вся информация и управляющие воздействия передаются через интеграционно-коммуникационный слой, который обеспечивает связность всех компонентов и доставляет команды к физическо-цифровому слою, где происходит реальное исполнение процессов с постоянной обратной связью через адаптивный цикл, обеспечивающий непрерывное улучшение и самооптимизацию всей системы, при поддержке обеспечивающих функций – кибербезопасности, развития компетенций и организационной гибкости, создающих фундамент для устойчивого функционирования этой сложной многоуровневой цифровой адаптивной экосистемы в условиях динамичной внешней среды.

Новизна цифровой адаптивной экосистемы промышленного предприятия в условиях Индустрии 4.0 заключается в синтезе философских принципов бережливого производства (создание непрерывного потока ценности и устранение потерь) с технологическими возможностями цифрового производства (сквозная интеграция данных, ИИ и промышленный интернет вещей), что порождает принципиально новый класс самообучающихся и самооптимизирующихся производственных систем, способных к проактивной адаптации, эмерджентному поведению и генерации сетевых эффектов, преодолевающих фундаментальные ограничения традиционных детерминированных моделей и создающих устойчивые конкурентные преимущества через скорость обучения, а не через статическую эффективность.

Таким образом, нами детально рассмотрены архитектура, преимущества и принципы работы цифровой адаптивной экосистемы, что позволяет нам увидеть общую картину будущего состояния предприятия. Однако между сегодняшним днем и этой амбициозной целью лежит путь, который требует не только технологических решений, но и стратегического планирования, организационной трансформации и поэтапного внедрения.

Перейдем к описанию основных этапов формирования ЦАЭП.

Подготовительный этап (0–3 месяца)

На данном этапе выполняются следующие итерации:

- диагностика и оценка – анализ текущего состояния, оценка цифровой зрелости;
- определение целей – формулировка конкретных бизнес-целей трансформации;
- создание команды – формирование кросс-функциональной команды трансформации;
- разработка дорожной карты – план на 3–5 лет с контрольными точками.

Этап 1. Организационный (3–12 месяцев)

На данном этапе выполняются следующие итерации:

- создание цифровой инфраструктуры – внедрение промышленного интернета вещей, датчиков, сетевой инфраструктуры;
- формирование платформы данных, т.е. создание единого хранилища данных (Data Lake);
- оцифровка ключевых процессов – перевод основных Lean-процессов в цифровой формат;
- обучение персонала – базовое обучение цифровым компетенциям.

Этап 2. Интеграция систем (12–24 месяца)

На данном этапе выполняются следующие итерации:

- интеграция систем – подключение MES, ERP, SCADA через единые серверы;
- создание цифровых двойников – разработка виртуальных моделей ключевых процессов;

- внедрение аналитических систем – предиктивная аналитика, аналит-панели;
- подключение партнеров – интеграция с поставщиками и клиентами.

Этап 3. Интеллектуализация системы (24–36 месяцев)

На данном этапе выполняются следующие итерации:

- внедрение машинное обучение для оптимизации процессов;
- создание адаптивных систем, т.е. самоадаптирующиеся производственные цепочки;
- развитие экосистемы – формирование сетевых взаимодействий с партнерами;
- автоматизация принятия решений – системы автономного управления.

Этап 4. Масштабирование системы (36–60 месяцев)

На данном этапе выполняются следующие итерации:

- полная цифровизация, т.е. охват всех бизнес-процессов;
- создание платформенной модели – монетизация цифровых сервисов;
- формирование отраслевой экосистемы – лидерство в цифровых стандартах;
- непрерывная оптимизация, т.е. самообучающаяся и самооптимизирующаяся система.

Описанная реализация этапов ЦАЭП представляет собой не набор разрозненных проектов, а целостную эволюционную программу трансформации, где каждый этап логически вытекает из предыдущего и создает фундамент для следующего.

Однако, рассматривая теорию сложных адаптивных систем как методологическую основу, необходимо отметить, что ее абстрактно-динамический характер не всегда позволяет напрямую и количественно учесть традиционные производственные модели, такие как ПФКД. Данная теория фокусируется на нелинейности, эмерджентности и адаптации агентов, тогда как классические производственные функции часто предполагают детерминированную связь между дискретными факторами «труда» и «капитала». В этом контексте именно синергетический эффект, возникающий от интеграции принципов бережливого и цифрового производства, становится ключевым практическим механизмом, который воплощает абстрактные свойства сложных систем – гибкость, самоорганизацию и коэволюцию в конкретные операционные результаты и измеримую добавленную стоимость.

Настоящий раздел заложил теоретический фундамент, описав новую производственную парадигму Индустрии 4.0. Для ее количественной оценки требуется соответствующий аналитический инструмент. Поэтому следующим этапом исследования станет рассмотрение, теоретическое обоснование и адаптация ПФКД для моделирования процессов в ЦАЭП.

Классические ПФКД создавались для индустриальной эпохи с относительно статичными факторами «труд» (L) и «капитал» (K). В цифровой экономике природа этих факторов трансформируется: капитал включает цифровые активы и данные, а труд смещается в сторону управления знаниями и взаимодействия с ИИ. При этом ключевым драйвером производительности становится общая факторная производительность (A), определяемая именно эффективностью применения цифровых технологий и управленческих концепций бережливого, цифрового производства.

Исходя из этого, существующие интерпретации ПФКД не отражают эту новую реальность в условиях Индустрии 4.0. Поэтому ЦАЭП требует не периодического, а постоянного перераспределения вычислительных мощностей, данных, человеческого внимания и финансовых потоков. Для этого необходима модель, которая в режиме, близком к реальному времени, могла бы оценивать предельную отдачу от нормирования и вложения ресурсов в оптимизацию процессов с использованием проектов бережливого и цифрового производства.

Современные предприятия обладают колоссальными массивами данных, но зачастую не имеют теоретической модели для их конвертации в стратегические решения. Параметризация концепций и их привязка к экономической функции создают основу для прескриптивной аналитики, когда система на основе данных может не только диагностировать проблемы,



но и рекомендовать оптимальные управленческие действия с оценкой их ожидаемого экономического эффекта работах [31–33].

Таким образом, актуальной научно-практической проблемой является разработка методологического подхода к параметризации концепций бережливого, цифрового производства в контексте ЦАЭП и их интеграции в модифицированную экономическую модель на основе ПФКД.

Такой подход должен позволять:

– определить набор цифровых параметров, адекватно отражающих реализацию каждой управленческой концепции в экосистеме;

– переосмыслить факторы ПФКД (A , K , L) применительно к цифровому предприятию, где:
 K – цифровой капитал (данные, алгоритмы, платформы),

L – цифровой труд (компетенции, креативность),

A – интегральный показатель эффективности экосистемы, зависящий от синергии управленческих концепций;

– построить механизм, в котором управляющий ИИ, или ИИ-оркестратор, использует потоки данных для постоянной калибровки параметров модели и оценки вклада каждой концепции в общую производительность (Q), обеспечивая динамическое распределение ресурсов для ее максимизации.

Решение данной проблемы позволит перейти от качественных описаний и разрозненных метрик к количественной, экономически обоснованной теории управления цифровыми экосистемами, что представляет значительный интерес как для развития экономической науки, так и для повышения конкурентоспособности предприятий в условиях Индустрии 4.0.

Отметим, что проведенный анализ управленческих концепций, подробно представленных в авторских работах [30, 33], формирует теоретический фундамент. Следующим логическим шагом исследования является их формализация и интеграция в практический инструментарий.

Данная статья сосредоточивается на параметризации выявленных концепций в рамках ЦАЭП. Ключевым инструментом для этого послужит ПФКД, модифицированная с учетом требований Индустрии 4.0.

Для интеграции рассмотренных подходов в практическую плоскость осуществляется параметризация управленческих концепций на основе модели Кобба–Дугласа. Итоговый набор показателей для ЦАЭП приведен в табл. 2.

Таким образом, интеграция ПФКД позволяет перевести абстрактные принципы бережливого, гибкого, цифрового производства в универсальный экономический язык измеримой производительности (Q):

– бережливое производство работает в основном с повышением A и эффективным использованием K ;

– гибкое производство повышает гибкость и адаптивность системы, позволяя динамически перераспределять L и K ;

– цифровое производство трансформирует природу факторов K и L , делая их измеримыми и управляемыми, и предоставляет данные для ИИ, который становится главным компонентом A ;

– ИИ-оркестратор выступает в роли «организатора экосистемы», который, опираясь на цифровые данные, использует концепции для точной настройки, для быстрых экспериментов, а ПФКД – как общую экономическую модель для принятия решений о распределении ресурсов в реальном времени.

Выявленные теоретические взаимосвязи и синергетический потенциал ЦАЭП требуют практического воплощения. С этой целью в исследовании был использован нормативно-рекомендательный метод, который выступил связующим звеном между абстрактными моделями и контекстом Индустрии 4.0, позволив сформулировать конкретные, прикладные выводы и дорожную карту внедрения.

Таблица 2. Параметризация управленческих концепций в модели Кобба – Дугласа и формирование показателей для цифровой адаптивной экосистемы предприятия
 Table 2. Parameterization of management concepts in the Cobb-Douglas model and the formation of indicators for the digital adaptive ecosystem of the enterprise

Методология	Ключевые принципы	Цифровая параметризация	Инструменты управления с ИИ и ПФКД	Механизм интеграции в экосистеме
Бережливое производство (Lean)	<ol style="list-style-type: none"> Устранение потерь (Muda). Непрерывный поток создания ценности. Совершенствование (Kaizen). 	<ol style="list-style-type: none"> Коэффициент OEE (Overall Equipment Effectiveness – эффективность работы оборудования) для цифровых активов. Автоматизация потоков данных. Метрики «цифровых потерь»: дублирование данных, неиспользуемые вычислительные ресурсы, сложность кода (технический долг). 	<p>Инструменты ИИ:</p> <ul style="list-style-type: none"> предиктивное обслуживание (Predictive Maintenance); оптимизация маршрутов и цепочек (логистика, вычисления); ИИ для анализа первопричин. <p>Интерпретация ПФКД: $Q = A \times K^\alpha \times L^{(1-\alpha)}$, где:</p> <ul style="list-style-type: none"> Q – производительность бережливого производства; A (Total Factor Productivity) – эффективность процессов, повышается ИИ-оптимизацией; K (Capital) – цифровые активы и инфраструктура, используются максимально эффективно (минимизация простоев); L (Labor) – труд, освобожденный от рутинных операций для более сложных задач. α – коэффициент эластичности, определяющий приоритет технологий над трудом¹. <p>Цель – максимизировать A, минимизируя потери в K и L.</p>	<p>Система оптимизации потока: Данные со всех узлов экосистемы в реальном времени анализируются ИИ на предмет узких мест, потерь и неоптимальных затрат ресурсов (K, L). Автоматически предлагаются или внедряются корректировки для поддержания максимального коэффициента полезного действия (A).</p>

¹ $L^{(1-\alpha)}$ – человеческий капитал высокой квалификации – показывает, что труд (L) участвует в создании конечного продукта не полностью, а только той своей частью ($1 - \alpha$), которая остается после замещения рутинных технологиями. Чем выше α (вклад автоматизации), тем меньше остается простых операций для людей и тем ценнее становятся их сложные компетенции.

Продолжение таблицы 2

Методология	Ключевые принципы	Цифровая параметризация	Инструменты управления с ИИ и ПФКД	Механизм интеграции в экосистеме
<p>Digital (Цифровое производство)</p>	<ol style="list-style-type: none"> Сквозная цифровизация процессов и активов. Цифровая культура. Цифровой опыт и взаимодействие. 	<ol style="list-style-type: none"> Глубина оцифровки (процент сущностей, имеющих цифрового двойника (Digital Twin)). Качество данных (полнота, актуальность, согласованность). Коэффициент использования данных (Data Utilization Index). Индекс цифровой связности (Digital Connectivity Index). 	<p>Инструменты ИИ:</p> <ul style="list-style-type: none"> цифровые двойники с ИИ-симуляцией. персональные ИИ-ассистенты и чат-боты. сенсоры и интернет вещей для сбора данных. <p>Интерпретация ПФКД:</p> $Q = A \times K^\alpha \times L^{(1-\alpha)}$ <p>где:</p> <ul style="list-style-type: none"> Q – производительность цифрового производства; K – не только серверы, но и данные, алгоритмы, модели, цифровые платформы; L – работа с данными, управление ИИ, креативные задачи; A – ИИ, работающий на цифровых активах (K), основной источник производительности: ($A \rightarrow A_{AI}$); α – коэффициент эластичности, определяющий приоритет технологий над трудом; <p>Цифровое производство трансформирует K и L и кардинально увеличивает A.</p>	<p>Механизм:</p> <p>Цифровой слой является фундаментом – все объекты и процессы представлены цифровыми двойниками. Эта система поставляет структурированные, актуальные данные в ИИ-модули Lean (для оптимизации) и Agile (для обратной связи), позволяя им функционировать с максимальной эффективностью. Является основой для расчета метрик ПФКД в реальном времени.</p>

Окончание таблицы 2

Методология	Ключевые принципы	Цифровая параметризация	Инструменты управления с ИИ и ПФКД	Механизм интеграции в экосистеме
<p>Интеграция в ЦАЭП</p>	<p>Синергия, адаптивность, эмерджентность.</p>	<p>Сводные параметры:</p> <ul style="list-style-type: none"> • общая факторная производительность экосистемы (A); • эластичность замещения ресурсов между процессами; • коэффициент синергии ($\Delta Q / \Sigma Q$); • уровень эмерджентности (появление новых свойств). 	<p>ИИ как интегратор и оркестратор (AI Orchestrator) использует общую ПФКД экосистемы в реальном времени:</p> $Q = A \times \Sigma K^\alpha \times \Sigma L^{(1-\alpha)},$ <p>где:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Q – ЦАЭП; • A – общая факторная производительность экосистемы; • K – не только серверы, но и данные, алгоритмы, модели, цифровые платформы; • L – работа с данными, управление ИИ, креативные задачи; • α – коэффициент эластичности, определяющий приоритет технологий над трудом. <p>Его задача:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) максимизировать A, балансируя принципы Leap (оптимизация) и Agile (адаптивность); 2) динамически распределять K и L между Agile-командами и Leap-процессами; 3) калибровать α (вклад капитала) на уровне экосистемы, учитывая стратегию цифровой трансформации. 	<p>Механизм: «Адаптивная экономическая петля».</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Цифровой слой собирает данные о всех операциях (K, L, результаты Q). 2. ИИ-оркестратор в режиме, близком к реальному времени, анализирует эти данные через призму параметризованных концепций (Leap, Digital) и оценивает их вклад в общую ПФКД экосистемы. 3. На основе этой оценки ИИ перераспределяет ресурсы, инициирует Agile-итерации для новых гипотез или запускает Leap-оптимизацию существующих процессов. 4. Результаты снова оцифровываются, и петля замыкается, постоянно максимизируя Q.

Источник: составлено автором.

Реализация концепции цифровой адаптивной экосистемы не является изолированным проектом цифровой трансформации, а представляет собой центральное, содержательное ядро — стратегии цифровой трансформации промышленного предприятия в эпоху Индустрии 4.0 [30]. Если стратегия задает общее направление, то ЦАЭП — это целевая архитектура будущего состояния, а рекомендации — конкретные шаги по ее достижению.

В этом контексте стратегия определяет «куда идти», архитектура ЦАЭП — «как должно выглядеть будущее», а разработанный комплекс рекомендаций — «что конкретно делать», обеспечивая системный переход, подробно описанный в исследованиях по управлению трансформационными изменениями [34–36].

Заключение

В рамках исследования получены следующие основные результаты.

1. В результате изучения существующих публикаций автором проведен анализ и сделан вывод, что на сегодняшний день не существует единого общепринятого понятия цифровой адаптивной экосистемы предприятия его определения, несмотря на актуальность данной задачи.

2. Автором уточнено определение «цифровая адаптивная экосистема предприятия» с позиции адаптивного управления.

3. На основании проведенного анализа основным результатом исследования стала модель цифровой адаптивной экосистемы предприятия. Данная модель базируется на пяти взаимодействующих принципах, эффективное взаимодействие которых порождает синергетический эффект, способный качественно трансформировать отраслевую производственно-экономическую систему. Именно учет и целенаправленное усиление этого синергетического эффекта лежат в основе предлагаемой концептуальной модели цифровой адаптивной экосистемы промышленного предприятия, обеспечивая ее целостность и адаптационный потенциал.

4. Полученные результаты позволяют переосмыслить традиционные экономические модели в контексте новых производственных парадигм. Так, интеграция ПФКД выступает в роли универсального переводчика, она переводит абстрактные принципы бережливого, цифрового производства на строгий экономический язык измеримой производительности.

Бережливое производство напрямую воздействует на общую факторную производительность, устраняя потери и оптимизируя использование капитала.

Цифровое производство коренным образом трансформирует сами факторы: оно оцифровывает капитал и труд, делая их полностью измеримыми и управляемыми в реальном времени, а также предоставляет данные для систем искусственного интеллекта, которые становятся ключевым компонентом.

Таким образом, представленные результаты формируют комплексное решение, позволяющее не только реализовать архитектуру цифровой адаптивной экосистемы, но и обеспечить системную подготовку предприятия к сопутствующим трансформационным изменениям. Это включает в себя стратегическое планирование цифровой трансформации, эффективное управление соответствующими проектами и, как итог, достижение целей устойчивого развития отраслевой производственно-экономической системы.

В рамках дальнейшей работы планируется сосредоточиться на методическом и практическом обеспечении деятельности промышленных предприятий, а именно на вопросах оценки их цифровой зрелости и экономической эффективности цифровой адаптивной экосистемы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бабкин А.В., Фролов К.В., Фролов А.К. (2024) Понятие и сущность цифровизации и цифровой трансформации на основе фундаментальных и прикладных аспектов системно-кибернетической теории. *π-Economy*, 17 (1), 7–26. DOI: <https://doi.org/10.18721/JE.17101>
2. Глухов В.В., Бабкин А.В., Шкарупета Е.В. (2022) Цифровое стратегирование промышленных систем на основе устойчивых экоинновационных и циркулярных бизнес-моделей в условиях перехода к Индустрии 5.0. *Экономика и управление*, 10 (28), 1006–1020, DOI: <https://doi.org/10.35854/1998-1627-2022-10-1006-1020>
3. Ташкинов А.Г. (2025) Цифровизация отраслевой экономики и современные тренды развития промышленности. *Международная экономика*, 22 (5), 422–432. DOI: <https://doi.org/10.33920/vne-04-2505-05>
4. Anderson P.W., Arrow K.J., Pines D. (1988) *The Economy as an Evolving Complex System*, Redwood City, CA: Addison-Wesley.
5. Kauffman S.A. (1995) *At Home in the Universe: The Search for Laws of Self-organization and Complexity*, Oxford University Press.
6. Cuff J.M. (2007) C.S. Peirce, G.W.F. Hegel, and Stuart Kauffman's complexity theory: A response. *Zygon*, 42 (1), 249–256. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1467-9744.2006.00819.x>
7. Bloom N. (2014) Fluctuations in uncertainty. *Journal of Economic Perspectives*, 28 (2), 153–176. DOI: <https://doi.org/10.1257/jep.28.2.153>
8. Holling C.S. (1978) *Adaptive Environmental Assessment and Management*, Chichester: John Wiley.
9. Williams B.K., Szaro R.C., Shapiro C.D. (2009) *Adaptive management: The U.S. Department of the Interior technical guide adaptive management working group*, Washington, DC: US Department of the Interior.
10. Мейер К., Дэвис С. (2007) *Живая организация. Компания как живой организм. Грядущая конвергенция информатики, нанотехнологии, биологии и бизнеса*, М.: Добрая книга.
11. Николис Г., Пригожин И. (1979) *Самоорганизация в неравновесных системах. От диссипативных структур к упорядоченности через флуктуации* (пер. с англ. В.Ф. Пастушенко; под ред. Ю.А. Чизмаджаева), М.: Мир.
12. Агафонова М.С. (2021) Теоретическое обоснование необходимости адаптации в управлении строительным предприятием. *Экономика и предпринимательство*, 8 (133), 1233–1237. DOI: <https://doi.org/10.34925/EIP.2021.133.8.239>
13. Багриновский К.А. (1999) О методах адаптивного управления в переходной экономике. *Экономическая наука современной России*, 2, 30–39.
14. Деревницкий Д.П., Фрадков А.Л. (1981) *Прикладная теория адаптивных систем управления*, М.: Наука.
15. Елизарова Е.Ю. (2009) Мозаика наукоемкого бизнеса. *ЭКО*, 11 (425), 131–146.
16. Зяблицкая Н.В. (2012) Адаптационный потенциал как экономическая категория. *Экономика и экологический менеджмент*, 1, 183–188.
17. Клейнер Г.Б. (2023) Системная парадигма как теоретическая основа стратегического управления экономикой в современных условиях. *Управленческие науки*, 13 (1), 6–19. DOI: <https://doi.org/10.26794/2304-022X-2023-13-1-6-19>
18. Эфендиев Б.А. (2008) Разработка и функционирование адаптивных систем управления организацией. *Российское предпринимательство*, 9 (11), 21–25.
19. Бабкин А.В., Михайлов П.А., Шкарупета Е.В., Чэнь Лэйфэй (2025) Инструментарий оценки цифровой зрелости интеллектуальной промышленной экосистемы на основе коэволюции и экосистемной синергии. *π-Economy*, 18 (4), 32–53. DOI: <https://doi.org/10.18721/JE.18402>
20. Яненко М.Б., Яненко М.Е. (2025) Трансформационные изменения в экономике в контексте развития цифровых бизнес-моделей: факторы влияния, проблемы, перспективы. *π-Economy*, 18 (2), 87–99. DOI: <https://doi.org/10.18721/JE.18205>
21. Краковская И.Н., Корокошко Ю.В., Аникина Н.В. (2024) Развитие бизнес-моделей промышленных предприятий в цифровой экономике: концептуальные аспекты. *π-Economy*, 17 (3), 52–67. DOI: <https://doi.org/10.18721/JE.17304>
22. Курникова М.В. (2025) Оценка технологической зрелости регионов России как основы их технологического суверенитета и глобальной конкурентоспособности. *π-Economy*, 18 (4), 105–123. DOI: <https://doi.org/10.18721/JE.18406>



23. Афанасьев К.В., Калинин А.Р. (2025) Инструментарий прогнозирования экономического роста регионов с использованием технологий больших данных и бизнес-аналитики. *π-Economy*, 18 (2), 73–86. DOI: <https://doi.org/10.18721/JE.18204>
24. Булатова Н.Н., Дудин В.С., Алексеев А.В. (2024) Формирование цифровой экосистемы региональной транспортно-логистической инфраструктуры. *π-Economy*, 17 (3), 68–80. DOI: <https://doi.org/10.18721/JE.17305>
25. Шишкова А.С., Макаров В.В. (2025) Российские цифровые экосистемы в сегменте B2C: текущее состояние и перспективы развития. *Вестник СПбГУТ*, 3 (3), 3.
26. Макаров В.В., Павлова Е.В. (2024) Влияние экосистем на цифровую трансформацию экономики. *Журнал правовых и экономических исследований*, 2, 209–214. DOI: <https://doi.org/10.26163/GIEF.2024.83.47.030>
27. Хамидова П.С., Бабаева З.Ш. (2025) Цифровая экосистема как драйвер устойчивого регионального развития. *Russian Journal of Management*, 10, 266–286. DOI: <https://doi.org/10.29039/2500-1469-2025-13-10-266-286>
28. Каленов О.Е. (2022) Цифровые экосистемы организаций. *Вестник РЭА им. Г.В. Плеханова*, 1 (121), 139–147. DOI: <https://doi.org/10.21686/2413-2829-2022-1-139-147>
29. Сердюков С.Д., Сердюкова Н.К. (2023) Развитие цифровых экосистем и платформ в туризме и сфере услуг. *Креативная экономика*, 17 (8), 2887–2908. DOI: <https://doi.org/10.18334/се.17.8.118525>
30. Ташкинов А.Г. (2023) Этапы формирования стратегии цифровой трансформации промышленного предприятия. *π-Economy*, 16 (6), 117–141. DOI: <https://doi.org/10.18721/JE.16609>
31. Бабкин А.В., Ташкинов А.Г. (2025) Комбинированный подход к управлению проектами цифровой трансформации промышленных предприятий в контексте Индустрии 4.0. *Экономика промышленности*, 18 (4), 472–485. DOI: <https://doi.org/10.17073/2072-1633-2025-4-1553>
32. Суворов Н.В., Ахунов Р.Р., Губарев Р.В., Дзюба Е.И., Файзуллин Ф.С. (2020) Применение производственной функции Кобба–Дугласа для анализа промышленного комплекса региона. *Экономика региона*, 16 (1), 187–200. DOI: <https://doi.org/10.17059/2020-1-14>
33. Ташкинов А.Г. (2026) Адаптивное управление гибридными цифровыми ресурсами предприятия на основе модифицированной производственной функции Кобба–Дугласа в условиях Индустрии 4.0. *Вестник Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова*, 1, 5–12. DOI: <https://doi.org/10.21686/2413-2829-2026-1-5-12>
34. Tashkinov A.G. (2024) The implementation of lean and digital management techniques using artificial intelligence in industrial settings. *Discover Artificial Intelligence*, 4 (1), art. no. 94. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44163-024-00186-5>
35. Бабкин А.В., Ташкинов А.Г. (2024) Этапы разработки методического подхода оценки эффективности проектов цифровой трансформации промышленного предприятия. *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Экономика. Социология. Менеджмент*, 14 (4), 70–93. DOI: <https://doi.org/10.21869/2223-1552-2024-14-4-70-93>
36. Tashkinov A.G. (2025) The application of industry 4.0 into the company's production activities through effective decision-making. *Scientific Reports*, 15, art. no. 34202. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-15688-0>

REFERENCES

1. Frolov K.V., Babkin A.V., Frolov A.K. (2024) Concept and essence of digitalization and digital transformation based on fundamental and applied aspects of the systems-cybernetic theory. *π-Economy*, 17 (1), 7–26. DOI: <https://doi.org/10.18721/JE.17101>
2. Glukhov V.V., Babkin A.V., Shkarupeta E.V. (2022) Digital strategizing of industrial systems based on sustainable eco-innovation and circular business models in the context of the transition to Industry 5.0. *Economics and Management*, 10 (28), 1006–1020, DOI: <https://doi.org/10.35854/1998-1627-2022-10-1006-1020>
3. Tashkinov A.G. (2025) Digitalization of the Sectoral Economy and Modern Industrial Development Trends. *The World Economics*, 22 (5), 422–432. DOI: <https://doi.org/10.33920/vne-04-2505-05>

4. Anderson P.W., Arrow K.J., Pines D. (1988) *The Economy as an Evolving Complex System*, Redwood City, CA: Addison-Wesley.
5. Kauffman S.A. (1995) *At Home in the Universe: The Search for Laws of Self-organization and Complexity*, Oxford University Press.
6. Cuff J.M. (2007) C.S. Peirce, G.W.F. Hegel, and Stuart Kauffman's complexity theory: A response. *Zygon*, 42 (1), 249–256. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1467-9744.2006.00819.x>
7. Bloom N. (2014) Fluctuations in uncertainty. *Journal of Economic Perspectives*, 28 (2), 153–176. DOI: <https://doi.org/10.1257/jep.28.2.153>
8. Holling C.S. (1978) *Adaptive Environmental Assessment and Management*, Chichester: John Wiley.
9. Williams B.K., Szaro R.C., Shapiro C.D. (2009) *Adaptive management: The U.S. Department of the Interior technical guide adaptive management working group*, Washington, DC: US Department of the Interior.
10. Meyer S., Davis C. (2003) *It's Alive: The Coming Convergence of Information, Biology and Business*, Knutsford (UK): Texere Publishing.
11. Nicolis G., Prigogine I. (1977) *Self-organization in nonequilibrium systems: from dissipative structures to order through fluctuations*, NY: Wiley.
12. Agafonova M.S. (2021) Theoretical justification of the need for adaptation in the management of a construction enterprise. *Ekonomika i predprinimatel'stvo [Economics and Entrepreneurship]*, 8 (133), 1233–1237. DOI: <https://doi.org/10.34925/EIP.2021.133.8.239>
13. Bagrinovskii K.A. (1999) O metodakh adaptivnogo upravleniia v perekhodnoi ekonomike [On Adaptive Management Methods in a Transitional Economy]. *Ekonomicheskaiia nauka sovremennoi Rossii [Economic Science in Contemporary Russia]*, 2, 30–39.
14. Derevitskii D.P., Fradkov A.L. (1981) *Prikladnaia teoriia adaptivnykh sistem upravleniia [Applied theory of adaptive control systems]*, Moscow: Nauka.
15. Elizarova E.Iu. (2009) Mozaika naukoemkogo biznesa [Mosaic of knowledge-intensive business]. *ECO*, 11 (425), 131–146.
16. Zyablitskaya N.V. (2012) Adaptive capacity as economic category. *Ekonomika i ekologicheskii menedzhment [Economics and Environmental Management]*, 1, 183–188.
17. Kleiner G.B. (2023) System paradigm as a theoretical basis for strategic economic management in modern conditions. *Management Sciences*, 13 (1), 6–19. DOI: <https://doi.org/10.26794/2304-022X-2023-13-1-6-19>
18. Efendiev B.A. (2008) Razrabotka i funktsionirovanie adaptivnykh sistem upravleniia organizatsiy. *Russian Journal of Entrepreneurship*, 9 (11), 21–25.
19. Babkin A.V., Mikhailov P.A., Shkarupeta E.V., Chen Leifei (2025) A toolkit for assessing the digital maturity of an intelligent industrial ecosystem based on coevolution and ecosystem synergy. *π -Economy*, 18 (4), 32–53. DOI: <https://doi.org/10.18721/JE.18402>
20. Ianenko M.B., Ianenko M.E. (2025) Transformational changes in the economy in the context of the development of digital business models: influence factors, problems, prospects. *π -Economy*, 18 (2), 87–99. DOI: <https://doi.org/10.18721/JE.18205>
21. Krakovskaia I.N., Korokoshko Yu.V., Anikina N.V. (2024) Development of business models of industrial enterprises in the digital economy: conceptual aspects. *π -Economy*, 17 (3), 52–67. DOI: <https://doi.org/10.18721/JE.17304>
22. Kurnikova M.V. (2025) Assessing the technological maturity of Russian regions as a foundation for their technological sovereignty and global competitiveness. *π -Economy*, 18 (4), 105–123. DOI: <https://doi.org/10.18721/JE.18406>
23. Afanasev K.V., Kalinin A.R. (2025) Tools for forecasting regional economic growth using big data and business intelligence technologies. *π -Economy*, 18 (2), 73–86. DOI: <https://doi.org/10.18721/JE.18204>
24. Bulatova N.N., Dudin V.S., Alekseev A.V. (2024) Formation of a digital ecosystem of regional transport and logistics infrastructure. *π -Economy*, 17 (3), 68–80. DOI: <https://doi.org/10.18721/JE.17305>
25. Shishkova A., Makarov V. (2025) Russian Digital Ecosystems in b2c Segment: Current State and Development Prospects. *Herald of SPbSUT*, 3 (3), 3.
26. Makarov V.V., Pavlova E.V. (2024) Impact of ecosystems on digital transformation of economy. *Journal of Legal and Economic Studies*, 2, 209–214. DOI: <https://doi.org/10.26163/GIEF.20-24.83.47.030>



27. Khamidova P.S., Babaeva Z.S. (2025) The digital ecosystem as a driver of sustainable regional development. *Russian Journal of Management*, 10, 266–286. DOI: <https://doi.org/10.29039/2500-1469-2025-13-10-266-286>
28. Kalenov O.E. (2022) Digital Ecosystems of Organizations. *Vestnik of the Plekhanov Russian University of Economics*, 1 (121), 139–147. DOI: <https://doi.org/10.21686/2413-2829-2022-1-139-147>
29. Serdyukov S.D., Serdyukova N.K. (2023) Developing digital ecosystems and platforms for tourism and services. *Kreativnaya ekonomika*, 17 (8), 2887–2908. DOI: <https://doi.org/10.18334/ce.17.8.118525>
30. Tashkinov A.G. (2023) Stages of formation of a strategy for digital transformation of an industrial enterprise. *π-Economy*, 16 (6), 117–141. DOI: <https://doi.org/10.18721/JE.16609>
31. Babkin A.V., Tashkinov A.G. (2025) A combined approach to project management of digital transformation of industrial enterprises in the context of Industry 4.0. *Russian Journal of Industrial Economics*, 18 (4), 472–485. DOI: <https://doi.org/10.17073/2072-1633-2025-4-1553>
32. Suvorov N.V., Akhunov R.R., Gubarev R.V., Dzyuba E.I., Fayzullin F.S. (2020) Applying the Cobb-Douglas Production Function for Analysing the Region's Industry. *Ekonomika regiona [Economy of region]*, 16 (1), 187–200. DOI: <https://doi.org/10.17059/2020-1-14>
33. Tashkinov A.G. (2026) Adaptive Management of Hybrid Digital Resources of Enterprise Based on Modified Cobb–Douglas Production Function in Conditions of Industry 4.0. *Vestnik of the Plekhanov Russian University of Economics*, 1, 5–12. DOI: <https://doi.org/10.21686/2413-2829-2026-1-5-12>
34. Tashkinov A.G. (2024) The implementation of lean and digital management techniques using artificial intelligence in industrial settings. *Discover Artificial Intelligence*, 4 (1), art. no. 94. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44163-024-00186-5>
35. Babkin A.V., Tashkinov A.G. (2024) Stages of development of a methodological approach for assessing the effectiveness of digital transformation projects of an industrial enterprise. *Proceedings of the Southwest State University. Series: Economics. Sociology. Management*, 14 (4), 70–93. DOI: <https://doi.org/10.21869/2223-1552-2024-14-4-70-93>
36. Tashkinov A.G. (2025) The application of industry 4.0 into the company's production activities through effective decision-making. *Scientific Reports*, 15, art. no. 34202. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-15688-0>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT AUTHOR

ТАШКИНОВ Алексей Григорьевич

E-mail: alekss.perm@gmail.com

Aleksey G. TASHKINOV

E-mail: alekss.perm@gmail.com

Поступила: 17.12.2025; Одобрена: 12.02.2026; Принята: 13.02.2026.

Submitted: 17.12.2025; Approved: 12.02.2026; Accepted: 13.02.2026.