Научная статья

https://doi.org/10.54220/v.rsue.1991-0533.2025.91.3.004
УДК 004.6+004.896

ЭТАЛОННЫЕ АРХИТЕКТУРЫ ЦИФРОВОГО ПРОИЗВОДСТВА. ИХ РОЛЬ В ФОРМИРОВАНИИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БИЗНЕС-ПРОЦЕССАМИ ПРЕДПРИЯТИЯ

***Третьяченко Т. В.*[1]*, *Быкадоров Н. А.*[1]**
[1] *Ростовский государственный экономический университет (РИНХ), Ростов-на-Дону, Россия*
** tat050161@yandex.ru*

Аннотация. *Введение.* Применение цифровых технологий в производственном процессе предприятия позволяет ему, с одной стороны, повышать эффективность и возможности интеграции функций производства, логистики и технического обслуживания, с другой стороны, усложняет систему управления по причине роста объемов все более взаимосвязанной производственной информации. Все это в совокупности приводит к необходимости структурирования информационных систем в соответствии с растущей потребностью обработки большого и разнообразного объема данных, то есть решению задачи системной архитектуры. *Материалы и методы.* В основу исследования легли работы ученых, в сфере интересов которых – вопросы проектирования моделей эталонного вида архитектуры, относящихся к цифровому производству. При работе над статьей авторы использовали классические методы обработки экономико-статистической информации, а также приемы построения и исследования регрессионных моделей. *Результаты исследования.* В этой статье авторы размышляют о так называемой «эталонной модели архитектуры», определяющей дизайн информационных систем, архитектуру программных систем, организацию и взаимодействие компонентов программного обеспечения. Модели эталонного вида архитектуры – это модели информационных функций и их связей, которые обеспечивают структурированный шаблон с общей терминологией. *Обсуждение.* За последние десятилетия было предложено много различных эталонных моделей архитектуры, имеющих отношение к производственным цифровым системам. Однако промышленные приложения предложенных эталонных моделей архитектуры немногочисленны, к тому же они из-за различных уровней их применения трудносравнимы и сложно анализируемы. В настоящей статье авторы рассматривают и классифицируют модели эталонной архитектуры, используемые для поддержки цифровых систем на производстве. *Заключение*. В статье предложены критерии для определения модели как «эталонной архитектуры», приведен обзор и классификация различных точек зрения на эталонные архитектуры, рассматриваются пробелы в эталонных архитектурах цифрового производства, указываются потенциальные возможности для будущих исследований.

Ключевые слова: индустрия 4.0, интернет вещей (IoT), умное производство, киберфизические системы (CPS), цифровое производство, модель эталонного вида архитектуры.

Для цитирования: Третьяченко Т. В., Быкадоров Н. А. Эталонные архитектуры цифрового производства. Их роль в формировании системы управления бизнес-процессами предприятия. *Вестник Ростовского государственного экономического университета (РИНХ).* 2025;3(32):46-65. doi: 10.54220/v.rsue.1991-0533.2025.91.3.004.

Research article

JEL O33 M11 M15 L86 D24

REFERENCE ARCHITECTURES OF DIGITAL PRODUCTION. THEIR ROLE IN THE FORMATION OF THE ENTERPRISE'S BUSINESS PROCESS MANAGEMENT SYSTEM

***Tretyachenko T.*[1]*, *Bykadorov N.*[1]**
[1] *Rostov State University of Economics, Rostov-on-Don, Russia*
** tat050161@yandex.ru*

Abstract. *Introduction.* The use of digital technologies in the production process of an enterprise allows it, on the one hand, to increase the efficiency and integration of production, logistics and maintenance functions, and, on the other hand, complicates the management system due to the growing volume of increasingly interconnected production information. All this together leads to the need to structure information systems in accordance with the growing need to process a large and diverse amount of data, that is, to solve the problem of system architecture. *Materials and methods.* The research is based on the work of scientists whose field of interest is the design of models of a reference type of architecture related to digital production. When working on the article, the authors used classical methods of processing economic and statistical information, as well as techniques for constructing and researching regression models. *Research results.* In this article, the authors reflect on the so-called «reference architecture model» that defines the design of information systems, the architecture of software systems, the organization and interaction of software components. Reference architecture models are models of information functions and their relationships that provide a structured template with common terminology. *Discussion.* Over the past decades, many different architectural reference models have been proposed that are relevant to digital production systems. However, the industrial applications of the proposed reference architecture models are few in number, and they are difficult to compare and analyze due to the different levels of their application. In this article, the authors review and classify the reference architecture models used to support digital systems in production. *Conclusion.* The article proposes criteria for defining the model as a «reference architecture», provides an overview and classification of various points of view on reference architectures, examines gaps in reference architectures of digital production, and indicates potential opportunities for future research.

Keywords: industry 4.0, internet of things (IoT), smart manufacturing, cyber-physical systems (CPS), digital manufacturing, model of the reference architecture type.

For citation: Tretyachenko T., Bykadorov N. Reference architectures of digital production. Their role in the formation of the enterprise's business process management system. *Vestnik of Rostov State University of Economics (RINH).* 2025;3(32):46-65. doi: 10.54220/v.rsue.1991-0533.2025.91.3.004.

Введение

Применение цифровых технологий в производственных процессах привело к смене парадигмы в обрабатывающей промышленности. Для создания производственных систем следующего поколения компании используют постоянный поток информации из тесно связанных между собой систем, чтобы повысить эффективность процессов, улучшить ди-

зайн продукта и расширить возможности приложений логистики и технического обслуживания [48]. Существует потребность в новых системных архитектурах для создания и поддержки этих взаимосвязанных систем [30].

При разработке системных моделей архитектуры используются так называемые модели эталонного вида архитектуры, которых на протяжении многих лет было предложено достаточное большое число, что объясняется собственным представлением о цифровом производстве каждым из авторов [35, 43, 46, 47, 48]. Роль моделей эталонного вида архитектуры заключается в предоставлении шаблонного решения для архитектуры в конкретной предметной области, а также в формировании словаря общепринятых понятий для обсуждения реализаций такой архитектуры. Несмотря на то что модели эталонного вида архитектуры предназначены для упрощения процесса проектирования, их применение в производстве ограничено. Сравнивать и оценивать такие модели сложно, поскольку они предназначены для различных уровней и разных областей применения.

Целью данной статьи является обзор и классификация моделей эталонного вида архитектуры цифрового производства для понимания и выбора той или иной модели архитектуры для предприятий обрабатывающего производства.

Рассмотрим некоторые ключевые термины, используемые в статье, в трактовке различных авторов.

Цифровое производство определяется как проектирование и оптимизация производственных процессов в виртуальной среде, «применение цифровой информации (из различных источников, форматов, владельцев) для улучшения производственных процессов, цепочек поставок, продуктов и услуг» [27]; оно позволяет компаниям моделировать, тестировать и настраивать производственные цепочки с использованием специализированных программных решений, оно охватывает широкую область, включая такое направление, как индустрия 4.0, инициированное правительством Германии в 2011 г. для преобразования производства с помощью цифровизации и новых технологий [24]. Цифровое производство (или умное производство [1]) активизирует применение сетевых информационных технологий в процессе производства и управления цепочками поставок [5, 17, 36, 44, 45], описывает «применение цифровой информации (из различных источников, форматов, владельцев) для улучшения производственных процессов, цепочек поставок, продуктов и услуг» [26].

Интернет вещей (IoT) – это сеть физических устройств, которые подключаются к интернету и обмениваются данными. Датчики позволяют реальным предметам «общаться» друг с другом и с цифровыми системами путем обмена данными с помощью уникальной схемы адресации для достижения общей цели [15, 42].

Промышленный интернет вещей, объединяющий компьютерные сети и подключенные к ним промышленные объекты, для понимания производственных процессов включает в себя области межмашинного взаимодействия (M2M) и технологии промышленной связи для приложений автоматизации [28].

Киберфизические системы (CPS) – это взаимодействующие вычислительные единицы, которые связаны с окружающим физическим миром и его процессами [13].

Архитектура предприятия – это способ понимания различных элементов, которые в совокупности составляют предприятие, и то, как эти элементы взаимосвязаны [6].

Модель эталонного вида архитектуры представляет собой абстрактное описание архитектуры общего уровня, которая может быть использована для «привязки» и сравнения между собой различных практических моделей архитектур. Она определяет комплекс концепций, методов и моделей, необходи-

мых для проектирования и сопровождения современного предприятия (любого типа) в течение всего времени его существования [7].

В зарубежной литературе термин «эталонная архитектура» (или метамодель) используется применительно к различным моделям, включая системные архитектуры, фреймворки и платформы [37, 38]. Хотя модели взаимосвязаны друг с другом, существует множество существенных различий, которые могут привести (и привели) к неоднозначной трактовке термина «эталонная архитектура».

Метамодель – это комплекс взаимосвязанных классов, где каждый класс является цифровой спецификацией, то есть методом описания концепции, за которой стоит определенный набор объектов реального мира и их взаимосвязи. Каждый класс представляет собой отдельную онтологическую единицу. В отечественной литературе понятие метамодели как чуждое российскому научному дискурсу, к сожалению, не разъясняется.

Поскольку целью исследования являются модели эталонного вида архитектуры, рассмотрим их более подробно во взаимосвязи с вышерассмотренными понятиями.

Материалы и методы

Данное исследование опирается на труды отечественных и зарубежных ученых, посвященные эталонным архитектурам, анализ достаточного числа публикаций, включая научные материалы, стандартные документы и технические отчеты, если в них рассматривается модель, которая обозначается как «эталонная архитектура», вопросы цифровой трансформации промышленных предприятий, экономико-математического моделирования при обосновании организационно-управленческих решений, описания пробелов в исследованиях архитектур промышленных цифровых систем (табл. 1).

Таблица 1 – **Некоторые из работ зарубежных ученых, посвященных исследованию «эталонных архитектур»** [39]
Table 1 – **Some of the works of foreign scientists devoted to the study of «reference architectures»** [39]

Публикация	Выходные данные публикации
Методологии проектирования CIM-систем: обзор	G. Doumeingts, B. Vallespir, and D. Chen. Metlhodologies for designing CIM systems: A survey. Computers in Industry, 25:263-280, 1995
Основанный на холонических компонентах подход к реконфигурируемой архитектуре управления производством	Jin Lung Chirn, D. C. McFarlane. A Holonic Component-based Approach to Reconfigurable Manufacturing Control Architecture. Proceedings – International Workshop on Database and Expert Systems Applications, DEXA, 2000, January, p. 219-223. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2000
Определение систем графического моделирования с использованием метамоделей, основанных на ограничениях	G. Karsai, G. Nordstrom, A. Ledeczi, and J. Sztipanovits. Specifying Graphical Modeling Systems Using Constraint-based Metamodels. IEEE International Symposium on Computer-Aided Control System Design MM2-5, vol. 2, p. 20, 2000
Разработка систем управления производством с использованием технологий PRO и делегирования полномочий	P. Verstraete, Bart Saint Germain, Paul Valckenaers, Hendrik Van Brussel, Jan Van Belle, Hadeli Karuna, Jan Van Belle, and Hadeli Karuna. Engineering manufacturing control systems using PROSA and delegate MAS. International Journal of Agent-Oriented Software Engineering, 2:62–89, 2008
Интернет вещей – Архитектура IoT – Конечный результат D1.5 – Окончательная эталонная архитектурная модель для IoT версии 3.0	M. Bauer, M. Boussard, A. Lucent, N. Bui, and F. Carrez. Internet of Things – Architecture IoT-A Deliverable D1.5 – Final architectural reference model for the IoT v3.0, 2013

Публикация	Выходные данные публикации
Сходство модели доказательств и совместимость с совместимостью в облачных технологиях индустрии 4.0	G. Pedone and I. Mezg´ar. Model similarity evidence and interoperability affinity in cloudready Industry 4.0 technologies. Computers in Industry, 100:278-286, 9 2018
Разработка эталонных архитектур для промышленного интернета вещей	S. R. Bader, M. Maleshkova, and S. Lohmann. Structuring reference architectures for the industrial Internet of Things. Future Internet, 11, 7 2019
Обзор эталонных моделей интеллектуального производства, основанных на базовой метамодели	Soonhung Han. A review of smart manufacturing reference models based on the skeleton meta-model. Journal of Computational Design and Engineering, 7:323-336, 6 2020
Эталонная архитектура для индустрии 4.0 и интеллектуального производства: модели для интернета вещей	J¨org Megow. Reference architecture models for industry 4.0, smart manufacturing and IoT. An introduction, 2020
Индустрия 4.0: вклад голонических производственных архитектур контроля и будущие задачи	W. Derigent, O. Cardin, and D. Trentesaux. Industry 4.0: contributions of holonic manufacturing control architectures and future challenges. Journal of Intelligent Manufacturing, 2020
Расширение области применения эталонных моделей для интеллектуальных фабрик	N. Soares, P. Monteiro, F. J. Duarte, and R. J. Machado. Extending the scope of reference models for smart factories. Procedia Computer Science, Vol. 180, p. 102-111, 2021
Архитектуры киберфизических систем для промышленного интернета вещей в индустрии 4.0: обзор литературы	D. G. S. Pivoto, L. F. F. de Almeida, R. da Rosa Righi, J. P. C. Rodrigues, A. Baratella Lugli, and A. M. Alberti. Cyber-physical systems architectures for industrial internet of things applications in Industry 4.0: A literature review. Journal of Manufacturing Systems, 58:176-192, 1 2021

В процессе подготовки данной статьи были применены методы сопоставления, контраста и темпорального сравнения при анализе академических исследований и практических решений, а также методы обобщения и структурирования специфических аспектов организации производственной деятельности предприятий в условиях внедрения цифровых технологий.

Результаты исследования

Современное управление конкурентоспособностью отечественных предприятий должно базироваться на продуманной и детализированной информационной основе, а также на специализированной инновационной концепции, которая должна обеспечивать систематическое проектирование предприятия и его внешнего окружения в виде модели. Одной из таких концепций является Концепция «архитектуры предприятия», появившаяся в 1987 г., представляющая собой важный организационный фактор предприятия, способствующий повышению его конкурентоспособности, позволяющий непрерывно отслеживать внутреннюю среду предприятия, характеризующуюся постоянной необходимостью внесения изменений, обусловленных нестабильной внешней средой. Она является одной из наиболее эффективных управленческих инноваций для повышения эффективности отечественных предприятий реального сектора экономики.

Концепция «архитектуры предприятия» позволяет наглядно и комплексно представить деятельность современного предприятия, проводить изменения в организации его деятельности, поскольку есть четкое понимание объекта таких изменений в спроектированной целостной модели предприятия. Кроме того, «архитектура предприятия» выступает в качестве механизма поддержки трансформации бизнес-процессов посредством информационных технологий, служит инструментом для осмысления различных компонентов, формирующих предприятие, и характера их взаимодействия, это целостное представление о его деятельности, охватывающее как статичные, так

и динамичные аспекты. Главное преимущество данной концепции заключается в том, что «архитектура предприятия» объединяет корпоративную ИТ-архитектуру предприятия с его бизнес-архитектурой, что позволяет обеспечить эффективность управления. Связь основных понятий концепции «архитектура предприятия», а также ее преимущества показаны на рисунке 1.

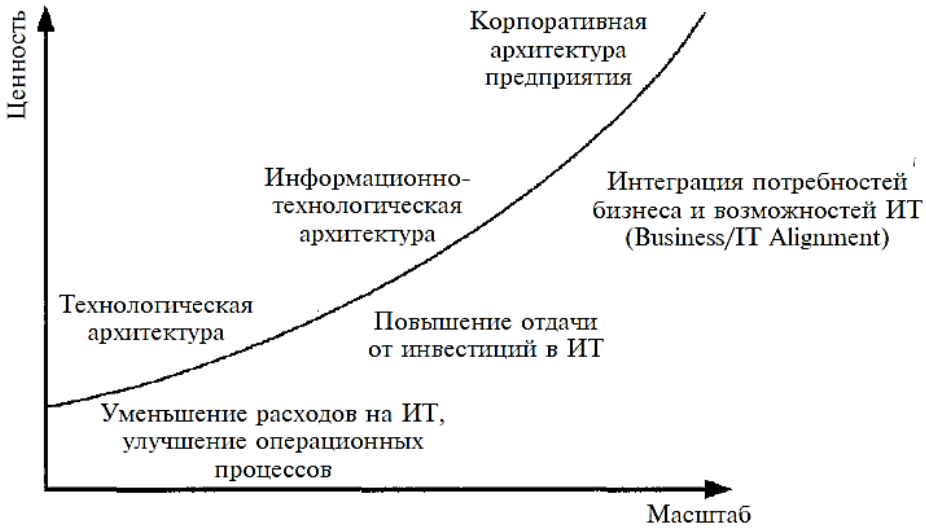


Рисунок 1 – **Эволюция представлений об архитектуре предприятия** [20, с. 115]
Figure 1 – **The evolution of ideas about the architecture of the enterprise** [20, с. 115]

Анализ различных подходов к созданию архитектуры предприятия в обзорных публикациях обычно затрагивает такие известные методологии, как Zachman Framework, TOGAF, FEA и модели Gartner (см., например, [8, 19, 20] и множество других источников).

В ряде случаев авторы также обращают внимание на MDA (архитектура, управляемая моделями) [21], GRAI-GIM (интегрированная методология GRAI) [12], E2AF (расширенный фреймворк архитектуры предприятия) [9], концепцию 3D-предприятия [10, 11] и некоторые другие, менее распространенные подходы.

Учитывая, что в современных кризисных условиях отечественные промышленные предприятия вынуждены сокращать материальные, трудовые и временные затраты на внедрение изменений, а новые комплексные разработки в сфере описания предприятия, согласования и сочетания его многообразных компонентов между собой, не требуют значительных финансовых вложений, то обращение к концепции архитектуры предприятия, представляющей собой многогранную модель, отображающую все основные составляющие предприятия и их взаимосвязи, включая бизнес-процессы, технологическую инфраструктуру и информационные системы, интегрированные в едином информационном пространстве в целях устранения организационных барьеров и гармонизации бизнес-процессов для повышения эффективности его деятельности за счет синергетического эффекта, с их стороны стало чрезвычайно востребовано.

Исходя из того, что архитектура предприятия представляет собой модель структуры и связей частей системы [2], то ее создание является сложной проектной работой, степень сложности которой заключается в выборе стандарта (эталонной архитектуры), который будет наиболее эффективным в условиях конкретного предприятия, которое представляет собой сложнейшую систему, обладающего собственной разветвленной структурой и совокупностью многообразных составляющих компонентов (рис. 2).



Рисунок 2 – **Модель архитектуры предприятия** [14, с. 65]
Figure 2 – **Enterprise architecture model** [14, с. 65]

Для моделирования предприятий было предложено множество подходов. Среди ранних методов, в значительной степени ориентированных на функциональное представление бизнес-субъектов, можно выделить набор моделей IDEF или метод GRAI-GIM [29]. Современные методы перешли к процессно-ориентированному подходу, чтобы более адекватно моделировать поведение предприятия, и особенно его бизнес-процессов.

Подход к построению системной архитектуры предприятия с целью его преобразования из текущего состояния к целевому через ряд промежуточных этапов можно считать наиболее зрелым. Ключевым аспектом этого подхода является создание фреймворка, то есть каркаса, адаптация которого под нужды конкретной системы будет легко осуществима.

Архитектурный фреймворк – это упорядоченная совокупность процессов, техник, детализированных описаний артефактов, визуальных моделей и практических методологий, предназначенных для разработки и эффективного применения архитектуры, адаптированной к нуждам конкретного предприятия, он имеет частично или полностью предписанный набор компонентов или шаблонов взаимодействия.

Фреймворки описывают конкретные экземпляры эталонной архитектуры со строгими правилами проектирования и реализации, их можно использовать для разработки множества системных архитектур, специфичных для конкретных приложений. Фреймворки представляют собой строго структурированные системы, которые определяют состав компонентов и порядок их взаимодействия. Их преимущество состоит в увеличении скорости разработки архитектуры предприятия, поскольку система создается на основе разработанного для многократного использования каркаса, обеспечении безопасности.

Параллельно с моделированием предприятия стали рассматриваться вопросы построения его производственных процессов на основе автоматизации, что должно было обеспечивать контроль и мониторинг всех этапов жизненного цикла.

В начале работы по созданию комплексных моделей производственных систем предприятий обсуждались две основные парадигмы: компьютерно-интегрированное производство (КИП или CIM-подход к построению производства с использованием компьютеров, управляющих всеми производственными процессами) и холонические системы управления производством (модели, основанные на концепции холона – автономного самоуправляющегося элемента системы). В рамках подхода CIM для по-

вышения эффективности используется интеграция производственного предприятия в целом, привлекаются совместимые системы в сочетании с новыми концепциями управления, а холоническая парадигма рассматривает производственную систему как состоящую из автономных объектов, сотрудничающих между собой для достижения общей цели. В настоящем исследовании при рассмотрении моделей эталонного вида архитектуры авторы опираются на положения холонической парадигмы Артура Кёстлера [39] («холон» от греческого слова «холос», что означает целое, с добавлением суффикса «-он», означающего «часть»; обладая таким свойством, как дуализм, каждый холон на любом уровне иерархии одновременно имеет характер автономного целого (подсистемы) и зависимой части).

Памятуя о том, что любое производственное предприятие представляет собой сложную систему, находящуюся в условиях стремительно развивающихся технологий, и понимание принципов построения архитектурных решений является в этом случае критически важным, обратимся к концепции системной архитектуры, которая концептуализирует структуру и функции сложной системы посредством абстрактного описания ее компонентов и того, как они соотносятся друг с другом.

Системная архитектура представляет собой модель реализованной системы, предназначенную для решения конкретной задачи. Распространенными моделями являются сети Петри (математический аппарат для моделирования динамических дискретных систем. Впервые описаны Карлом Петри в 1962 г.), блок-схемы и диаграммы, которые отображают взаимосвязи между машинами, датчиками и контроллерами в рамках реализованной системы.

Системные архитектуры обладают тремя основными характеристиками, а именно – они определяют компоненты реализуемой системы, взаимосвязи и взаимодействия между этими компонентами и правила управления этими взаимосвязями и взаимодействиями. К примеру, системная архитектура для холонической производственной системы должна включать спецификацию холонов, диаграммы для описания отношений и взаимодействий между ними, описания интерфейсов, шаблонов связи и соответствующих протоколов.

Основой для построения системной архитектуры предприятия служат эталонные модели, которые как правило описывают все системные элементы и их взаимодействия и могут быть рассмотрены для различных приложений, они сочетают все характеристики системы с руководящими принципами проектирования, терминологией и рекомендациями по технологиям, которые специфичны для конкретного типа предприятия и используемых им концепций проектирования.

В контексте цифрового производства модели эталонной архитектуры следуют идее метамоделей, определяя дизайн системных архитектур и предоставляя структурированное шаблонное решение с общей терминологией [34], и могут быть абстрагированы (метауровень включает основные абстракции эталонных архитектур с точки зрения их организации и онтологии) [31, 32].

Метамоделирование является одним из самых популярных подходов, который активно применяется как в научных исследованиях, так и в практической деятельности, особенно в сфере разработки программного обеспечения. Подход был предложен Карсаем [31], поскольку индивидуальное моделирование и внедрение цифровых решений на практике оказались затратными, и, чтобы снизить расходы на решение этих вопросов, было предложено выделить второй уровень моделирования – метауровень. Несмотря на некоторое сходство с другими методами, этот подход отличается двумя важными особенностями. Во-первых, предлагаемые уровни метамоделирования в этом методе свя-

заны между собой через специализацию и наследование, а не через создание экземпляров. Во-вторых, в рамках этого подхода отсутствует формализованное представление об эталонной архитектуре).

Отметим, что не все модели, представляемые в литературе как «эталонные архитектуры», соответствуют необходимым критериям (полнота, понятность, реализуемость и адаптивность), чтобы считаться таковыми.

Опираясь на определения и требования, сформулированные для эталонных архитектур, отмечая, что в мире предложено множество эталонных архитектур, Я. Кайзер, Д. Макфарлейн и Г. Хокридж в своем исследовании Review and Classification of Digital Manufacturing Reference Architectures выделили, классифицировали и сгруппировали в 5 классов 61 эталонную архитектуру [39]:

(A) – эталонные архитектуры Умного производства;

(B) – эталонные архитектуры Интернета вещей для производства;

(C) – эталонные архитектуры для Управления производством;

(D) – эталонные архитектуры Киберфизических систем для производства;

(E) – общие эталонные архитектуры Интернета вещей.

Эталонные архитектуры интеллектуального производства (класс A) подразделяются на платформы, основанные на стандартах, и платформы, основанные на технологиях.

Платформы, как правило, представляют собой интегрированные решения, которые предназначены для конкретных приложений, они также могут описывать более масштабные проблемы. Платформы для цифрового производства сочетают принципы проектирования с подходящей цифровой средой.

Цифровая среда предполагает сотрудничество различных заинтересованных сторон для обмена навыками и знаниями для достижения общей цели. Платформы обеспечивают гибкость для бизнеса, полагаясь на сервисы и технические компоненты для управления взаимодействиями между организациями и приложениями, а также поддерживают интеграцию новых технологий.

Помимо технических аспектов, эти платформы имеют операционный и деловой аспекты, они отличаются открытостью, стандартизацией и технической перспективой (включает в себя общие рекомендации по проектированию или эталонные архитектуры).

Аналогичным образом, среди эталонных архитектур Киберфизических систем для производства (класс D) выделяют платформы, основанные на технологиях, и абстрактные эталонные модели Киберфизических систем для производства (CPS) (см. рис. 3).

A – эталонные архитектуры данного класса обеспечивают структуру для проектирования компонентов и систем Умного производства и Индустрии 4.0. Эти метамодели описывают рамки стандартов или предлагают технологические архитектуры для достижения горизонтальной интеграции производственных и корпоративных систем. В отечественных нормативных актах они описаны в стандарте ГОСТ Р 59799-2021 «Умное производство. Модель эталонной архитектуры индустрии 4.0 (RAMI 4.0)».

A1 – этот подкласс содержит эталонные архитектуры, состоящие из набора представлений, измерений и моделей жизненного цикла, а также стандартную платформу для интеллектуального производства. В частности, RAMI 4.0 (описана ГОСТ Р 70991-2023. Национальный стандарт Российской Федерации. Цифровая промышленность. Руководство по применению модели эталонной архитектуры RAMI 4.0) и NIST SME (разработана Национальным институтом стандартов и технологий США в 1980 г.) характеризуют эталонные архитектуры, которые предоставляют набор стандартов и моделируют весь жизненный цикл соответствующих корпоративных процессов. Позднее путем анализа существующих эталонных архитектур были разработаны

новые метамодели. К примеру, эталонная архитектурная модель Edge-компьютинг (RAMEC) [22] концентрируется на промышленной автоматизации и предоставляет метамодель для проектирования компонентов, основанных на подходе к обработке данных, при котором большая часть вычислений выполняется не на удаленных серверах, а максимально близко к источнику их появления – «на краю сети».

A2 – в отличие от абстрактных, основанных на стандартах систем интеллектуального производства, эталонные архитектуры этого подкласса основаны на технологиях и, таким образом, являются более конкретными. Большинство эталонных моделей используют сервисы для достижения целей Интеллектуального производства и Индустрии 4.0, включая: IBM Индустрия 4.0 [33], сервис-ориентированный интеллектуальный продукт NIST «Интеллектуальная производственная архитектура» [41], штутгартскую ИТ-архитектуру для производства (SITAM), обеспечивающую интеграцию, ориентированную на обслуживание, расширенную аналитику, а также мобильное предоставление информации [40], и эталонный цифровой двойник как совокупность облачных сервисов, обеспечивающих хранение и анализ данных, получаемых от датчиков, для моделирования реально существующих объектов и визуализации их виртуальных представлений – модель Digital Twin-as-a-Service (DTaaS, «Цифровой двойник как услуга») [4]. Хотя последний подход также использует цифровые двойники, лишь немногие подходы основаны на технологиях, отличных от сервисов, таких как производственный блокчейн вещей (MBCoT) [25], который объединяет блокчейн с промышленным интернетом вещей (IIoT) для настройки отслеживаемых и децентрализованных интеллектуальных производственных систем.

B – эталонные архитектуры этого класса служат руководством для создания IoT и компонентов промышленного интернета вещей (IIoT), которые конкретно охватывают производственные приложения. Эти метамодели структурированы и состоят из набора архитектурных представлений. Помимо RAMI 4.0 и NIST SME, IIRA определяет метамодель (стандарты и методология проектирования) для IIoT.

C – этот класс содержит эталонные модели, которые поддерживают разработку систем управления производством. Эти метамодели описывают интеграцию корпоративных систем и систем управления, а также предлагают архитектуры распределенного автономного управления.

C1 – эталонные модели данного подкласса основаны на концепциях компьютерно-интегрированного производства. Хотя за последние годы в мире было предложено достаточное число эталонных архитектур CIM, включая ICAM, CAM-I, NBS, ESPRIT Project 932 и IMPACS, GRAI и GIM, а также PROCOS и MMCS, однако только PERA и CIMOSA получили широкое практическое применение.

CIMOSA состоит из платформы, управляемой событиями которой описывается полный жизненный цикл интегрированного предприятия, используя четыре представления (функциональное, информационное, ресурсное и организационное).

PERA интегрирует предприятие и системы управления, моделируя бизнес- и производственные процессы, а также части информационно-управляющей системы иерархически и рассматривается как мета-метамодель.

C2 – этот подкласс содержит эталонные архитектуры для распределенного автономного управления производственными системами. Метамодели этого подкласса разработаны в рамках концепции холонического производства. Эталонные архитектуры PROSA, ADACOR и HCBA спроектированы в рамках этой концепции. Метамодель PROSA служит шаблоном для последующих моделей, архитектура на основе холонических

компонентов HCBA и адаптивная архитектура холонического управления ADACOR – основными эталонными архитектурами для распределенного автономного управления производством.

Децентрализованная архитектура HCBA состоит из автономных, модульных, взаимодействующих и интеллектуальных строительных блоков, которые способны справляться с быстрыми изменениями, создавая реконфигурируемые производственные системы. ADACOR использует руководящий орган для динамического баланса между централизованными и децентрализованными структурами, оптимизируя производственную систему и ускоряя реакцию на неожиданные сбои.

D – метамодели этого класса служат руководством при создании CPS для интеллектуальных производственных процессов и приложений, используемых в Индустрии 4.0. Несмотря на то что некоторые из этих эталонных архитектур включают в себя организацию, например, слои или уровни иерархической структуры, акцент делается на создании систем, основанных на компонентном подходе.

D1 – основанные на концепциях CPS, эталонные архитектуры этого подкласса предоставляют абстрактные структуры проектирования. Существуют две группы абстрактных фреймворков CPS (киберфизических систем). В первую группу входят архитектура 5C, модель 8C и архитектура CPS Shop Floor, которые предоставляют руководство по разработке компонентов CPS для интеллектуального производства и Индустрии 4.0.

D2 – в этом подклассе технологии характеризуют основу эталонных архитектур для производственных приложений. Подобно основанным на технологиях интеллектуальным производственным платформам, эти метамодели CPS более конкретны по сравнению с предыдущим подклассом.

E – эталонные модели этого класса обеспечивает структуру для проектирования компонентов интернета вещей, их можно использовать и для создания производственных систем. Эталонные архитектуры этого класса ориентированы на общие приложения интернета вещей. К примеру, архитектура интернета вещей (IoT), разработанная Международным союзом электросвязи (ITU-IoT) и описанная в Рекомендациях ITU-T Y.2060 («Обзор интернета вещей»), опубликованных в 2012 г., содержит эталонную модель IoT, которая служит основой для стандартизации. Архитектура интернета вещей (IoT) WSO2 – структура, которая поддерживает управление устройствами IoT, обеспечивает аналитику данных и интеграцию с внешними системами. Она реализована в продукте WSO2 IoT Server-решении с открытым исходным кодом, которое позволяет предприятиям управлять устройствами IoT [23].

Эталонная архитектурная модель интернета вещей IoT-ARM представляет собой стандартизированную схему, которая описывает основные компоненты и взаимодействия в системе IoT, ее цель – обеспечить четкую структуру и руководящие принципы для проектирования и внедрения решений IoT [3].

Классификация эталонных архитектур цифрового производства на основе общих наборов функций, проведенная в работе Я. Кайзера и др., позволяет видеть существенные различия между классами цифрового производства, абстрактными и основанными на стандартах метамодели и эталонными архитектурами, основанными на технологиях, а также между эталонными архитектурами Киберфизических систем для производства и архитектурами распределенного автономного управления. Представленная классификация дает возможность среди большого выбора эталонных архитектур, проанализировав их применимость, выбрать ту, которая позволит более эффективно решить задачу построения архитектуры конкретного предприятия.



Рисунок 3 – **Система классификации эталонных архитектур цифрового производства** [39, с. 7]
Figure 3 – **Classification framework for digital manufacturing reference architectures** [39, p. 7]

Модели эталонной архитектуры для цифрового производства обеспечивают автономное выполнение бизнес-процессов в соответствии со структурой предприятия при проектировании его цифрового двойника или его цифровой системы, поскольку:

– используют стандартизированные программные интерфейсы, обеспечивающие согласованную информационную связь на основе универсальной и настраиваемой модели взаимодействия;

– регулируют информационный обмен с помощью интеграционных платформ, брокеров и систем обмена сообщениями, представляющих собой специализированные программные компоненты;

– мониторят показатели качества работы и управление отдельными элементами и системами с учетом их функциональных особенностей (например, точности) и технической реализации (например, производительности) за счет интеграции в архитектуру служб оркестровки вычислительных ресурсов и виртуализации микросервисов;

– организуют доступ всех заинтересованных сторон к исходным данным с «нижнего» (исполнительного) уровня с одновременным снижением нагрузки на сеть передачи данных. Это достигается путем преобразования сообщений в формат временных рядов, использования соответствующих баз данных временных рядов, а также специализированных компонентов для модификации данных (мапперов);

– разделяют все бизнес-процессы на простые, атомарные задачи – микросервисы. Каждый микросервис обладает информацией о своих потребностях и возможностях (входные и выходные данные) и функционирует как «черный ящик» по отношению к другим микросервисам, т. е. работает автономно и не зависит от их состояния и конфигурации.

Концептуальный вид эталонной архитектуры цифрового производства представлен на рисунке 4.

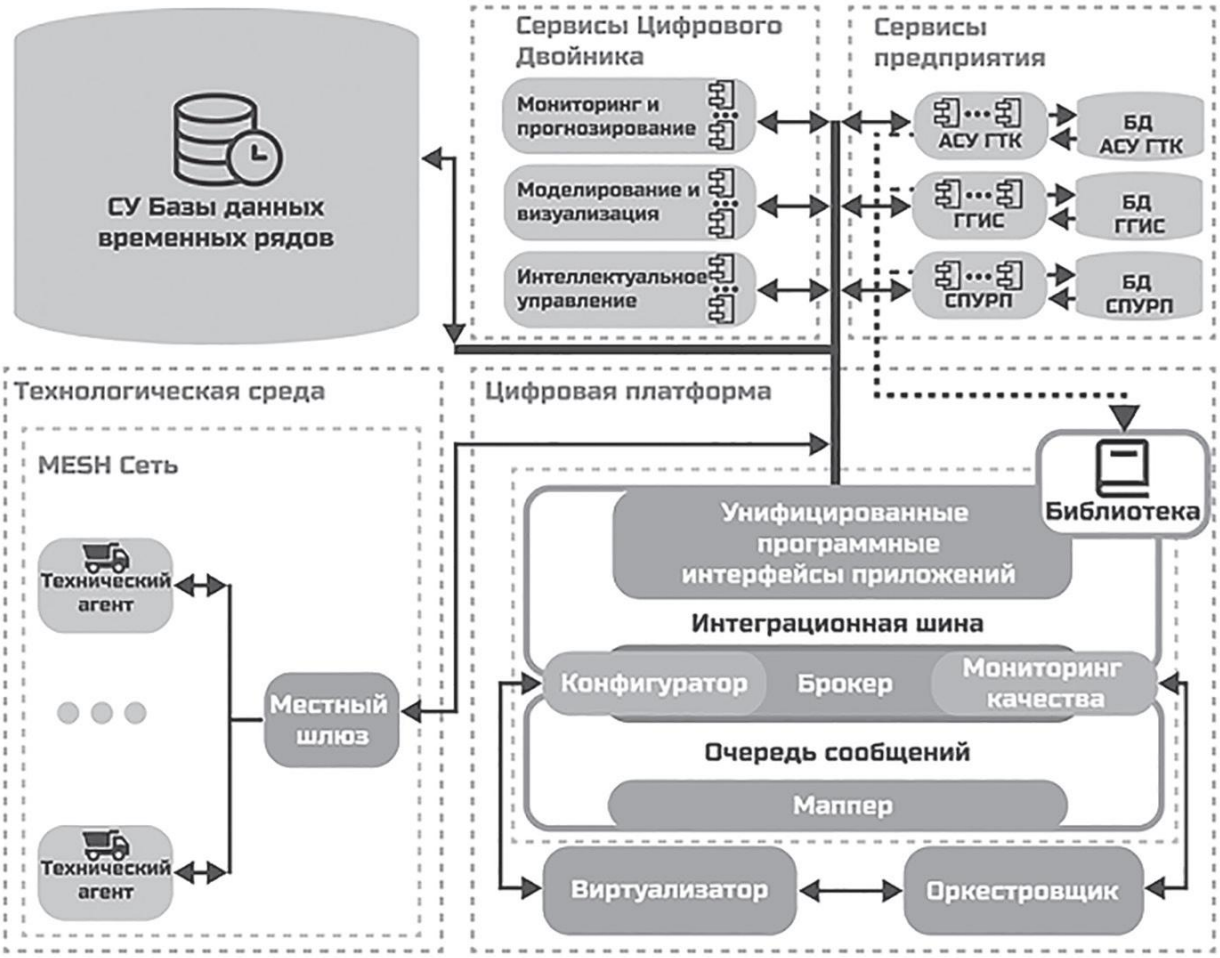


Рисунок 4 – **Концептуальная модель эталонного вида архитектуры цифрового производства** [16]

Figure 4 – **Conceptual model of the reference type of digital production architecture** [16]

Использование эталонных архитектур может дать максимальный эффект, если их сочетать со стандартами, руководствами и подмоделями, когда обеспечивается узкий диапазон путей разработки и широкий спектр приложений.

Однако, рассматривая подходы европейских ученых к проектированию архитектуры производства в рамках концепции «Индустрия 4.0» на основе эталонной архитектуры, А. П. Подлевских и А. Л. Фролов [18] отмечают, что сложность понимания и реализации стандарта при его внедрении, а также различный уровень технологий и цифровой зрелости предприятий могут привести к превышению экономических издержек над полученной прибылью. Расширяя этот тезис, отметим, что:

во-первых, ни одна из рассмотренных эталонных моделей не учитывает масштабов операционных процессов, протекающих на малых и средних предприятиях и у крупных производителей, и сложность их внедрения на предприятиях малого и среднего бизнеса;

во-вторых, современное цифровое производство, формирующее новые отраслевые стандарты, ставит задачи по обеспечению предприятий высококлассными профессионалами и передовым оборудованием, которое должно обслуживаться специалистами с глубокими знаниями и опытом. Однако на подавляющем числе предприятий таких специалистов, которые могли бы детально и быстро осуществить проработку архитектуры цифрового производства, нет [18];

в-третьих, поскольку предприятиям малого и среднего бизнеса из-за недостатка знаний, навыков и ресурсов может быть сложно внедрять интеллектуальные производственные технологии и связанные с ними концепции, то организация этого процесса на них требует иного подхода;

в-четвертых, рассмотренные метамодели не учитывают финансовые последствия проектирования и внедрения систем, что является основным препятствием на пути реализации цифровых технологий предприятиями малого и среднего бизнеса.

Заключение

Уникальность каждого производственного предприятия заключается в индивидуальной комбинации настроек и компонентов, формирующих структурно-функциональную архитектуру реализации бизнес-процессов. Это существенно затрудняет разработку единых, унифицированных требований к архитектуре цифрового предприятия. Например, в обрабатывающей промышленности, даже внутри одной группы компаний, идентичные бизнес-процессы могут выполняться вручную сотрудниками или с применением разнообразных информационных систем, автоматизированных комплексов или автономных устройств от различных поставщиков, что приводит к различиям в конфигурации. Следовательно, использование конкретных примеров архитектуры для установления общих требований к цифровому предприятию становится нецелесообразным. В контексте цифровой трансформации предприятий обрабатывающей промышленности возникает необходимость в идентификации и устранении их индивидуальных особенностей. Ключевым фактором для обеспечения автономного выполнения бизнес-процессов является улучшение взаимодействия между элементами технологической среды и информационно-управляющими системами. Этого можно достичь с помощью эталонной архитектуры, обладающей широкой применимостью благодаря своей ориентации на конкретную предметную область, соответствию стандартам взаимодействия между системами и использованию соответствующих технологий.

Список литературы

1. ГОСТ Р 70991-2023. Национальный стандарт Российской Федерации. Цифровая промышленность. Руководство по применению модели эталонной архитектуры RAMI 4.0 : утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 22.11.2023 № 1450-ст.

2. ГОСТ Р ИСО 15704-2022 Моделирование и архитектура предприятия. Требования к стандартным архитектурам и методологиям предприятия.

3. ПНСТ 438-2020 (ИСО/МЭК 30141:2018). Информационные технологии. Интернет вещей. Типовая архитектура : утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 18.08.2020 № 47-пнст.

4. Микро-потоки работ: сочетание потоков работ и потоковой обработки данных для поддержки цифровых двойников технологических процессов / А. Б. А. Алаасам, Г. И. Радченко, А. Н. Черных // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Вычислительная математика и информатика. – 2019. – Т. 8, № 4. – С. 100-116. – DOI: 10.14529/cmse190407.

5. *Амелин, С. В.* Современные аспекты организации цифрового производства // Экономинфо. – 2024. – Т. 19, № 2. – С. 5-18.

6. *Данилин, А., Слюсаренко, А.* Архитектура и стратегия: «Инь» и «янь» информационных технологий предприятия. – М, 2005. – 503 с.

7. *Галактионов, В. И.* Системная архитектура и ее место в архитектуре предприятия // Директор информационной службы. – 2002. – № 5.

8. *Грубич, Т. Ю., Шролик, А. В.* Анализ архитектуры предприятия // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государ-

ственного аграрного университета. – 2014. – № 104. – С. 417-429.

9. *Елина, О. А., Елин, А. В.* Современные тенденции применения архитектурного подхода в цифровой трансформации предприятия // Вестник Удмуртского университета. Серия: Экономика и право. – 2021. – Т. 31, № 6. – С. 947-954. – DOI: 10.35634/2412-9593-2021-31-6-947-954.

10. *Зиндер, Е. З.* Архитектура предприятия в контексте бизнес-реинжиниринга // Intelligent Enterprise. – 2008. – № 4 (180). – Ч. 1.

11. *Зиндер, Е. З.* Архитектура предприятия в контексте бизнес-реинжиниринга // Intelligent Enterprise. – 2008. – № 7 (183). – Ч. 2.

12. *Калянов, Г.* Методы и инструменты моделирования архитектуры предприятия // Проблемы теории и практики управления. – 2006. – № 5. – С. 79-91.

13. Киберфизические, кибербиологические и искусственные когнитивные системы: сущность и юридические свойства / Д. Кутейников, О. Ижаев, С. Зенин, В. Лебедев // Российское право: образование, практика, наука. – 2019. – № 3 (111). – С. 75-81. – DOI: 10.34076/2410-2709-2019-3-75-81.

14. Основы проектирования информационных систем : учебное пособие / И. Ю. Коцюба, А. В. Чунаев, А. Н. Шиков. – СПб., 2015. – 205 с.

15. *Лопаткин, Д. С.* Интернет вещей как фактор цифровой трансформации экономики // Инновации и инвестиции. – 2018. – № 9. – С. 257-260.

16. Метамодель архитектуры системы автономного управления транспортно-технологическими процессами в карьере / С. А. Дерябин, У. А. Рзазаде, Е. И. Кондратьев, И. О. Темкин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 3. – С. 117-129. – DOI: 10.25018/0236_1493_2022_3_0_117.

17. Цифровое производство: отличительные характеристики и перспективы развития / В. А. Мизюн, С. А. Ишкильдина, С. А. Евдовская // Вестник Саратовского государственного социально-экономического университета. – 2019. – № 4 (78). – С. 71-75.

18. *Подлевских, А. П., Фролов, А. Л.* Архитектура цифрового производства // Вестник Алтайской академии экономики и права. – 2021. – № 2. – С. 89-95. – DOI: 10.17513/vaael.1602.

19. Сравнительный анализ методологий построения архитектуры предприятий / А. А. Сафронов, Л. З. Давлеткиреева, В. Н. Макашова // Современная техника и технологии. – 2014. – № 1.

20. *Штейнгарт, Е. А., Бурмистров, А. Н.* Обзор и сравнительная характеристика методологий разработки архитектуры предприятий // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки. – 2016. – № 3 (245). – С. 111-129. – DOI: 10.5862/JE.245.11.

21. *Штейнгарт, Е. А., Бурмистров, А. Н.* Проектирование системы бизнес-процессов для разработки функционального представления архитектуры крупного промышленного предприятия // Вопросы экономики и права. – 2018. – № 123. – С. 62-67.

22. *Willner, A., Gowtham, V.* Preprint: Toward a reference architecture model for industrial edge computing. – 2020. – DOI: 10.48550/arXiv.2008.04164.

23. An Introduction to WSO2 IoT Architecture [Электронный ресурс]. – URL: https://wso2.com/library/articles/2017/07/an-introduction-to-wso2-iot-architecture/# (дата обращения: 12.06.2025).

24. *Rojko, A.* Industry 4.0 concept: Background and overview // International Journal of Interactive Mobile Technologies. – 2017. – № 11. – P. 77-90.

25. Manufacturing blockchain of things for the configuration of a data- and knowledge-driven digital twin manufacturing cell / C. Zhang, G. Zhou, H. Li, Y. Cao // IEEE Internet of Things Journal. – 2020. – Vol. 7, № 12. – P. 11884-11894. – DOI: 10.1109/JIOT.2020.3005729.

26. Digital manufacturing on a shoestring: Low cost digital solutions for SMEs / D. McFarlane, S. Ratchev, A. Thorne, A. K. Parlikad, L. de Silva, B. Scho¨nfuß,

G. Hawkridge, G. Terrazas, Y. Tlegenov // Service oriented, holonic and multi-agent manufacturing systems for industry of the future / T. Borangiu, D. Trentesaux, P. Leit˜ao, A. Giret Boggino, V. Botti (eds.). – Springer International Publishing, Cham, 2020. – P. 40-51.

27. Digital manufacturing on a shoestring: low cost digital solutions for SMEs // Service oriented, holonic and multi-agent manufacturing systems for industry of the future / D. McFarlane, S. Ratchev, A. Thorne, A. Parlikad, L. De Silva, B. Sch¨onfuß, G. Hawkridge, G. Terrazas, Y. Tlegenov // SOHOMA 2019. Studies in Computational Intelligence. – 2019. – Vol. 853.

28. Industrial internet of things: Challenges, opportunities, and directions / E. Sisinni, A. Saifullah, S. Han, U. Jennehag, M. Gidlund // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2018. – № 14. – P. 4724-4734.

29. *Vernadat, F.* CIMOSA: Enterprise Modelling and Enterprise Integration Using a Process-based Approach // Conference: Information Infrastructure Systems for Manufacturing, Proceedings of JSPE/IFIP TC5/WG5.3 Workshop on the Design of Information Infrastructure Systems for Manufacturing, DIISM'93. Tokyo, Japan, 8-10 November, 1993. – Tokyo, 1993.

30. *Pedone, G., Mezg´ar, I.* Model similarity evidence and interoperability affinity in cloudready Industry 4.0 technologies // Computers in Industry. – 2018. – № 100 (9). – P. 278-286.

31. Specifying graphical modeling systems using constraint-based metamodels / G. Karsai, G. Nordstrom, A. Ledeczi, J. Sztipanovits // IEEE International Symposium on Computer-Aided Control System Design MM2-5. – 2000. – Vol. 2. – P. 20.

32. Model-based engineering of embedded real-time systems / H. Giese, G. Karsai, E. Lee, B. Rumpe, B. Sch¨atz. – 2007.

33. Industry 4.0 [Электронный ресурс]. – URL: https://www.ibm.com/cloud/architecture/architectures/iotindustrie40.

34. Industrial Internet Consortium. Industrial Internet Reference Architecture, 2015.

35. *Megow, J.* Reference architecture models for industry 4.0, smart manufacturing and IoT. An introduction, 2020.

36. Smart manufacturing, manufacturing intelligence and demand-dynamic performance / J. Davis, T. Edgar, J. Porter, J. Bernaden, M. Sarli // Computers and Chemical Engineering. – 2012. – № 47 (12). – P. 45-156.

37. Manufacturing system under i4.0 workshop based on blockchain / K. Ding, L. Fan, C. Liu // Research on architecture, operation mechanism and key technologies. – 2021. – Vol. 161. – DOI: 10.1016/j.cie.2021.107672.

38. The horse framework: A reference architecture for cyber-physical systems in hybrid smart manufacturing / K. Traganos, P. Grefen, I. Vanderfeesten, J. Erasmus, G. Boultadakis, P. Bouklis // Journal of Manufacturing Systems. – DOI: 10.1016/j.jmsy.2021.09.003.

39. Overview and classification of digital production reference architectures / J. Kaiser, D. MacFarlane, G. Hoverridge // Service-oriented, holonic and multi-agent production systems for the industry of the future / T. Borangiu, D. Trenteso, P. Leitan, O. Cardin, L. Joblot (eds.) // SOHOMA 2021. Research in the field of computational intelligence. – Springer, Cham, 2022. – Vol. 1034. – DOI: 10.1007/978-3-030-99108-1_17.

40. The Stuttgart IT architecture for manufacturing / L. Kassner et al. // Enterprise Information Systems / S. Hammoudi, L. Maciaszek, M. Missikoff, O. Camp, J. Cordeiro (eds.) // ICEIS 2016. Lecture Notes in Business Information Processing. – Springer, Cham, 2017. – Vol. 291. – DOI: 10.1007/978-3-319-62386-3_3.

41. The Paradigm shift in smart manufacturing system architecture / Y. Lu, F. Riddick, N. Ivezic // Advances in Production Management Systems. Initiatives for a Sustainable World / I. Nääs et al. // APMS 2016. IFIP Advances in Information and Communication Technology. – Springer, Cham, 2016. – Vol. 488. – DOI: 10.1007/978-3-319-51133-7_90.

42. The Internet of Things: A survey / L. Atzori, A. Iera, G. Morabito // Computer

Networks. – 2010. – № 54 (10). – P. 2787-2805.

43. Extending the scope of reference models for smart factories / N. Soares, P. Monteiro, F. J. Duarte, R. J. Machado // Procedia Computer Science. – 2021. – Vol. 180. – P. 102-111.

44. Smart manufacturing standardization: Architectures, reference models and standards framework / Q. Li, Q. Tang, I. Chan, H. Wei, Y. Pu, H. Jiang, J. Li, J. Zhou // Computers in Industry. – 2018. – № 101 (10). – P. 91-106.

45. Smart manufacturing: Characteristics, technologies and enabling factors // S. Mittal, M. Khan, D. Romero, Th. Wuest // Proceedings of Institution of Mechanical Engineers. Journal of Engineering Manufacture. – 2019. – № 233 (4). – P. 1342-1361.

46. Structuring reference architectures for the industrial Internet of Things / S. R. Bader, M. Maleshkova, S. Lohmann // Future Internet. – 2019. – № 11 (7).

47. *Soonhung, H.* A review of smart manufacturing reference models based on the skeleton meta-model // Journal of Computational Design and Engineering. – 2020. – № 7 (6). – P. 323-336.

48. Industry 4.0: contributions of holonic manufacturing control architectures and future challenges / W. Derigent, O. Cardin, D. Trentesaux // Journal of Intelligent Manufacturing. – 2020.

References

1. GOST R 70991-2023. The national standard of Russian Federation. The digital industry. Guidelines for the application of RAMI 4.0 Reference Architecture model : approved and put into effect by Rosstandart Order № 1450-st from 22.11.2023.

2. GOST R ISO 15704-2022 Modeling and architecture of the enterprise. Requirements for standard enterprise architectures and methodologies.

3. PNST 438-2020 (ISO/IEC 30141: 2018). Information technology. The Internet of Things. Standard architecture : approved and put into effect by Rosstandart Order № 47-pnst from 18.08.2020.

4. Micro-work flows: a combination of work flows and streaming data processing to support digital counterparts of technological processes / A. B. A. Alaasam, G. Radchenko, A. Chernykh // Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Computer Science. – 2019. – Vol. 8, № 4. – P. 100-116. – DOI: 10.14529/cmse190407.

5. *Amelin, S.* Modern aspects of organization of digital production // Econominfo. – 2024. – Vol. 19, № 2. – P. 5-18.

6. Architecture and strategy: the enterprise of information technologies «Yin» and «Yang» / A. Danilin, A. Slyusarenko. – M., 2005. – 503 p.

7. *Galaktionov, V.* System architecture and its place in the architecture of the enterprise // Director of the Information Service. – 2002. – № 5.

8. *Grubich, T., Shrolik, A.* Analysis of enterprise architecture // Polythematic Online Electronic Scientific Journal of Kuban State Agrarian University. – 2014. – № 104. – P. 417-429.

9. *Elina, O., Elin, A.* Modern trends in the application of the architectural approach in the digital transformation of the enterprise // Bulletin of Udmurt University. Economics and Law series. – 2021. – Vol. 31, № 6. – P. 947-954. – DOI: 10.35634/2412-9593-2021-31-6-947-954.

10. *Zinder, E.* Enterprise architecture in the context of business reengineering // Intelligent Enterprise. – 2008. – Vol. 1, № 4 (180).

11. *Zinder, E.* Enterprise architecture in the context of business reengineering // Intelligent Enterprise. – 2008. – Vol. 2, № 7 (183).

12. *Kalyanov, G.* Methods and tools for modeling enterprise architecture // Problems of theory and practice of management. – 2006. – № 5. – P. 79-91.

13. Cyberphysical, cyberbiological and artificial cognitive systems: essence and legal properties / J. Kuteynikov, O. Izhaev, S. Zenin, V. Lebedev // Russian law: education, practice, science. – 2019. – № 3 (111). – P. 75-81. – DOI: 10.34076/2410-2709-2019-3-75-81.

14. Fundamentals of information systems design : textbook / I. Kotsyuba, A. Chunaev, A. Shikov. – SPb., 2015. – 205 p.

15. *Lopatkin, D.* The Internet of Things as a factor of digital transformation of the economy // Innovation and investment. – 2018. – № 9. – P. 257-260.

16. A meta-model of the architecture of an autonomous control system for transport and technological processes in a quarry / S. Deryabin, U. Rzazade, E. Kondratiev, I. Temkin // Mining Information and Analytical Bulletin. – 2022. – № 3. – P. 117-129. – DOI: 10.25018/0236_1493_2022_3_0_117.

17. Digital production: distinctive characteristics and development prospects / V. Mizyun, S. Ishkildina, S. Evdovskaya // Bulletin of Saratov State Socio-Economic University. – 2019. – № 4 (78). – P. 71-75.

18. *Podlevskikh, A., Frolov, A.* Architecture of digital production // Bulletin of Altai Academy of Economics and Law. – 2021. – № 2. – P. 89-95. – DOI: 10.17513/vaael.1602.

19. Comparative analysis of methodologies for building enterprise architecture / A. Safronov, L. Davletkireeva, V. Makashova // Modern Engineering and Technology. – 2014. – № 1.

20. *Shteyngart, E., Burmistrov, A.* Review and comparative characteristics of enterprise architecture development methodologies // Scientific and Technical Bulletin of St. Petersburg State Polytechnic University. Economic sciences. – 2016. – № 3 (245). – P. 111-129. – DOI: 10.5862/JE.245.11.

21. *Shteyngart, E., Burmistrov, A.* Designing a business process system for developing a functional representation of the architecture of a large industrial enterprise // Issues of Economics and Law. – 2018. – № 123. – P. 62-67.

22. *Willner, A., Gowtham, V*. Preprint: Toward a reference architecture model for industrial edge computing. – 2020. – DOI: 10.48550/arXiv.2008.04164.

23. An Introduction to WSO2 IoT Architecture [Electronic resource]. – URL: https://wso2.com/library/articles/2017/07/an-introduction-to-wso2-iot-architecture/# (date of access: 12.06.2025).

24. *Rojko, A.* Industry 4.0 concept: Background and overview // International Journal of Interactive Mobile Technologies. – 2017. – № 11. – P. 77-90.

25. Manufacturing blockchain of things for the configuration of a data- and knowledge-driven digital twin manufacturing cell / C. Zhang, G. Zhou, H. Li, Y. Cao // IEEE Internet of Things Journal. – 2020. – Vol. 7, № 12. – P. 11884-11894. – DOI: 10.1109/JIOT.2020.3005729.

26. Digital manufacturing on a shoestring: Low cost digital solutions for SMEs / D. McFarlane, S. Ratchev, A. Thorne, A. K. Parlikad, L. de Silva, B. Scho¨nfuß, G. Hawkridge, G. Terrazas, Y. Tlegenov // Service oriented, holonic and multi-agent manufacturing systems for industry of the future / T. Borangiu, D. Trentesaux, P. Leit˜ao, A. Giret Boggino, V. Botti (eds.). – Springer, Cham, 2020. – P. 40-51.

27. Digital manufacturing on a shoestring: low cost digital solutions for SMEs // Service oriented, holonic and multi-agent manufacturing systems for industry of the future / D. McFarlane, S. Ratchev, A. Thorne, A. Parlikad, L. De Silva, B. Sch¨onfuß, G. Hawkridge, G. Terrazas, Y. Tlegenov // SOHOMA 2019. Studies in Computational Intelligence. – 2019. – Vol. 853.

28. Industrial internet of things: Challenges, opportunities, and directions / E. Sisinni, A. Saifullah, S. Han, U. Jennehag, M. Gidlund // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2018. – № 14. – P. 4724-4734.

29. *Vernadat, F.* CIMOSA: Enterprise Modelling and Enterprise Integration Using a Process-based Approach // Conference: Information Infrastructure Systems for Manufacturing, Proceedings of JSPE/IFIP TC5/WG5.3 Workshop on the Design of Information Infrastructure Systems for Manufacturing, DIISM'93. Tokyo, Japan, 8-10 November, 1993. – Tokyo, 1993.

30. *Pedone, G., Mezg´ar, I.* Model similarity evidence and interoperability affinity in cloudready Industry 4.0 technologies // Computers in Industry. – 2018. – № 100 (9). – P. 278-286.

31. Specifying graphical modeling systems using constraint-based metamodels / G. Karsai, G. Nordstrom, A. Ledeczi, J. Sztipanovits // IEEE International Symposium on Computer-Aided Control System Design MM2-5. – 2000. – Vol. 2. – P. 20.

32. Model-based engineering of embedded real-time systems / H. Giese, G. Karsai, E. Lee, B. Rumpe, B. Sch¨atz. – 2007.

33. Industry 4.0 [Электронный ресурс]. – URL: https://www.ibm.com/cloud/architecture/architectures/iotindustrie40.

34. Industrial Internet Consortium. Industrial Internet Reference Architecture, 2015.

35. *Megow, J.* Reference architecture models for industry 4.0, smart manufacturing and IoT. An introduction, 2020.

36. Smart manufacturing, manufacturing intelligence and demand-dynamic performance / J. Davis, Th. Edgar, J. Porter, J. Bernaden, M. Sarli // Computers and Chemical Engineering. – 2012. – № 47 (12). – P. 45-156.

37. Manufacturing system under i4.0 workshop based on blockchain / K. Ding, L. Fan, C. Liu // Research on architecture, operation mechanism and key technologies. – 2021. – Vol. 161. – DOI: 10.1016/j.cie.2021.107672.

38. The horse framework: A reference architecture for cyber-physical systems in hybrid smart manufacturing / K. Traganos, P. Grefen, I. Vanderfeesten, J. Erasmus, G. Boultadakis, P. Bouklis // Journal of Manufacturing Systems. – DOI: 10.1016/j.jmsy.2021.09.003.

39. Overview and classification of digital production reference architectures / J. Kaiser, D. MacFarlane, G. Hoverridge // Service-oriented, holonic and multi-agent production systems for the industry of the future / T. Borangiu, D. Trenteso, P. Leitan, O. Cardin, L. Joblot (eds.) // SOHOMA 2021. Research in the field of computational intelligence. – Springer, Cham, 2022. – Vol. 1034. – DOI: 10.1007/978-3-030-99108-1_17.

40. The Stuttgart IT architecture for manufacturing / L. Kassner et al. // Enterprise Information Systems / S. Hammoudi, L. Maciaszek, M. Missikoff, O. Camp, J. Cordeiro (eds.) // ICEIS 2016. Lecture Notes in Business Information Processing. – Springer, Cham, 2017. – Vol. 291. – DOI: 10.1007/978-3-319-62386-3_3.

41. The Paradigm shift in smart manufacturing system architecture / Y. Lu, F. Riddick, N. Ivezic // Advances in Production Management Systems. Initiatives for a Sustainable World / I. Nääs et al. // APMS 2016. IFIP Advances in Information and Communication Technology. – Springer, Cham, 2016. – Vol. 488. – DOI: 10.1007/978-3-319-51133-7_90.

42. The Internet of Things: A survey / L. Atzori, A. Iera, G. Morabito // Computer Networks. – 2010. – № 54 (10). – P. 2787-2805.

43. Extending the scope of reference models for smart factories / N. Soares, P. Monteiro, F. J. Duarte, R. J. Machado // Procedia Computer Science. – 2021. – Vol. 180. – P. 102-111.

44. Smart manufacturing standardization: Architectures, reference models and standards framework / Q. Li, Q. Tang, I. Chan, H. Wei, Y. Pu, H. Jiang, J. Li, J. Zhou // Computers in Industry. – 2018. – № 101 (10). – P. 91-106.

45. Smart manufacturing: Characteristics, technologies and enabling factors // S. Mittal, M. A. Khan, D. Romero, Th. Wuest // Proceedings of Institution of Mechanical Engineers. Journal of Engineering Manufacture. – 2019. – № 233 (4). – P. 1342-1361.

46. Structuring reference architectures for the industrial Internet of Things / S. R. Bader, M. Maleshkova, S. Lohmann // Future Internet. – 2019. – № 11 (7).

47. *Soonhung, H.* A review of smart manufacturing reference models based on the skeleton meta-model // Journal of Computational Design and Engineering. – 2020. – № 7 (6). – P. 323-336.

48. Industry 4.0: contributions of holonic manufacturing control architectures and future challenges / W. Derigent, O. Cardin, D. Trentesaux // Journal of Intelligent Manufacturing. – 2020.

Об авторах:

Третьяченко Татьяна Валентиновна, *кандидат экономических наук, доцент кафедры коммерции и логистики Ростовского государственного экономического университета (РИНХ), Ростов-на-Дону, Россия, tat050161@yandex.ru*

Быкадоров Никита Александрович, *аспирант Ростовского государственного экономического университета (РИНХ), Ростов-на-Дону, Россия, nikitabykadorov6@gmail.com*

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

About the Authors:

Tatiana Tretyachenko, *Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor of the Department of Commerce and Logistics, Rostov State University of Economics, Rostov-on-Don, Russia, tat050161@yandex.ru*

Nikita Bykadorov, *Postgraduate student, Rostov State University of Economics, Rostov-on-Don, Russia, nikitabykadorov6@gmail.com*

Conflict of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)