

**СЕРВИС-ОРИЕНТИРОВАННАЯ АРХИТЕКТУРНАЯ МОДЕЛЬ
ДИСКРЕТНОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ**

О. А. АБЫШЕВ*, Е. И. ЯБЛОЧНИКОВ, Д. А. ЗАКОЛДАЕВ

*Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия***abyshv.o@yandex.ru*

Аннотация. Обсуждаются проблематика и тенденции развития процесса проектирования. Представлен обзор современных требований к проектируемым производственным системам. Рассмотрены этапы развития моделей организации современных производственных систем и обозначена необходимость разработки новых архитектурных моделей таких систем с использованием технологий производственных киберфизических систем. Предложена архитектурная модель сервис-ориентированной производственной системы на основе референсной модели RAMI. Представлен пример реализации предложенной архитектурной модели на базе опытно-экспериментальной фабрики по выпуску магнитных композиционных материалов.

Ключевые слова: производственные системы, автоматизация проектирования, цифровое производство, киберфизические системы, ICPS, RAMI, архитектурная модель производства

Ссылка для цитирования: Абышев О. А., Яблочников Е. И., Заколдаев Д. А. Сервис-ориентированная архитектурная модель дискретной производственной системы // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 1. С. 43—55. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-1-43-55.

**SERVICE-ORIENTED ARCHITECTURAL MODEL
OF DISCRETE PRODUCTION SYSTEM**

O. A. Abyshv*, E. I. Yablochnikov, D. A. Zakoldaev

*ITMO University, St. Petersburg, Russia***abyshv.o@yandex.ru*

Abstract. The problems and development trends of the project design process are considered. A review of modern requirements to production systems design is presented. The stages of development of models of organization of modern production systems are analyzed, and the need to develop new architectural models of such systems using technologies of industrial cyber-physical systems is indicated. An architectural model of a service-oriented production system based on the RAMI reference model is proposed. An example of implementation of the proposed architectural model based on a pilot factory for the production of magnetic composite materials is given.

Keywords: production systems, design process automation, digital production, cyber-physical systems, ICPS, RAMI, architectural model of production

For citation: Abyshv O. A., Yablochnikov E. I., Zakoldaev D. A. Service-oriented architectural model of discrete production system. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 1. P. 43—55 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-1-43-55.

Высокая динамика изменений потребительских предпочтений и активная конкуренция на рынках сбыта конечных изделий промышленности, в частности предприятий приборостроения, определяют тенденции развития производственных систем [1, 2].

В последнее время значительно повысился уровень использования современных информационно-коммуникационных технологий на всех этапах жизненного цикла производственных систем в целях повышения эффективности и снижения себестоимости процессов проектирования и изготовления продукции [2—4]. Сквозная автоматизация промышленных процессов и цифровая трансформация становятся важнейшими элементами стратегии развития

производственных компаний [2]. Повышается роль информационных потоков и промышленных данных, генерируемых объектами производства и проектно-производственной средой в ходе их взаимодействия в рамках единого информационного пространства предприятия [5—7].

Современное инженерное проектирование столкнулось с новыми вызовами, при этом процесс проектирования дискретных производственных систем имеет следующий ряд ключевых проблем [8]:

— высокая степень неопределенности ожиданий и предпочтений пользователей, влияющих на вариативность конфигураций (кастомизация) конечных изделий и, как следствие, на поиск оптимальных конфигураций производственных систем;

— высокая степень сложности проектирования новых объектов техники и необходимость применения междисциплинарного подхода к проектированию;

— высокая степень гетерогенности объектов проектно-производственной среды и связанная с этим проблема обеспечения вертикальной и горизонтальной интеграции, интероперабельности этих объектов и гибкости производственной системы в целом.

Решение этих проблем требует усовершенствования существующих и поиска новых моделей и методов проектирования и организации производственных систем.

Изучение текущего состояния на предприятиях, например, Евразийского экономического союза (ЕАЭС) указывает на проблемы развития, распространения и внедрения технологий производственных киберфизических систем. Актуальны также вопросы повышения производительности, качества и сокращения скорости процессов проектирования и сроков вывода новой продукции на рынок.

Применительно к предприятиям ЕАЭС [9], изготавливающим, в частности, изделия из магнитных композиционных материалов, следует отметить наиболее значимые проблемы:

— сложность построения единых информационных пространств, доступных как сотрудникам, так и прочим компонентам производственной системы (технологическим машинам, заготовкам, цеховому транспорту, технологической оснастке);

— низкое качество данных, ограничивающих интероперабельность компонентов и системы в целом;

— значительные проблемы обеспечения версионности, мониторинга и поддержки актуальности информации об объектах производственной системы;

— низкий уровень автоматизации процессов проектирования и изготовления продукции; отсутствие сквозной автоматизации процессов;

— применение устаревших стандартов проектирования, при этом стандарты в области Smart Factory и производственных киберфизических систем не распространены в инженерной практике.

В области развития новых производственных систем широко распространены термины „умная фабрика“ и „производственные киберфизические системы“, не имеющие, однако, общепринятых определений на данный момент [10, 11]. Тем не менее объем исследований по этой тематике подтверждает ее значимость.

В настоящей статье авторами выделен следующий порядок формирования и развития моделей организации сложных производственных систем: *традиционное производство --> формирование цифрового производства --> внедрение пилотных производственных киберфизических систем (ПКФС) --> интеллектуальные производства и умные фабрики (модель Smart Factory)*. Используемые в статье понятия „цифровое производство, или цифровая фабрика“, „производственная киберфизическая система“, „умное, интеллектуальное производство, или умная фабрика“ подробно описаны в работах [2, 6,

12—15], а также в статье „Методика построения индустриальных агентов с применением технологических адаптеров“*.

Процесс проектирования современных производственных систем предполагает определение и классификацию типовых групп требований к проектированию. При этом требования — это условие или возможность, которыми должно обладать проектное решение, чтобы удовлетворять ожиданиям клиентов, стандартам и спецификациям на объект проектирования [16].

Обзор научных публикаций показывает, что сегодня существует большое число исследований, посвященных проблеме формализации требований к проектированию производственных системам. В работе [17] авторы определяют шесть основных компонентов производственной киберфизической системы.

1. *Модульное технологическое оборудование и рабочие станции* — позволяют обеспечить переналадку и перекомпоновку производственных участков и ячеек под внешние и внутренние изменения [17—28].

2. *Модульный производственный транспорт и промышленные роботы* — позволяют обеспечить переналадку и перекомпоновку погрузочно-разгрузочного оборудования (т. е. конвейеров, AGV) в цехах, в том числе перемещение технологического оборудования и рабочих станций.

3. *Высококвалифицированная рабочая сила* — определяется способность сотрудников выполнять несколько типов задач, включая принятие решений, контроль и диспетчеризацию, программирование или выполнение ручных операций сборки изделий [17, 23, 29—33].

4. *Перенастраиваемые технологические оснастка и приспособления* — определяется необходимость применения перенастраиваемых средств технологического оснащения для обеспечения заданной гибкости ассортимента и размерности партий изделий.

5. *Перенастраиваемые инструменты* — определяется необходимость применения перенастраиваемых инструментов для использования в различных задачах (например, контролируемой затяжке крепежа различного диаметра).

6. *Стандартизированная инженерная инфраструктура* — интегрирует компоненты системы со всеми уровнями инженерных коммуникаций [19, 20, 21, 23, 25, 28, 29, 30, 33—35].

При этом в работах [22—24] авторы расширяют данный список компонентов, определяя специальные требования к проектированию производственных киберфизических систем.

Стандартизированная коммуникация — определяется необходимость применения стандартизированных протоколов и интерфейсов коммуникации и информационного обмена между объектами производственной системы [18, 20, 22, 23, 26, 27, 29, 31—37].

Встроенные вычислительные системы — определяется необходимость интеграции в структуру каждого объекта производственной системы соответствующих встроенных вычислительных систем для решения задачи сбора данных, обработки информации и автономного принятия решений [17, 19, 20, 21, 24, 25, 31, 33, 34].

Организация единого информационного пространства — позволяет обеспечить информационный обмен, повторное использование результатов моделирования, симуляций и вычислений в рамках процесса проектирования, разработки и эксплуатации [20, 24, 28, 29, 36].

Информационная безопасность — определяется необходимость обеспечения средств и механизмов для решения задач защиты информации: конфиденциальности, доступности, целостности, подлинности данных [19, 21, 23, 28, 32].

Коллаборативное взаимодействие компонентов — компоненты системы определяются как агенты, способные к межмашинному и человеко-машинному взаимодействию для реализации общесистемных целей [18, 20, 31, 34].

* Абышев О. А., Дыйканбаева У. М., Омуралиев У. К. Методика построения индустриальных агентов с применением технологических адаптеров // Настоящий выпуск. С. 34—42.

Модульная и децентрализованная архитектура управления — определяется необходимость применения распределенной системы управления компонентами системы; каждый компонент, подключенный к производственной шине предприятия, выступает в качестве индустриального агента, способного к самоидентификации в производственной среде и автоматическому взаимодействию с другими компонентами в виртуальном пространстве [20—23, 26, 27, 29, 30, 32—34, 36].

Умная заготовка — определяется способность заготовки изделия к идентификации в качестве индустриального агента, взаимодействию с другими компонентами, а также сбору, хранению и обработке информации о своем состоянии на всех этапах жизненного цикла; таким образом, умная заготовка выступает в качестве равноправного и самодостаточного объекта производственной системы [21, 26, 27, 30, 34].

Интегрированные средства автоматизации проектирования киберфизических систем — определяется необходимость применения специализированных программных средств и инструментов автоматизированного проектирования для построения киберфизических моделей компонентов и производственной системы, а также информационной поддержки проектных процедур (анализа, синтеза, моделирования, симуляции), в том числе организации управления знаниями в едином информационном пространстве [17, 19, 23—25, 29, 37].

Высокоточные визуальные модели производства — определяется необходимость визуальных моделей реальной производственной среды высокой точности для задач построения виртуального пространства производственной системы.

Удаленный мониторинг и диспетчеризация — определяется необходимость применения технологий удаленного мониторинга и диспетчеризации для сбора промышленных данных о состоянии индустриальных агентов в режиме реального времени и их дальнейшем использовании, а также хранения данных в виртуальном пространстве предприятия [30—32, 34].

Интерфейсы для подключения компонентов к ПКФС — определяется необходимость разработки и использования физических и виртуальных (программных) интерфейсов подключения компонентов к производственной киберфизической системе, в том числе разработки специальных средств для интеграции устаревшего оборудования [17—21, 29—31, 36, 37].

Стандартизация представления результатов виртуального моделирования и симуляции — определяется необходимость применения единых семантик, онтологий, форматов обмена данными при виртуальном моделировании и симуляции для создания киберфизических компонентов, способных к бесшовной интеграции со сторонними производственными киберфизическими системами [36].

Информационная поддержка изделий на всех этапах жизненного цикла — определяется требование к сбору, хранению, обработке и обеспечению доступа к информации о состоянии изделия на всех этапах его жизненного цикла, в том числе на этапе послепродажного обслуживания [17, 19, 24, 26, 28, 32, 36, 38].

Сервисный подход к организации предприятия — производственная система определяется как потребитель и поставщик услуг (сервисов) по запросу, которые она может принимать или оказывать как сторонним предприятиям, так и другим предприятиям одной производственной цепочки [19—21, 23, 27—29, 31—33, 36, 37].

Облачные вычисления — определяется необходимость применения средств и технологий распределенных облачных вычислений для задач проектирования, разработки и эксплуатации производственных систем [18, 23, 28, 30, 36].

Облачное хранение данных — определяется необходимость применения облачных хранилищ для задач организации единого цифрового пространства и хранения данных обо всех ресурсах, продуктах и процессах производственной системы [17, 19, 25, 27—29, 36, 37].

Сервисное взаимодействие с клиентами и поставщиками — определяется необходимость применения электронных торговых площадок (маркетплейсов) для взаимодействия с клиентами и поставщиками услуг [18, 23, 26, 28, 29, 31, 32, 36].

Адаптивность производственной системы — определяется способность системы своевременно реагировать на изменение требований к изготовлению конечных изделий (объему, размеру партий, срокам поставки), в том числе при размещении единичных заказов по модели „same day delivery“ — поставка в день размещения заказа [17, 20—23, 25, 26, 32, 34, 36].

Самовосстановление — определяется способность системы самостоятельно восстанавливаться после системных сбоях и атак в режиме реального времени [18, 20, 26, 29, 30, 31].

Анализ литературных источников показывает принципиальную возможность классификации и группирования требований к исследуемому объекту проектирования путем определения соответствующих прикладных областей и технологий. Согласно этим группам должны быть определены направления прикладных разработок — новые методики и средства автоматизированного проектирования производственных киберфизических систем.

1. Перспективы применения концепции ПКФС „Smart Factory“.
2. Применение методов и средств системной инженерии.
3. Место человека в ПКФС „Smart Factory“.
4. Модели и механизмы коммуникации в производственной среде.
5. Система управления ПКФС „Smart Factory“.
6. Технологии цифровых двойников.
7. Технологии предиктивного технического обслуживания.

Следует отметить, что на сегодняшний день мировое сообщество не имеет достаточного количества признанных стандартов в области проектирования и эксплуатации производственных систем [14]. Это приводит к отсутствию координации при разработке решений — каждый производитель компонентов стремится предложить свой вариант, что может привести к увеличению стоимости интеграции в будущем. При этом недостаток связанности гетерогенных компонентов напрямую влияет на качество и скорость принятия решений.

Рассмотрим существующие подходы и модели, используемые в процессе проектирования дискретных производственных систем. Современное автоматизированное проектирование производственных систем основано на применении идей и принципов, изложенных в ряде классических методологий и подходов к проектированию сложных объектов [39—41]. Выделяют следующие подходы к проектированию:

— *блочно-иерархический подход* — декомпозиционный подход, основанный на разделении описаний объектов и соответственно средств их создания на иерархические уровни и аспекты; проектируемая система декомпозируется на иерархически связанные уровни;

— *объектно-ориентированный подход* — методология, основанная на представлении проекта в виде совокупности объектов, каждый из которых является реализацией определенного класса, а классы образуют иерархию с использованием наследования;

— *сервис-ориентированный подход* — подход, основанный на представлении проекта в виде совокупности сервисов, каждый из которых является отдельным компонентом с фиксированными интерфейсами, выполняющими определенные функции.

Классическая модель автоматизации непрерывных, дискретных и серийных производств использует блочно-иерархический подход к проектированию производственных систем. Этот подход хорошо исследован и стандартизирован. Основой для его реализации является стандарт ISA-95, определяющий блочно-иерархическую модель организации дискретных производственных систем.

На сегодняшний день моделям на основе блочно-иерархического подхода противопоставляются сетевые модели с использованием сервис-ориентированного подхода к проектированию [14, 41, 42]. В сетевых моделях любой объект производственной системы (заготовка,

оператор, технологическое оборудование) становится автономным интеллектуальным агентом, способным к самостоятельному принятию решений (маршрут обработки, состав спецификации и т.д.) и взаимодействию с другими объектами в рамках поставленных задач и в пределах заданной производственной экосистемы. Каждый из отдельных элементов производственной системы, такой как обрабатывающий центр, производственная ячейка, становится сервисом; сервисы обеспечивают обслуживание заготовок в рамках своих функциональных возможностей.

Архитектурная модель — это абстрактное описание поведения, состояния и свойств системы на уровне концептуального проектирования, определяющее ключевые элементы, взаимосвязи между элементами и основные принципы проектирования и развития описываемой системы [14]. Совершенствование существующих и разработка новых архитектурных моделей и методик, способных отвечать современным требованиям к проектированию производственных систем, является актуальной исследовательской задачей [43]. Анализ рассмотренных выше требований показывает, что архитектурная модель производственной системы должна удовлетворять следующим условиям:

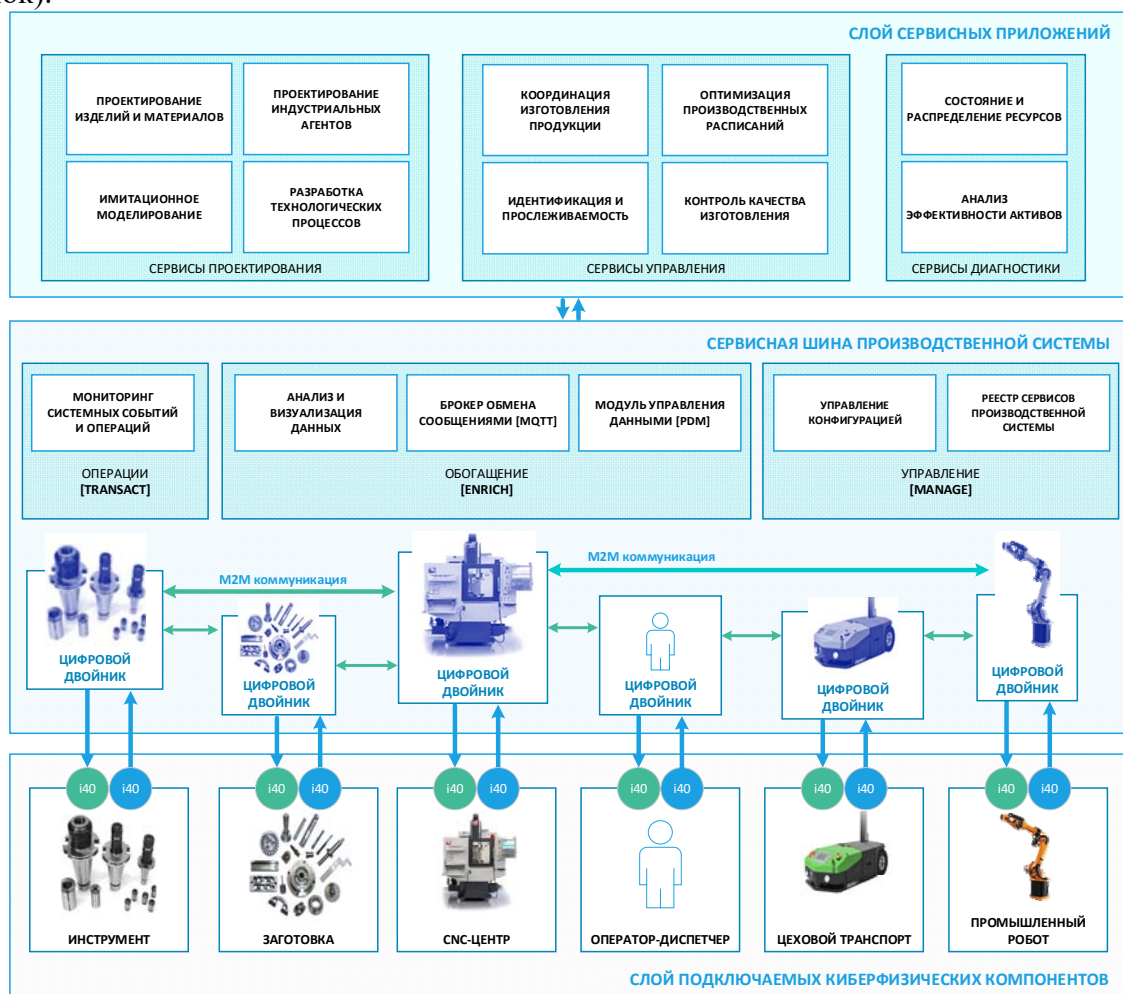
- 1) базироваться на интеллектуальных гетерогенных модульных компонентах (индустриальных агентах);
- 2) обеспечивать гибкость к изменениям требований и внешних условий посредством изменения состава, структуры и свойств системы;
- 3) обеспечивать бесшовную реконфигурацию и переналадку системы;
- 4) обеспечивать оптимизацию операций планирования, моделирования и симуляции;
- 5) обеспечивать административную и информационную поддержку операторам системы.

Особый интерес вызывает референсная архитектурная модель Reference Architecture Model for Industrie 4.0 (RAMI) [44]. Данная модель базируется на общепринятом стандарте иерархического проектирования ISA-95, парадигме управления жизненным циклом на основе стандарта IEC 62890, а также заданном множестве аспектов проектирования. Модель RAMI определяет пространство множества проектных решений для различных гетерогенных компонентов в проектно-производственной среде предприятия. В работах [45—47] предлагаются способы использования данной модели как методического обеспечения процесса проектирования, однако существенным ее недостатком является ограниченность использования при разработке проектных решений по интеграции гетерогенных компонентов в составе производственной киберфизической системы. Тем не менее рассмотренная референсная модель может служить методической основой для разработки сервис-ориентированных архитектурных моделей, способных компенсировать ее недостатки.

В работах [14, 42, 48] приведены результаты и достижения европейской школы проектирования в области технологий производственных киберфизических систем, в частности исследовательский проект PERFoRM, выполняемый в рамках программы исследований Европейского Союза HORIZON 2020. Так, предложены варианты исполнения облачной сервис-ориентированной архитектуры на основе организации межмашинной коммуникации с использованием облачной инфраструктуры. Ключевая идея данной архитектуры заключается в развитии принципов гибкости и адаптивности управления сложными техническими системами за счет повышения уровня внедрения встроенных вычислительных систем в объекты и децентрализации процессов управления с уровня управления предприятием на уровень межмашинной коммуникации — построения интеллектуальных производственных ячеек, состоящих из двух ключевых элементов: физического объекта и административной оболочки. Недостатком предложенной модели является ограниченное количество сервисных приложений, в том числе отсутствие сервисов проектирования компонентов. Модель не содержит сервисы управления и поддержки сервисной шины производственной системы предприятия.

В работе [41] предложена сервис-ориентированная архитектура „Manufacturing 2.0“ для производственных систем, которая учитывает возможность управления конфигурациями набора сервисных приложений, а также выделяет уровень сервисов управления и поддержки сервисной шины производственной системы. Недостатки данной модели — сосредоточенность на вопросах управления производством, отсутствие сервисов проектирования и несогласованность с моделью RAMI 4.0. Модель не учитывает вопросы интеграции физических объектов и их цифровых представлений, подключения устаревшего оборудования, а также не рассматривает возможность использования облачных сервисов.

На основе исследования достоинств и недостатков различных моделей авторами настоящей статьи предлагается улучшенная сервис-ориентированная архитектурная модель производственной системы, которая позволяет проектировать инвариантные производственные системы, обладающие независимостью по отношению к изготовителям и поставщикам комплектующих компонентов и технологических решений за счет использования единых стандартизированных моделей данных, интерфейсов подключения и протоколов обмена (см. рисунок).



Предлагаемая архитектурная модель содержит следующие элементы:

- слой сервисных приложений, в том числе облачных сервисов;
- выделенные группы сервисов (проектирование, управление, диагностика);
- сервисную шину производственной системы со встроенными сервисами управления и поддержки, входящими во внутренние сервисы сервисной шины;
- модуль управления данными о продуктах, процессах и ресурсах;

— слой подключаемых киберфизических компонентов — промышленных агентов и соответствующих интерфейсов подключения (стандартизированный интерфейс или технологический адаптер).

Слой сервисных приложений включает в себя как встроенные сервисные приложения, доступные в рамках базовой конфигурации производственной системы, так и сторонние приложения, расширяющие функционал базовой конфигурации. Так, например, сервис управления эффективностью технологического оборудования, сервис объемного планирования и составления расписаний, сервисы цифрового инжиниринга и т.д. Данные сервисные приложения могут быть выделены в группы: сервисы проектирования, сервисы управления, сервисы диагностики и т.д.

Сервисная шина производственной системы выступает в качестве инфраструктуры для вертикальной и горизонтальной интеграции компонентов системы: гетерогенных сервисных приложений и промышленных агентов. Она обеспечивает обработку событий, маршрутизацию и трансформацию форматов сообщений между различными компонентами системы, унификацию интерфейсов и конвертацию различных протоколов коммуникации. При этом сама сервисная шина имеет выделенные компоненты, которые обеспечивают ее функционирование: реестр сервисов, брокер обмена сообщениями, облачная инфраструктура, встроенные сервисы проектирования, управления конфигурацией, диагностики сервисной шины и т.д.

Модуль управления данными представлен унифицированной моделью данных и системой управления единой базой данных об изделиях, процессах и ресурсах в составе производственной системы в режиме реального времени. Переход от этапа проектирования к этапу изготовления и далее эксплуатации сопровождается генерацией, хранением и обменом огромного количества промышленных данных о составе, структуре, свойствах и состоянии объектов. При этом модуль должен обеспечивать защиту информации, требования к полноте, непротиворечивости и актуальности данных. Реализация модуля может включать использование технологий обработки больших данных (big data processing), хранилищ данных (data warehouse), облачной инфраструктуры (cloud infrastructure). Модуль управления данными и его элементы являются частью информационного обеспечения и осуществляют информационную поддержку всех этапов жизненного цикла производственной системы и ее компонентов.

Слой подключаемых киберфизических компонентов представлен промышленными агентами, представленными, в свою очередь, физическим и цифровым объектами. В качестве физических объектов производственной системы могут выступать технологическое оборудование в составе производственных ячеек, мобильные транспортные устройства, отдельные компоненты автоматизации или люди. Эти объекты обладают такими характеристиками, как интеллектуальность, идентифицируемость и прослеживаемость, автономность, самодиагностируемость и способность взаимодействовать с другими объектами производственной системы. Цифровое представление объекта обеспечивается технологиями цифровых двойников, которые содержат информацию о физическом объекте (электронные макеты, 3D-модели, имитационные модели и результаты симуляций, проектные документы и технические спецификации и т.д.), а также обеспечивают его коммуникацию с другими промышленными агентами. Интеграция физического и цифрового представлений реализуется за счет применения стандартизированных интерфейсов и/или специальных технологических адаптеров (применительно для подключения устаревшего оборудования).

Рассмотрим предложенную архитектурную модель на примере варианта реализации проекта производственной системы по изготовлению магнитных композиционных материалов:

— сервисы проектирования: Autodesk Fusion 360, сервис проектирования композиционных материалов „Composite Designer“;

— сервисы управления: Winnum MES App, Winnum CNC;

- сервисы диагностики: Winnum Diagnostic Apps (мониторинг, планирование, станки);
- сервисная шина: Winnum Platform, Winnum Cloud;
- модуль управления данными о продуктах, процессах и ресурсах: Winnum Platform, Autodesk Vault PDM;
- слой подключаемых киберфизических компонентов: подключенное технологическое оборудование с использованием Winnum Connector и технологических адаптеров (дозатор, магнетизер, муфельная печь и т.д.), умные заготовки с поддержкой идентификации и прослеживаемости, операторы с элементами носимой электроники (человеко-машинный интерфейс).

Данная конфигурация была реализована на опытно-экспериментальной фабрике по выпуску магнитных композиционных материалов совместно с ОсОО „КиргизПромТехнология“ (Бишкек, Киргизия). Так, использование предложенной конфигурации позволило провести прототипирование опытной партии изделий. Аспекты построения имитационной модели данной производственной системы рассмотрены в работе [49].

Прикладная значимость предлагаемой архитектурной модели заключается в возможности конфигурирования состава, структуры и свойств проектируемой производственной системы путем управления интеграцией различных гетерогенных компонентов (в том числе, устаревшего технологического оборудования и новых сервисных программных приложений). Это позволяет сформировать специализированную композицию производственной системы по заданным требованиям.

Существенным ограничением для реализации предлагаемой архитектурной модели является недостаточный уровень готовности методического, математического и программно-алгоритмического обеспечения процесса проектирования подключенных киберфизических компонентов. Проектировщикам производственных систем необходимы формальные методики и алгоритмы проектных процедур, а также современные инструментальные платформенные решения, позволяющие формировать интегрированные комплексы САПР на основе модульных сервисных САПР для задач проектирования киберфизических систем. Это, в свою очередь, определяет необходимость разработки специализированных программных средств и инструментов автоматизированного проектирования для построения производственной киберфизической системы, а также информационной поддержки проектных процедур (анализа, синтеза, моделирования, симуляции), в том числе организации управления знаниями в едином информационном пространстве для повышения доступности и прозрачности данных на всех этапах жизненного цикла. На этапе инжиниринга это открывает возможность совместного непрерывного цифрового проектирования и виртуального ввода в эксплуатацию, а на этапе эксплуатации и технического обслуживания повышает надежность безотказной работы и оперативность реакции на возникновение неисправностей и сбоев производственной системы.

Итак, в работе представлены анализ проблематики процесса проектирования и обзор современных требований к проектируемым производственным системам. Рассмотрены этапы развития организации производств будущего: формирование цифрового производства --> внедрение пилотных промышленных киберфизических систем --> умные фабрики (модель Smart Factory). Показана необходимость разработки промышленных киберфизических систем на основе отмеченных требований. Предложена архитектурная модель сервис-ориентированной производственной системы на основе референсной модели RAMI. Представлен пример реализации предложенной архитектурной модели на базе опытно-экспериментальной фабрики по выпуску магнитных композиционных материалов.

Использование комбинации референсной модели RAMI 4.0 и предложенной архитектурной модели позволит обеспечить интероперабельность и подключаемость различного слабосвязанного гетерогенного оборудования и программных модулей в единое информационное

пространство цифрового производства, что, в свою очередь, позволит формировать сквозную интеграцию материальных и информационных потоков на предприятиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. OECD Digital Economy Outlook 2017. Paris: OECD Publ., 2017. DOI: 10.1787/9789264276284-en.
2. Monostori L., Kádár B., Bauernhansl T., Kondoh S., Kumara S., Reinhart G., Sauer O., Schuh G., Sihn W., Ueda K. Cyber-physical systems in manufacturing // CIRP Annals. 2016. Vol. 65, iss. 2. P. 621—641. DOI: ORG/10.1016/J.CIRP.2016.06.005.
3. Боровков А. И., Лысенко Л.В., Биленко П.Н. и др. Цифровое производство. Методы, экосистемы, технологии: Рабочий доклад Департамента корпоративного обучения Московской школы управления Сколково, 2017 [Электронный ресурс]: <http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2017/11_november/17/tsifrovoe_proizvodstvo_112017.pdf>.
4. Зильбербург Л. И., Молочник В. И., Яблочников Е. И. Информационные технологии в проектировании и производстве. СПб: Политехника, 2008. 304 с.
5. Yablochnikov E. I., Chukichev A. V., Timofeeva O. S., Aбышев O. A., Абаев G. E., Colombo A. W. Development of an industrial cyber-physical platform for small series production using digital twins // Philosophical Trans. of the Royal Society A. 2021. N 379(2207). P. 20200370.
6. Демкович Н. А., Абаев Г. Е., Яблочников Е. И. Многоуровневое моделирование цифровых производств // Ритм машиностроения. 2019 [Электронный ресурс]: <http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2017/11_november/17/tsifrovoe_proizvodstvo_112017.pdf>.
7. Чукичев А. В., Тимофеева О. С., Яблочников Е. И. Развитие производственно-технологической лаборатории как прототипа индустриальной киберфизической системы // Современное машиностроение. Наука и образование. 2020. № 9. С. 43—54.
8. Schumacher A., Erol S., Sihn W. A Maturity Model for Assessing Industry 4.0 Readiness and Maturity of Manufacturing Enterprises // Procedia CIRP. 2016. N 52. P. 161—166.
9. Новикова И. В., Равино А. В. Определение страновых особенностей цифровизации в государствах ЕАЭС // Тр. БГТУ. Сер. 5: Экономика и управление. 2022. № 1(256) [Электронный ресурс]: <<https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-stranovyh-osobennostey-tsifrovizatsii-v-gosudarstvah-eaes>>.
10. Radziwon A., Bilberg A., Bogers M., Madsen E. S. The smart factory: exploring adaptive and flexible manufacturing solutions // Procedia Engineering. 2014. N 69. P. 1184—1190.
11. Pot A. и др. Внедрение и развитие Индустрии 4.0. Основы, моделирование и примеры из практики / Пер. с нем.; под. ред. А. Пота. М.: Техносфера, 2017. 294 с.
12. Manzei C., Schlepner L., Heinze R. Industrie 4.0 im internationalen Kontext. Berlin: VDE Verlag, 2017.
13. Lee E. A., Cyber Physical Systems: Design Challenges Oriented Real-Time Distributed Computation // 11th IEEE Intern. Symp. on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computation. 2008. P. 363—69;
14. Digitalized and Harmonized Industrial Production Systems: The PERFoRM Approach / A. W. Colombo, M. Gepp, J. B. Oliveira, P. Leitao, J. Barbosa, J. Wermann // CRC Press. 2019. 332 p.
15. Zuehlke D. Smart Factory—Towards a factory-of-things // Annual Reviews in Control. 2010. N 34(1). P. 129—138.
16. Вигерс К., Бутти Д. Разработка требований к программному обеспечению. М.: Изд-во „Русская редакция“. 2004.
17. Gorecky D., Weyer S., Hennecke A., Zühlke D. Design and Instantiation of a Modular System Architecture for Smart Factories // IFAC-PapersOnLine. 2016. N 49. P. 79—84.
18. Lee J. Smart Factory Systems // Informatik Spektrum. 2015. N 38. P. 230—235.
19. Arnold C., Kiel D., Voigt K. Innovative Business Models for the Industrial Internet of Things // 26th Intern. Association for Management of Technology Conference (IAMOT). 2017. P. 1379—1396.
20. Hermann M., Pentek T., Otto B. Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review // Working Pap. 2015.

21. *Stock T., Seliger G.* Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0 // *Procedia CIRP*. 2016. N 40. P. 536—541.
22. *Radziwon A., Bilberg A., Bogers M., Skov E.* The Smart Factory: Exploring Adaptive and Flexible Manufacturing Solutions // *Procedia Engineering*. 2014. N 69.
23. *Davis J., Edgar T., Porter J., Bernaden J., Sarli M.* Smart manufacturing, manufacturing intelligence and demand-dynamic performance // *Comput. Chem. Eng.* 2012. N 47. P. 145—156.
24. *Gentner S.* Industry 4.0: Reality, Future or just Science Fiction? How to Convince Today's Management to Invest in Tomorrow's Future! Successful Strategies for Industry 4.0 and Manufacturing IT // *CHIMIA Intern. J. Chem.* 2016. N 70. P. 628—633.
25. *Li X., Li D., Wan J., Vasilakos A. V., Lai C. F., Wang S.* A review of industrial wireless networks in the context of Industry 4.0 // *Wireless Networks*. 2017. N 23. P. 23—41.
26. *Qin J., Liu Y., Grosvenor R.* A Categorical Framework of Manufacturing for Industry 4.0 and beyond // *Procedia CIRP*. 2016. N 52. P. 173—178.
27. *Rauch E., Dallasega P., Matt D. T.* The Way from Lean Product Development (LPD) to Smart Product Development (SPD) // *Procedia CIRP*. 2016. N 50. P. 26—31.
28. *Vogel-Heuser B., Hess D.* Guest Editorial Industry 4.0 Prerequisites and Visions // *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.* 2016. N 13. P. 411—413.
29. *Oesterreich T. D., Teuteberg F.* Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry // *Comput. Ind.* 2016. N 83. P. 121—139.
30. *Kolberg D., Zühlke D.* Lean Automation enabled by Industry 4.0 Technologies // *IFAC-PapersOnLine*. 2015. N 28. P. 1870—1875.
31. *Kannan S. M., Suri K., Cadavid J., Barosan I., Van Den Brand M., Alferez M., Gerard S.* Towards Industry 4.0: Gap analysis between current automotive MES and industry standards using model-based requirement engineering // *Proc. IEEE Intern. Conf. on Software Architecture Workshops (ICSAW)*, Gothenburg, Sweden, 5—7 April 2017. P. 29—35.
32. *Cheng S. Q. K., Cheng K.* Future Digital Design and Manufacturing: Embracing Industry 4.0 and Beyond // *Chinese J. Mech. Eng.* 2017. N 30. P. 1047—1049.
33. *Dugenske A., Louchez A.* The Factory of The Future Will Be Shaped by The Internet of Things // *Advant. Bus. Media*. 2014. N 19. P. 1—5.
34. *Erol S., Jäger A., Hold P., Ott K., Sihm W.* Tangible Industry 4.0: A Scenario-Based Approach to Learning for the Future of Production // *Procedia CIRP*. 2016. N 54. P. 13—18.
35. *Robert H., Daniel V., Bilal A.* Engineering the Smart Factory // *Chinese J. Mech. Eng.* 2016. N 29. P. 1046—1051.
36. *Yao X., Jin H., Zhang J.* Towards a wisdom manufacturing vision // *Intern. J. Comput. Integr. Manuf.* 2015. N 28. P. 1291—1312.
37. *Xun X.* From cloud computing to cloud manufacturing // *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 2012. N 28. P. 75—86.
38. *Akeson L.* Industry 4.0: Cyber-Physical Systems and Their Impact on Business Models: Master's Thesis, Karlstads University, Karlstad, Sweden, 2016.
39. ISA-95. Enterprise-Control System Integration: Стандарт проектирования интегрированных производств [Электронный ресурс]: <<https://www.isa.org/standards-and-publications/isa-standards/isa-standards-committees/isa95>>.
40. *Быков В. П.* Методическое обеспечение САИП в машиностроении Л.: Машиностроение, 1989. 255 с.
41. *Boyd A., Noller D., Peters P., Salkeld D., Thomas T., Gifford C., Pike S., Smith A.* SOA in manufacturing guidebook // *MESA Intern.* 2018. N 27. P. 24—29.
42. *Industrial Cloud-Based Cyber-Physical Systems: The IMC-AESOP Approach / A. W. Colombo, T. Bangemann, S. Karnouskos, J. Delsing, P. Stluka, R. Harrison, F. Jammes, J. L. Lastra.* Springer Science & Business Media, 2014. 245 p.

43. Usländer T., Eppele U. Reference model of Industrie 4.0 Service architectures: Basic concepts and approach // at-Automatisierungstechnik. 2015. N 63(10). P. 858—866.
44. Eppele U. A Reference Architectural Model for Industrie 4.0. Aachen, Germany: RWTH Aachen Univ. 2016.
45. Park H. S., Febriani R. A. Modelling a platform for smart manufacturing system // Procedia Manufacturing. 2019. N 38. P.1660—1667.
46. Kannengiesser U., Müller H. Towards viewpoint-oriented engineering for Industry 4.0: A standards-based approach // IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS). 2018, May. P. 51—56.
47. Wang Y., Towara T., Anderl R. Topological approach for mapping technologies in reference architectural model Industrie 4.0 (RAMI 4.0) // Proc. of the World Congress on Engineering and Computer Science. 2017. Vol. 2. P. 25—27.
48. European Commission website. Production harmonizEd Reconfiguration of Flexible Robots and Machinery [Электронный ресурс]: <<https://cordis.europa.eu/project/id/680435>>.
49. Abyshev O., Yablochnikov E. Research and Development of a Service-oriented Architecture for a Smart Factory Production System // Conf. of Open Innovations Association, FRUCT 2021. N 29. P. 395—399.

Сведения об авторах

Оман Аскарбекович Абышев

— аспирант; Университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий; E-mail: abyshev.o@yandex.ru

Евгений Иванович Яблочников

— канд. техн. наук, доцент

Данил Анатольевич Заколдаев

— канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий; декан факультета; E-mail: d.zakoldaev@mail.ru

Поступила в редакцию 22.08.2022; одобрена после рецензирования 07.09.2022; принята к публикации 30.11.2022.

REFERENCES

1. OECD Digital Economy Outlook 2017, Paris, OECD Publishing, 2017, DOI: 10.1787/9789264276284-en.
2. Monostori L., Kádár B., Bauernhansl T., Kondoh S., Kumara S., Reinhart G., Sauer O., Schuh G., Sihn W., Ueda K. *CIRP Annals*, 2016, no. 2(65), pp. 621–641, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.005>.
3. http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2017/11_november/17/tsifrovoe_proizvodstvo_112017.pdf. (in Russ.)
4. Zilberburg L.I., Molochnik V.I., Yablochnikov E.I. *Informatsionnyye tekhnologii v proyektirovanii i proizvodstve* (Information Technology in Design and Production), St. Petersburg, 2008, 304 p. (in Russ.)
5. Yablochnikov E.I., Chukichev A.V., Timofeeva O.S., Abyshev O.A., Abaev G.E. and Colombo A.W. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 2021, no. 379(2207), pp. 20200370.
6. Demkovich N.A., Abaev G.E., Yablochnikov E.I. *Ritm mashinostroyeniya*, 2019, https://beepitron.com/files/content/abaev_demkovich_yablochnikov_-_mnogourovnevoe_modelirovanie_cifrovyyh_proizvodstv.pdf. (in Russ.)
7. Chukichev A.V., Timofeeva O.S., Yablochnikov E.I. *Modern engineering. Science and education*, 2020, no. 9, pp. 43–54. (in Russ.)
8. Schumacher A., Erol S., Sihn W. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 52, pp. 161–166.
9. Novikova I.V., Ravino A.V. Proceedings of BSTU, 2022, no. 1(256), <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-stranovykh-osobennostey-tsifrovizatsii-v-gosudarstvakh-eaes>. (in Russ.)
10. Radziwon A., Bilberg A., Bogers M., Madsen E.S. *Procedia Engineering*, 2014, vol. 69, pp. 1184–1190.
11. *Umsetzung und Entwicklung von Industrie 4.0. Grundlagen, Modellierung und Fallstudien*, Springer, 2016.
12. Manzei C., Schlepner L., Heinze R. *Industrie 4.0 im internationalen Kontext*, Berlin, VDE VERLAG, 2017.
13. Lee E.A. *11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computation*, 2008, pp. 363–369.
14. Colombo A.W., Gepp M., Oliveira J.B., Leitao P., Barbosa J., Wermann J. *Digitalized and Harmonized Industrial Production Systems: The PERFoRM Approach*, CRC Press, 2019, 332 p.
15. Zuehlke D. *Annual Reviews in Control*, 2010, no. 1(34), pp. 129–138.
16. Wiegers K.E., Beatty J. *Software Requirements*, 3rd Edition, 2013.
17. Gorecky D., Weyer S., Hennecke, A., Zühlke D. *IFAC-PapersOnLine*, 2016, vol. 49, pp. 79–84
18. Lee J. *Smart Factory Systems. Informatik Spektrum*, 2015, vol. 38, pp. 230–235.
19. Arnold C., Kiel D.; Voigt K. *Innovative Business Models for the Industrial Internet of Things*, BHM, 2017, vol. 162, pp. 371–381.
20. Hermann M., Pentek T., Otto B. *Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review*, Working Pap., 2015.
21. Stock T., Seliger G. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 40, pp. 536–541.
22. Radziwon A., Bilberg A., Bogers M., Skov E. *Procedia Eng.*, 2014, vol. 69.
23. Davis J., Edgar T., Porter J., Bernaden J., Sarli M. *Comput. Chem. Eng.*, 2012, vol. 47, pp. 145–156.
24. Gentner S. *CHIMIA Int. J. Chem.*, 2016, vol. 70, pp. 628–633.

25. Li X., Li D., Wan J., Vasilakos A.V., Lai C.F., Wang S. *Wirel. Netw.*, 2017, vol. 23, pp. 23–41.
26. Qin J., Liu Y., Grosvenor R. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 52, pp. 173–178.
27. Rauch E., Dallasega P., Matt D.T. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 50, pp. 26–31.
28. Vogel-Heuser B., Hess D. *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, 2016, vol. 13, pp. 411–413.
29. Oesterreich T.D., Teuteberg F. *Comput. Ind.*, 2016, vol. 83, pp. 121–139.
30. Kolberg D., Zühlke D. *IFAC-PapersOnLine*, 2015, vol. 28, pp. 1870–1875.
31. Kannan S.M., Suri K., Cadavid J., Barosan I., Van Den Brand M., Alferez M., Gerard S. *Proceedings of the IEEE International Conference on Software Architecture Workshops (ICSAW)*, Gothenburg, Sweden, April 5–7, 2017, pp. 29–35.
32. Cheng S.Q.K., Cheng K. *Chin. J. Mech. Eng.*, 2017, vol. 30, pp. 1047–1049.
33. Dugenske A., Louchez A. *Advant. Bus. Media*, 2014, vol. 19, pp. 1–5.
34. Erol S., Jäger A., Hold P., Ott K., Sihm W. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 54, pp. 13–18.
35. Robert H., Daniel V., Bilal A. *Chin. J. Mech. Eng.*, 2016, vol. 29, pp. 1046–1051.
36. Yao X., Jin H., Zhang J. *Int. J. Comput. Integr. Manuf.*, 2015, vol. 28, pp. 1291–1312.
37. Xun X. *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 2012, vol. 28, 75–86.
38. Akesson L. *Industry 4.0: Cyber-Physical Systems and Their Impact on Business Models*, Master's Thesis, Karlstads University, Karlstad, Sweden, 2016.
39. ISA-95. *Enterprise-Control System Integration*, <https://www.isa.org/standards-and-publications/isa-standards/isa-standards-committees/isa95>.
40. Bykov V.P. *Metodicheskoye obespecheniye SAPR v mashinostroyenii* (Methodological Support of CAD in Mechanical Engineering), Leningrad, 1989, 255 p. (in Russ.)
41. Boyd A., Noller D., Peters P., Salkeld D., Thomasma T., Gifford C., Pike S., Smith A. *SOA in manufacturing guidebook*, MESA International, IBM Corporation and Capgemini co-branded white paper, 2008, pp. 24–29.
42. Colombo A.W., Bangemann T., Karnouskos S., Delsing J., Stluka P., Harrison R., Jammes F., Lastra J.L. *Industrial Cloud-Based Cyber-Physical Systems: The IMC-AESOP Approach*, Springer Science & Business Media, 2014, 245 p.
43. Usländer T., Eppele U. *at-Automatisierungstechnik*, 2015, no. 10(63), pp. 858–866.
44. Eppele U. *A Reference Architectural Model for Industrie 4.0*, RWTH Aachen University, 2016.
45. Park H.S., Febriani R.A. *Procedia Manufacturing*, 2019, vol. 38, pp. 1660–1667.
46. Kannengiesser U., Müller H. *2018 IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*, May 15, 2018, IEEE, pp. 51–56.
47. Wang Y., Towara T., Anderl R. *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science*, 2017, vol. 2, pp. 25–27.
48. *European Commission website. Production harmonizEd Reconfiguration of Flexible Robots and Machinery url: <https://cordis.europa.eu/project/id/680435>*
49. Abyshev O., Yablochnikov E. *Conference of Open Innovations Association, FRUCT 2021*, no. 29, pp. 395–399.

Data on authors

- Oman A. Abyshev** — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Secure Information Technologies; E-mail: abyshev.o@yandex.ru
- Evgeny I. Yablochnikov** — Ph.D., Associated Professor
- Danil A. Zakoldaev** — Ph.D., Associated Professor; ITMO University, Faculty of Secure Information Technologies; Dean of the Faculty; E-mail: d.zakoldaev@mail.ru

Received 22.08.2022; approved after reviewing 07.09.2022; accepted for publication 30.11.2022.