

УДК 681.518

НАЗНАЧЕНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

К.С. Пешкин*

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: kir.peschkin@yandex.ru

Аннотация. *Статья посвящена активно развивающемуся в условиях информационной трансформации промышленности новому способу организации производства, связанному с внедрением киберфизических систем. Анализ рынка показывает положительную динамику в росте капитализации данного направления, что свидетельствует о широком распространении инструментов цифровой трансформации экономики в целом и росте инвестиций в развитие информационных технологий и технологий искусственного интеллекта в промышленном производстве, включая создание и внедрение киберфизических систем управления технологическими процессами в различных отраслях промышленности. В статье проведен анализ существующих определений «киберфизические системы» и «киберфизические комплексы». Раскрывается понятие киберфизической системы управления технологическими процессами, описывается ее основная структура. Киберфизическая система управления рассматривается как ряд взаимосвязанных подсистем, выполняющих строго определенные функции, направленные на реализации общих системных задач. Представлено описание каждой из подсистем, обобщенная схема их иерархических связей и взаимодействий. Рассматривается роль киберфизических систем управления в информационной трансформации промышленности и перспективы их развития в будущем.*

Ключевые слова: *Индустрия 4.0, киберфизические системы, киберфизические комплексы, интеллектуальная система управления, цифровой двойник, технологический процесс.*

Введение

Начало нового столетия многие эксперты по всему миру ассоциируют с происходящей информатизацией промышленного производства или началом промышленной революции Индустрии 4.0. Этот этап требует от современного общества переосмысления принципов организации экономики и производства, повышения степени интеграции многоуровневых информационных технологий, которые оказываются необходимыми предпосылками конкурентоспособности в условиях современного рынка. Основными признаками происходящей промышленной революции становится распространение блокчейна, интернета вещей, иску-

* Кирилл Сергеевич Пешкин, аспирант кафедры управления и системного анализа теплоэнергетических и социотехнических комплексов.

ственного интеллекта, аддитивных технологий и многомерной печати, биотехнологий, нейротехнологий, виртуальной и дополненной реальности [1].

Спутником четвертой промышленной революции является цифровая трансформация промышленности, связанная с развитием «умного производства», которое подразумевает автоматизированное цифровое производство, управляемое интеллектуальными системами в режиме реального времени. Основу «умного производства» составляет сложная многоуровневая интегрированная информационная структура, преобразующая большинство «горизонтальных» и «вертикальных» производственных и бизнес-процессов, что приводит к оптимизации технологий, операционной деятельности и моделей взаимодействия между участниками технологической цепочки.

В статье раскрывается понятие киберфизической системы управления технологическими процессами, описывается ее основная структура, элементы и связи между ними, а также рассматривается роль и перспективы развития киберфизических систем управления в информационной трансформации промышленности в будущем.

Актуальность и перспективы информационной трансформации промышленности

Актуальность цифровой модернизации промышленности подтверждается анализом рынка «умного производства», проведенным одной из крупнейших исследовательских аналитических компаний MarketsandMarkets [2]. Согласно данным проведенного исследования, рыночная капитализация цифровой промышленности достигнет к 2025 г. около 384,8 млрд долл., при этом среднегодовой прирост составит 12,4 %. Динамика изменения объемов рыночной капитализации «умного производства» на глобальных мировых рынках представлена на рис. 1.

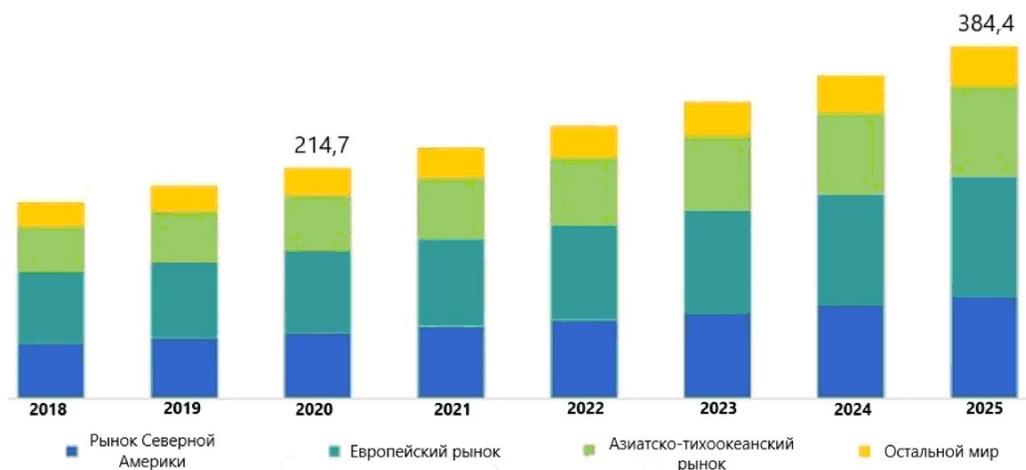


Рис. 1. Динамика рыночной капитализации умного производства в мире, млрд долл.

Среди основных факторов, напрямую влияющих на рост капитализации цифровой промышленности, можно выделить развитие и внедрение информационных технологий и растущую тенденцию промышленной автоматизации и оптимизации производственных и бизнес-процессов, что подтверждается включением правительствами государств Северной Америки, Азиатско-Тихоокеанского

региона и Европы, в том числе и России, промышленной информационной автоматизации в перечень приоритетных направлений развития науки, технологии и техники. К этим факторам также относятся подверженная динамике и постоянно усложняющаяся логистика и постоянное стремление компаний к интеллектуализации производства.

Большинство современных производственных цепочек проектируются с применением концепции Индустрии 4.0. Это позволяет предприятиям быстрее выходить на конкурентоспособный уровень производства и внедрять автоматизированные системы более высокого уровня. В настоящий момент в России уже наметился ряд лидеров, стимулирующих остальных к развитию промышленной цифровизации, среди которых можно отметить «Инфосистемы Джет», «Русавто», «Северсталь», «СУЭК», «Роснефть» [3] и многие другие компании.

Повышение уровня конкурентоспособности России в области цифровой трансформации производства возможно только при внедрении и использовании технологий Индустрии 4.0 [4]. Для этого необходимо решить ряд проблем в существующей модели промышленного производства, связанных с внедрением технологий Индустрии 3.0. Первостепенным решением этих проблем является срочная реализация задач автоматизации и оцифровывания промышленности, включенных в перечень государственной стратегии развития [5].

Государственная стратегия по внедрению технологий Индустрии 4.0 в промышленность России изложена в утвержденной правительством РФ в 2017 г. дорожной карте по развитию инициативы «Передовые производственные технологии». Основной стратегической целью является увеличение доли России на рынке глобальных услуг, соответствующих требованиям Индустрии 4.0, как минимум до 1,5 % (на данный момент доля России составляет примерно 0,28 %) [6].

Помимо государственной инициативы в решении задач цифровой трансформации промышленности необходимо учитывать высокую конкуренцию на рынке данного направления. Как отмечает автор в [7], появление новых высокотехнологичных инструментов трансформации заставляют производителей и операторов совершенствоваться с целью сохранения своего места на рынке. Для сохранения своего положения им критически необходимо формировать новые компетенции, стратегии, бизнес-модели и модели производства, инвестировать в НИОКР, чтобы как минимум остаться на рынке, как максимум – стать ключевыми игроками на новом рынке ИТ-промышленности.

Таким образом, вышеприведенные факты позволяют сделать вывод о том, что в ближайшее время можно ожидать стремительной информационной трансформации промышленности в условиях жесткой конкуренции.

Возникновение понятия «киберфизические системы»

Несомненно, переход к цифровой промышленности, равно как и совершение четвертой промышленной революции, – достаточно длительный процесс. Наряду с промышленной революцией выделяют научную, информационную и культурную революции, которые происходят относительно редко, раз в 50–200 лет. Изобретение парового двигателя ознаменовало первую промышленную революцию, что положительно сказалось на производительности труда в XIX веке. Вторая промышленная революция, произошедшая в начале XX века, характеризуется внедрением массового производства за счет применения конвейерной линии и электричества. Начало 1970-х гг. ознаменовало внедрение и распространение промышленных роботов и повсеместную автоматизацию производства, что при-

вело к третьей промышленной революции. Таким образом, четвертая промышленная революция характеризуется полной цифровизацией промышленности, основана на синтезе новых информационных и промышленных технологий.

Необходимо отметить, что все промышленные революции характеризует появление принципиально новых способов организации промышленного производства и связанных с этим существенных изменений социальных отношений. При этом часто упускают из вида инструментальную революцию, которая представляет собой процесс, происходящий значительно чаще, примерно каждые 10–20 лет [8]. Такого рода революции характеризуются изобретением и распространением до этого неизвестных или известных не в полной мере новых инструментов, программных продуктов, оборудования, технологических подходов и т. д. Таким образом, можно считать, что инструментальные революции являются предпосылками к наступлению более глобальных промышленных революций.

Исследователи феномена киберфизических систем (КФС, CPS, Cyber Physical System) как части инструментальной революции, связанной с Индустрией 4.0, отмечают их возникновение как естественное развитие встраиваемых вычислительных систем (BcC, Embedded Systems, ES), сетевых или распределительных систем (PBcC, Networked Embedded Systems, NES) и беспроводных сенсорных сетей (Wireless Sensor Network, WSN) [9, 10]. Указанные тенденции связаны со стремлением к удешевлению элементной базы вычислительных устройств, увеличению степени их интеграции и надежности, объединению всех элементов в единый производственный комплекс. Таким образом, по мере нарастающей минимизации размеров вычислительных и вспомогательных устройств, а также их тесной интеграции с объектом управления образовался новый вид систем – киберфизические системы.

Термин «киберфизическая система» был введен в 2006 г. на конференции National Science Foundation (NSF) в США [11]. Он был предложен для описания систем, объединяющих в себе физические процессы и информационные технологии и в то же время являющихся распределенными, гетерогенными и масштабируемыми. С тех пор термин получил широкое распространение и стал использоваться в различных областях, включая автоматизацию производства, транспорт, энергетику, медицину и другие.

Литературный анализ показал отсутствие единого, принятого научным сообществом точного определения термина «киберфизические системы». При этом существуют достаточно распространенные определения, которые с определенной степенью полноты описывают данное понятие.

Коллектив экспертов в материалах исследования по будущему науки и техники (STOA) дает следующее определение киберфизических систем (КФС): «КФС – это система взаимодействующих вычислительных элементов, управляющих физическими объектами, включая гуманоидных роботов, искусственный интеллект (AI), Интернет вещей (IoT) и любое устройство или машину, которые подключены к сети информации» [12].

Группа исследователей по направлению «Этические аспекты киберфизических систем» предлагают сразу два определения КФС: «КФС – это интеллектуальные робототехнические системы, связанные с Интернетом вещей, или технические системы сетевых компьютеров, роботов и искусственного интеллекта, которые взаимодействуют с физическим миром» и «КФС – это технические системы, в которых сетевые компьютеры и роботы взаимодействуют с физическим миром. Эти системы могут взаимодействовать с нами во многих областях, дви-

гаться по нашим дорогам, двигаться вместе с нами в нашей повседневной жизни и работать в наших отраслях» [13].

В грантовой программе Cyber-Physical Systems (CPS) NSF 18-538 термину «киберфизические системы» предлагается следующее определение: «КФС – это спроектированные системы, которые построены и зависят от бесшовной интеграции вычислений и физических компонентов. КФС тесно интегрирует вычислительные устройства, управление, сетевую инфраструктуру и восприятие физического мира. Система может включать взаимодействие человека с контролем или не включать. КФС может также включать несколько интерферируемых системных компонентов, работающих в широких разновидностях пространственных и временных масштабов» [14].

Все приведенные определения сводятся к пониманию КФС как интегрированной системы, объединяющей в себе физические процессы и информационные технологии, которая работает в реальном времени, имеет возможность взаимодействия с окружающей средой и способна адаптироваться к изменениям внешних условий. Это определение подчеркивает, что КФС интегрирует физические и информационные компоненты, работает в реальном времени, а также обладает гибкостью и способностью адаптации к изменениям в окружающей среде.

Наряду с КФС исследователи вводят более общее понятие – киберфизические комплексы (КФК), которое также не имеет общепринятой строгой единой трактовки. Под КФК, как правило, понимается результат синтеза нескольких КФС, что позволяет говорить не об отдельной системе, а о совокупности интегрированных и взаимодействующих друг с другом киберфизических систем.

Определение термина «киберфизический комплекс» может иметь различные интерпретации в различных научных и профессиональных сообществах. В наиболее широком смысле киберфизический промышленный комплекс имеет иерархическую модульную организацию, объединяющую киберфизические системы, которые взаимодействуют друг с другом и с внешней средой, а также другие физические системы, предназначенные для решения задач производства, управления и обслуживания, которые возникают в рамках производственного процесса. Комплекс такого рода интегрирует технологические и информационные ресурсы, включает в себя киберфизические компоненты, представляющие собой сочетание физических устройств и систем, которые управляются и контролируются программным обеспечением и сетевыми технологиями, и социальные компоненты (операторы, менеджеры и т. д.), которые взаимодействуют в рамках производственного процесса и образуют единую интегрированную структуру.

Киберфизические системы и киберфизические комплексы в промышленности объединяет направленность на цифровую трансформацию производства конечной продукции (например, валов, турбин, лопастей и т. д.), которое включает в себя совокупность технологических процессов (промежуточных технологических этапов производственной цепочки, например: нагрев, резка, обработка давлением и т. д.). Отдельные технологические стадии также подвергаются цифровизации в рамках оптимизации и интеллектуализации промышленного производства за счет внедрения киберфизических систем управления технологическими процессами (КФСУ ТП).

Киберфизическая система управления технологическим процессом

Определение киберфизической системы управления технологическими процессами должно опираться на приведенные выше общие определения киберфизической системы и в полной мере отражать феномен информационной трансформации промышленного производства. В этом смысле под КФСУ ТП следует понимать автоматизированную, информационную систему, объединяющую вычислительные, измерительные, управляющие, коммуникационные подсистемы и физический технологический процесс или объект управления. При этом КФСУ ТП функционирует в режиме реального времени и позволяет получать информацию о текущем состоянии процесса, а также принимать решения на основе анализа этой информации с целью автоматизации, оптимизации и интеллектуализации производственных процессов и повышения их эффективности.

Рассмотрим отдельно каждую из подсистем, составляющих КФСУ ТП, что позволит определить функциональное назначение и принципиальные особенности функционирования и взаимодействия основных элементов системы.

Под вычислительной подсистемой понимается одна из основных подсистем КФСУ ТП, в которую входят вычисляющие микропроцессоры, инструменты для хранения и обработки информации и т. д. Принципиальной особенностью данной подсистемы является наличие информационных инструментов, характеризующих Индустрию 4.0. Основным из таких инструментов, который часто применяется в промышленном производстве, является цифровой двойник (DT, Digital Twin). Цифровой двойник – это численная или виртуальная модель физического процесса или объекта, максимально приближенно описывающая его функционирование. Значимость цифровых двойников для «умного производства» сложно переоценить, поскольку они используются для тестирования и симуляции различных сценариев и прогнозов поведения объектов управления, оптимизации производственных процессов и обнаружения неисправностей без вмешательства в реальный процесс.

Интернет вещей (IoT, Internet of Things) открывает большие возможности в функционировании КФСУ ТП. Интернет вещей представляет собой систему взаимосвязанных вычислительных устройств, способных к сбору и передаче информации между сопряженными объектами без участия человека. Такой цифровой инструмент позволяет объединять между собой производственные базы, образуя тем самым взаимосвязанную систему, которая в режиме реального времени обменивается информацией, позволяя тем самым управлять режимом работы производства без человека или с косвенным его участием.

Неотъемлемым элементом сложной киберфизической системы являются технологии обработки масштабных и сложных наборов данных в режиме реального времени (Big Data). В общем случае Big Data представляет собой структурированные или неструктурированные массивы информации больших объемов. Обработка таких массивов специальными автоматизированными инструментами открывает КФСУ ТП большие возможности в анализе, статистике, прогнозировании и даже в принятии решений.

Элементами измерительной подсистемы в КФСУ ТП являются датчики и измерительные устройства различного уровня. Прежде всего они являются источником поступающей в вычислительную подсистему информации, где впоследствии эта информация обрабатывается. Измерительные компоненты находятся непосредственно на самом физическом объекте или процессе и на управляющих компонентах.

Управляющая подсистема в КФСУ ТП представляет собой интеллектуальную систему управления (ИСУ), которая ответственна за принятие решений, основанных на анализе данных, и управление физическими процессами. Перспективными инструментами, которые можно эффективно интегрировать в состав КФСУ ТП, являются интеллектуальные технологии управления технологическими процессами и объектами. Они основаны на системном подходе, современной теории управления и методах искусственного интеллекта. Интеллектуальные технологии управления реализуют сразу несколько функций: сбор и предварительная обработка данных, формирование механизма управления, обучение и адаптация, выполнение управляющего воздействия. Новые методы и подходы в области интеллектуальных технологий управления, включающие инженерию знаний, распознавание образов, ассоциативную память, нечеткую логику, нейронные сети и машинное самообучение, позволили открыть новые возможности в решении проблем управления сложными технологическими процессами. Для реализации этих задач в ИСУ целесообразно и наиболее эффективно использовать интеграцию современных классических методов теории управления с методами и подходами Индустрии 4.0.

ИСУ получает данные из других подсистем, которые затем обрабатываются и используются в целях управления технологическими процессами, идентификации объектов управления, адаптации алгоритмов управления. На основе полученных данных и прогнозов ИСУ принимает управленческие решения и передает соответствующие команды физическим компонентам КФСУ ТП. ИСУ может не только адаптироваться к изменяющимся условиям функционирования, но и оптимизировать работу системы в целом. Она обладает способностью самостоятельно обучаться на основе новых данных и улучшать свою работу с течением времени. ИСУ является ключевой частью КФСУ ТП, которая позволяет автоматизировать и оптимизировать технологические процессы в различных отраслях промышленности.

Коммуникационная подсистема в КФСУ ТП отвечает за взаимосвязь как между остальными компонентами системы, так и между различными КФСУ, интегрированными друг с другом, например в киберфизическом комплексе. Взаимосвязь компонентов может обеспечиваться как с использованием сетевых или распределительных систем (PBC, Networked Embedded Systems, NES), беспроводных сенсорных сетей (Wireless Sensor Network, WSN), так и при помощи Интернета вещей (IoT, Internet of Things).

Физический процесс или объект – это непосредственно объект управления, который полностью интегрирован в КФСУ ТП посредством соединения его с вычислительной подсистемой через измерительную, управляющую и коммуникационную подсистемы.

КФСУ ТП функционирует в режиме реального времени и автоматически обрабатывает запросы пользователей, а также приспосабливается к изменениям, вызванным воздействиями внешних сил.

Структура киберфизической системы управления технологическим процессом

Функционирование киберфизической системы управления технологическим процессом может быть представлено как взаимодействие ее основных подсистем, описанных выше. Несмотря на сложность и многоцелевую направленность функционального назначения подсистем КФСУ ТП все выполняемые подсисте-

мами функции могут быть условно разделены на три основные реализуемые системой задачи: моделирование, управление и анализ [15] (рис. 2).



Рис. 2. Основные задачи КФСУ ТП

Одни и те же функции подсистем могут быть нацелены на реализацию только одной или одновременно нескольких задач, которые, в свою очередь, могут решаться как последовательно, так и параллельно. При этом содержание указанных задач следует понимать в расширенном смысле, как это описано в предыдущем разделе, а схема на рис. 2 дает лишь предельно упрощенное представление о возможной аналогии между КФСУ ТП и традиционными АСУ ТП, которую необходимо иметь в виду несмотря на существующие принципиальные отличия между данными системами. Таким образом, функциональная направленность работы КФСУ ТП заключается в итеративном и параллельном выполнении описанных выше функций с целью реализации трех основных задач.

Исходя из представленного описания киберфизической системы управления технологическим процессом можно представить ее обобщенную схему, как показано на рис. 3.

Киберфизические системы имеют два иерархических уровня: вычислительный (информационный) и прикладной (физический) [16]. Это в полной мере относится и к КФСУ ТП. При этом к информационному уровню относятся вычислительная, измерительная, управляющая и коммуникационная подсистемы, а к прикладному – физический процесс или объект управления.

На основе определения основных функций КФСУ ТП и анализа ее обобщенной иерархической структуры можно выделить ряд признаков, которым должна отвечать КФСУ ТП:

1. Признак гибридности: КФСУ ТП строится по принципу интеграции информационно-вычислительной части с физическим процессом или объектом.
2. Высокая степень автоматизации: КФСУ обычно работает без постоянного контроля оператора, поскольку использует специальные методы и искусственный интеллект для принятия решений и управления физическими объектами.

3. Признак автономности: КФСУ ТП можно признать полностью автономной только в случае вхождения в состав вычислительного компонента ИИ, отвечающего за принятие решений без участия человека.

4. Признак адаптивности и гибкости: КФСУ ТП должна подстраиваться под требования пользователя или под изменения, вызванные действиями внешних сил.

5. Признак целостности: каждый компонент КФСУ ТП в достаточной мере связан с другими компонентами, образуя тем самым взаимосвязанную систему, поэтому при ее рассмотрении необходимо использовать системные подходы и методы системного анализа.

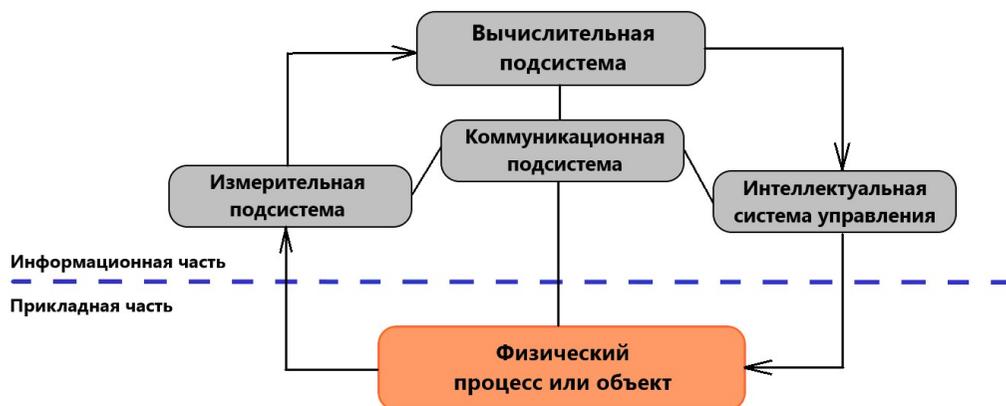


Рис. 3. Обобщенная схема КФСУ ТП

Другими неотъемлемыми признаками КФСУ ТП являются: обработка данных в реальном времени, гибкость и масштабируемость, безопасность использования информации и др., что свидетельствует о значительном потенциале применения таких систем в соответствии с современными тенденциями развития промышленного производства.

КФСУ ТП имеют принципиальные отличия от традиционных АСУ ТП, которые часто не способны адаптироваться к быстро изменяющимся условиям и, как правило, выполняют только функции автоматического управления технологическими процессами производства типовых изделий. В связи с этим перестройка существующего производства, построенного на принципах традиционных систем управления, может занимать значительное количество времени, требовать существенного технического переоснащения и прохождения многочисленных согласований и управленческих решений. КФСУ ТП позволяют создавать более гибкие и адаптивные производственные схемы, способные быстро реагировать на изменения спроса и условий производства, повышая его эффективность и обеспечивая конкурентное преимущество на рынке.

Значимость КФСУ ТП для современного информационного промышленного преобразования сложно переоценить. Прежде всего, идеи и принципы КФСУ ТП хорошо согласуются с современными тенденциями «умного производства» при возможности использования преимуществ традиционных методов и принципов построения систем автоматического управления. Дополнительным достоинством КФСУ ТП является возможность реализации массового производства товаров по индивидуальным заказам, то есть нетиповых изделий, при сохранении оптовых

цен, за счет гибкости и адаптивности. Таким образом, внедрение КФСУ ТП способно эффективно поменять традиционные подходы к оптимизации и интеллектуализации технологических процессов, включая организацию производственных цепочек в целом. Это позволит организовать выпуск широкой номенклатуры товаров в рамках одного производственного комплекса с максимально возможным качеством, при минимальных затратах и за максимально короткие сроки перестройки системы в постоянно изменяющихся внешних условиях.

Заключение

Рассмотренные в данной статье вопросы раскрывают сущность общих понятий киберфизических систем, киберфизических комплексов и киберфизических систем управления технологическими процессами. КФСУ ТП, являющиеся инструментом происходящей в данный момент четвертой промышленной революции, в полной мере влияют на современное промышленное производство и экономику. Современная информационная трансформация типового массового промышленного производства характеризуется существенным ростом уровня автоматизации, оптимизации и интеллектуализации процессов управления, принятия решений, отчетности, аналитики и т. д. Благодаря свойству адаптивности и гибкости КФСУ ТП ожидается их стремительное развитие и внедрение в промышленное производство широкой номенклатуры изделий для быстрого и конкурентоспособного реагирования на изменяющуюся рыночную ситуацию. Значимость КФСУ ТП в современной технологической трансформации подтверждается ростом капитализации «умного производства» в мире, поскольку только за последние 5 лет среднегодовой прирост капитала информационного производства составил 12,4 %.

Кроме того, внедрение в технологический процесс цифровых интеллектуальных элементов позволит повысить производительность труда, а внедрение интеллектуальных систем управления в составе КФСУ ТП позволит существенно сократить влияние «человеческого фактора» за счет оптимальной перестройки промышленного производства, рационального распределения нагрузки оборудования, снижения негативного воздействия на окружающую среду [17], сокращения времени принятия решений и т. д.

С учетом темпов развития интеллектуального производства и ежегодного прироста капитала в развитие информационных технологий ожидается бурное развитие и повсеместное распространение КФСУ ТП, что можно будет увидеть в ближайшее время.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шваб К. Технологии Четвертой промышленной революции. М.: Эксмо, 2018. 320 с.
2. SMART MANUFACTURING MARKET // MARKETSandMARKETS. URL: https://www.marketsandmarkets.com/practices/SmartManufacturing?+utm_source=IEEE (дата обращения: 21.02.2023).
3. Моисеев В. Интеллектуализация производства: реальные примеры. URL: <https://iot.ru/promyshlennost/intellektualizatsiya-proizvodstva-realnye-primery> (дата обращения: 12.02.2023).
4. Капустина Л.М., Кондратенко Ю.Н. Проблемы конкурентоспособности России в условиях развития Индустрии 4 // Фундаментальные и прикладные исследования в области управления, экономики и торговли. СПб, 2017. С. 191–196.
5. Кондратенко Ю.Н. «Умное» предприятие в промышленности региона: понятие и перспективы // Урал – XXI век: регион инновационного развития: материалы II Междунар. науч.-практ. конф. Екатеринбург, 2017. С. 158–165.

6. Россия 4.0: четвертая промышленная революция как стимул глобальной конкурентоспособности // ТАСС. URL: <http://tass.ru/pmef-2017/articles/4277607> (дата обращения: 11.02.2023).
7. *Martin Mikusz*. Towards an understanding of cyber-physical systems as industrial software-product-service systems // Conference paper in Procedia CIRP. 2014.
8. *Чеклецов В.В.* Чувство планеты. Интернет вещей и следующая технологическая революция. М.: Российский исследовательский центр по Интернету вещей, 2013. 130 с..
9. A 21st Century Cyber-Physical Systems Education. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2016 Washington, DC: The National Academies Press.
10. *Lee E.A., Seshia S.A.* Introduction to Embedded Systems – A Cyber-Physical Systems Approach, Second Edition. MIT Press, 2017.
11. *Colombo A., Bangemann T.* Industrial Cloud-based Cyber-physical Systems: The IMC-AESOP Approach. Cham Springer International Publishing, 2014. 245 p.
12. European Parliament. Panel for the Future of Science and Technology (STOA). URL: <https://www.europarl.europa.eu/stoa/en/home/highlights> (дата обращения: 19.01.2023).
13. Ethical Aspects of Cyber-Physical Systems. URL: <http://www.europarl.europa.eu> (дата обращения: 19.01.2023).
14. Cyber-Physical Systems. Program solicitation NSF 18-538. URL: <https://www.nsf.gov> (дата обращения: 19.01.2023).
15. *Lee E.A., Seshia S.A.* Introduction to Embedded Systems – A Cyber-Physical Systems Approach. LeeSeshia.org, 2011.
16. *Горбачев Я.Г., Платунов А.Е., Пинкевич В.Ю., Кольчурин М.В.* Киберфизические системы. Методы высокоуровневого проектирования. СПб: Университет ИТМО, 2022. 48 с.
17. *Денисов А.А.* Современные проблемы системного анализа: учебник. 3-е изд. СПб. : Изд-во Политехнического университета, 2008. 291–293 с.

Статья поступила в редакцию 24 февраля 2023 г.

PURPOSE AND PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF CYBERPHYSICAL SYSTEMS FOR TECHNOLOGICAL PROCESSES

K.S. Peshkin*

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: kir.peschkin@yandex.ru

Abstract: *The article is devoted to a new way of organizing production that is actively developing in the conditions of the industry's information transformation associated with the introduction of cyber-physical systems. Market analysis shows a positive trend in the growth of capitalization of this industry, indicating the widespread use of digital transformation tools for production and increased investment in the development of information technologies, including the creation and implementation of cyber-physical systems. The article analyzes the existing definitions of "cyber-physical systems" and "cyber-physical complexes." It also reveals the concept of a cyber-physical control system for the technological processes" and describes its main structure. The cyber-physical control system is considered a number of interconnected subsystems that perform strictly defined functions. The article presents a description of each of these subsystems, a generalized scheme of their hierarchical connections, and interactions. The article also considers the role of cyber-physical control systems in the information transformation of the industry and discusses the prospects for their future development.*

Keywords: *Industry 4.0, cyber-physical systems, cyber-physical complexes, intelligent control system, digital twin, technological process.*

REFERENCES

1. *Shvab K. Tekhnologii Chetvertoï promyshlennoï revolyucii [Technologies of the Fourth Industrial Revolution] M.: Eksmo, 2018. 320 p. (In Russian).*
2. SMART MANUFACTURING MARKET // MARKETSandMARKETS. URL: https://www.marketsandmarkets.com/practices/SmartManufacturing?+utm_source=IEEE (accessed February 21, 2023).
3. *Moiseyev V. Intellektualizatsiya proizvodstva: real'nye primery [Intellectualization of production: real examples]. URL: <https://iot.ru/promyshlennost/intellektualizatsiya-proizvodstva-realnye-primery> (accessed February 12, 2023). (In Russian).*
4. *Kapustina L.M., Kondratenko Yu.N. Problemy konkurentosposobnosti Rossii v usloviyah razvitiya Industrii 4 [Problems of Russia's competitiveness in the conditions of Industry development 4] // Fundamental and applied research in the field of management, economics and trade. SPb., 2017. P. 191–196. (In Russian).*
5. *Kondratenko Yu.N. «Umnoe» predpriyatie v promyshlennosti regiona: ponyatie i perspektivy ["Smart" enterprise in the industry of the region: the concept and prospects] // Ural – XXI century: the region of innovative development: materials of the II International. scientific and practical conferences. Ekaterinburg, 2017. P. 158–165. (In Russian).*
6. *Russia 4.0: the Fourth Industrial Revolution as an incentive for global competitiveness // TASS. URL: <http://tass.ru/pmef-2017/articles/4277607> (accessed February 11, 2023).*
7. *Martin Mikusz. Towards an understanding of cyber-physical systems as industrial software-product-service systems // Conference paper in Procedia CIRP. 2014.*
8. *Chyckletsov V.V. Chuvstvo planety. Internet veshchej i sleduyushchaya tekhnologicheskaya revolyuciya [The feeling of the planet. The Internet of Things and the next technological revolution]. M.: Russian Research Center for the Internet of Things, 2013. 130 p. (In Russian).*

* Kirill S. Peshkin, Postgraduate Student.

9. A 21st Century Cyber-Physical Systems Education. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2016 Washington, DC: The National Academies Press.
10. *Lee E.A., Seshia S.A.* Introduction to Embedded Systems – A Cyber-Physical Systems Approach, Second Edition. MIT Press, 2017.
11. *Colombo A., Bangemann T.* Industrial Cloud-based Cyber-physical Systems: The IMC-AESOP Approach. Cham Springer International Publishing, 2014. 245 p.
12. European Parliament. Panel for the Future of Science and Technology (STOA). URL: <https://www.europarl.europa.eu/stoa/en/home/highlights> (accessed January 11, 2023).
13. Ethical Aspects of Cyber-Physical Systems. URL: <http://www.europarl.europa.eu> (accessed January 19, 2023).
14. Cyber-Physical Systems. Program solicitation NSF 18-538. URL: <https://www.nsf.gov> (accessed January 19, 2023).
15. *Lee E.A., Seshia S.A.* Introduction to Embedded Systems – A Cyber-Physical Systems Approach. LeeSeshia.org, 2011.
16. *Gorbachev Ya.G., Platunov A.Ye., Pinkyevich V.Yu., Kol'churin M.V.* Kiberfizicheskie sistemy. Metody vysokourovneвого proektirovaniya [Cyberphysical systems. Methods of high-level design]. SPb: ITMO University, 2022. 48 p. (In Russian).
17. *Dyenisov A.A.* Sovremennye problemy sistemnogo analiza [Modern problems of system analysis: textbook. 3rd edition]. SPb.: Polytechnic University Publishing House, 2008. 291–293 p. (In Russian).