



УДК 004.4

ОРГАНИЗАЦИЯ ЦИФРОВЫХ ПРОИЗВОДСТВ ИНДУСТРИИ 4.0 НА ОСНОВЕ КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ОНТОЛОГИЙ

А.В. Гурьянов^a, Д.А. Заклдаев^b, А.В. Шукалов^{a,b}, И.О. Жаринов^{a,b}, М.О. Костишин^{a,b}^a АО «ОКБ «Электроавтоматика», Санкт-Петербург, 198095, Российская Федерация^b Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Адрес для переписки: igor_rabota@pisem.net

Информация о статье

Поступила в редакцию 01.01.18, принята к печати 12.02.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-2-268-277

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Гурьянов А.В., Заклдаев Д.А., Шукалов А.В., Жаринов И.О., Костишин М.О. Организация цифровых производств Индустрии 4.0 на основе киберфизических систем и онтологий // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 2. С. 268–277. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-2-268-277

Аннотация

Предмет исследования. Предложены схемы организации работ на производственных приборостроительных предприятиях Индустрии 4.0 типа «умная фабрика», оснащенных киберфизическими системами. Исследования по киберфизификации производства выполняются в рамках разработки и внедрения в отечественную промышленность идей и решений, направленных на создание в нашей стране «умных предприятий», способных функционировать в условиях цифровой экономики и обладающих новыми производственными технологиями. **Метод.** Используются методы организации производственных работ по изготовлению изделий приборостроения с применением киберфизических систем и онтологий в условиях предприятий будущего на основе общей теории автоматизации проектирования. **Основные результаты.** Показано, что эффект от внедрения предлагаемых принципов организации производственных предприятий в формате фабрик будущего способствует переходу отечественной промышленности к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, что соответствует направлению государственной научно-технической политики Российской Федерации в области приборостроения и машиностроения. **Практическая значимость.** Результаты работы могут быть использованы при разработке алгоритмов автоматизированного проектирования приборостроительного (машиностроительного) цифрового производства, функционирующего в условиях цифровой экономики Российской Федерации.

Ключевые слова

Индустрия 4.0, киберфизические системы, производство, онтология

INDUSTRY 4.0 DIGITAL PRODUCTION ORGANIZATION BASED ON CYBER AND PHYSICAL SYSTEMS AND ONTOLOGIES

A.V. Gurjanov^a, D.A. Zakoldaev^b, A.V. Shukalov^{a,b}, I.O. Zharinov^{a,b}, M.O. Kostishin^{a,b}^a Stock Company "Experimental Design Bureau "Electroavtomatika" named after P.A. Yefimov", Saint Petersburg, 198095, Russian Federation^b ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: igor_rabota@pisem.net

Article info

Received 01.01.18, accepted 12.02.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-2-268-277

Article in Russian

For citation: Gurjanov A.V., Zakoldaev D.A., Shukalov A.V., Zharinov I.O., Kostishin M.O. Industry 4.0 digital production organization based on cyber and physical systems and ontologies. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 2, pp. 268–277 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-2-268-277

Abstract

Subject of Research. The paper proposes the work organization schemes in the Industry 4.0 instrument making production companies of “smart factory” type equipped with cyber and physical systems. Studies on the production cyber-physiphication are being carried out aimed at the development and implementation of ideas and decisions in the domestic industry, which will help to establish “smart companies” in our country capable of functioning in the conditions of digital economy and possessing new production technologies. **Method.** We used the work organization methods for item design manufacturing with the cyber and physical systems and ontologies implementation in the conditions of the companies of the future on the

basis of the design automation general theory. **Main Results.** It is shown that the effect of the production companies proposed organization principles implementation in the factories of the future format can boost the Russian Federation industry transfer to the most advanced digital, intellectual production technologies, robotized systems, new materials and designing methods that corresponds to the Russian Federation State Scientific and Technical Policy in the field of instrument making and machine manufacturing. **Practical Relevance.** The results of this research can be applied in the development of automation design algorithms for instrument making (machine manufacturing) digital production operating in the conditions of the Russian Federation digital economy.

Keywords

Industry 4.0, cyber and physical systems, production, ontology

Введение

Деятельность современных производственных предприятий реализуется [1–3] сегодня в соответствии с технологическими процессами Индустрии 3.0. В проектно-производственную деятельность внедряются новые технические и программные средства и системы автоматизации, повышающие производительность труда проектировщиков и снижающие время выполнения отдельных этапов жизненного цикла изделий.

Анализ путей модернизации производственных мощностей предприятий показывает [4–7], что основные направления развития, которые поддерживают организации, ориентированы не только на снижение издержек, автоматизацию технологических процессов и т.д., но и на цифровизацию проектных процедур, процессов снабжения, производства, логистики, поддержания изделия в эксплуатации и т.д. в общем жизненном цикле изделий.

Необходимость оптимизации этапов жизненного цикла изделий приводит к решению ряда сопутствующих задач [8–11], ориентированных на разработку новых подходов к созданию производственных комплексов предприятий будущего, поддерживающих интеграцию технологических, технических, программных и других средств и систем, автоматизирующих этапы разработки и изготовления изделий приборостроения. Такими системами, предназначенными для работы на предприятиях будущего, являются киберфизические системы [12].

Киберфизические системы на производстве

В основе организации производственных предприятий Индустрии 4.0 типа «умная фабрика» лежат [6, 9] технологии промышленного Интернета вещей, облачные технологии, технологии сбора и обработки больших массивов производственных данных и др., обеспечивающие работу роботизированного автоматического технологического оборудования – киберфизических систем.

Схема взаимодействия персонала и киберфизических систем на производственном предприятии приведена на рис. 1. Как следует из анализа рис. 1, управление оборудованием персонал осуществляет удаленным способом при помощи средств вычислительной техники (персональный компьютер (ПК), планшет, телефон и пр.), подключенных к беспроводной сети промышленного Интернета вещей (IoT – Internet of Things).

Интерфейс IoT поддерживается различными спецификациями беспроводных сетей. Наибольшее распространение на практике получили спецификации Bluetooth, Wi-Fi и др. Основной недостаток этих и ряда других протоколов передачи производственных данных в беспроводных сетях заключается в ограниченной дальности распространения радиосигналов между абонентами сети, вследствие чего на практике для организации бесперебойной работы технологического оборудования протяженных производственных линий задействуются роутеры.

Со стороны персонала технологии беспроводных сетей поддерживаются на аппаратно-программном уровне пользовательским оборудованием (ПК, планшет, телефон), что создает предпосылки для организации «безлюдного» производства, управление которым обеспечивается дистанционно.

В качестве примера практической реализации дистанционного способа управления компонентом киберфизической системы можно привести способ управления 3D-принтерами, установленными на производстве одного предприятия (участка), производственным персоналом, территориально размещенным в корпусах другого производственного предприятия, входящих в состав одной корпорации. Очевидно, что технологическое оборудование (3D-принтеры) целесообразно размещать в непосредственной близости от предприятия, формирующего сырье (металлическую пудру, спекаемую в рабочей камере 3D-принтера) для работы цифровых предприятий, поддерживающих аддитивные технологии. При этом управленческий персонал предприятия может территориально располагаться в другом регионе страны, контролируя состояние процессов на предприятии по интерфейсам IoT с применением облачных технологий.

Со стороны технологического оборудования киберфизических систем на физическом уровне протоколы беспроводной связи поддерживаются встроенными в производственные автоматы контроллерами сети IoT. Каждый производственный автомат оснащен персональным контроллером сети IoT.

Производственные данные, передаваемые от киберфизической системы персоналу «умной фабрики», включают:

- состояние выполнения технологического процесса в рабочей камере производственного автомата (установка на печатные платы элементной базы, промывка печатных плат, нанесение гальванического покрытия на детали, полученные методом трехмерной печати и др.), регистрируемое специальной системой встроенных датчиков;
- состояние технологического оборудования, выполняющего производственную операцию (состояние исправности; остаток сырья (компонентов), необходимых для выполнения технологической операции; необходимость замены инструмента, проведения регламентных и предупредительных по техническому обслуживанию оборудования и т.д.), регистрируемое специальной системой встроенных датчиков.

Предварительную обработку данных от датчиков состояния технологического оборудования и датчиков выполнения технологических операций обеспечивает встроенный контроллер управления, осуществляющий информационный обмен с контроллером IoT.

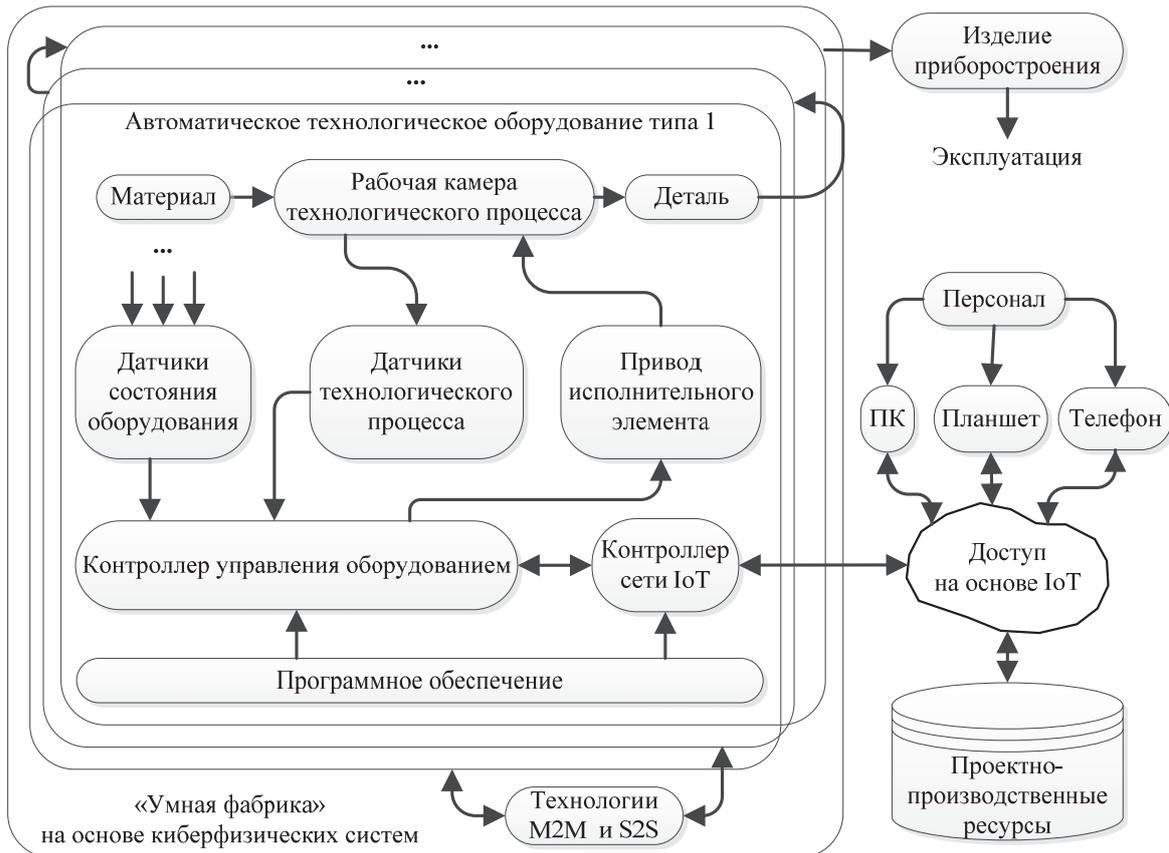


Рис. 1. Схема взаимодействия персонала и киберфизических систем на предприятиях Индустрии 4.0 типа «умная фабрика»

Для обеспечения работы производственного автомата по заданной программе контроллер управления оборудованием обеспечивает формирование необходимых команд управления на привод исполнительного элемента, выполняющего необходимую производственную операцию. Таким образом, «рабочая камера – датчик – контроллер управления – привод» образуют замкнутый контур цифровой автоматической системы управления [10], обеспечивающей выполнение заданных технологических операций в автоматическом режиме.

Информационные процессы, циркулирующие в этом замкнутом контуре, становятся доступны персоналу производственного предприятия за счет обмена, поддерживаемого контроллером IoT. Эти процессы представляют интерес для персонала только в случае возникновения нештатных ситуаций в работе оборудования, чтобы выяснить время и причину возникновения сбоя (поломка, нарушение технологического процесса и пр.) в работе производственной линии. В то же время данные от датчика состояния технологического оборудования представляют для персонала постоянный интерес, так как от исправности оборудования, поддержания запаса инструмента и сырья внутри производственного автомата на заданном уровне и пр. зависит успех выполнения всей программы выпуска завода.

Очевидно, что у персонала производственного предприятия в случае возникновения нештатных ситуаций в работе автоматического оборудования, выявляемых в процессе мониторинга, должны быть в распоряжении стандартизованные и утвержденные соответствующими инструкциями алгоритмы реаги-

рования, показанные на рис. 1 библиотекой «проектно-производственные ресурсы», доступные по интерфейсам IoT специалистам «умной фабрики».

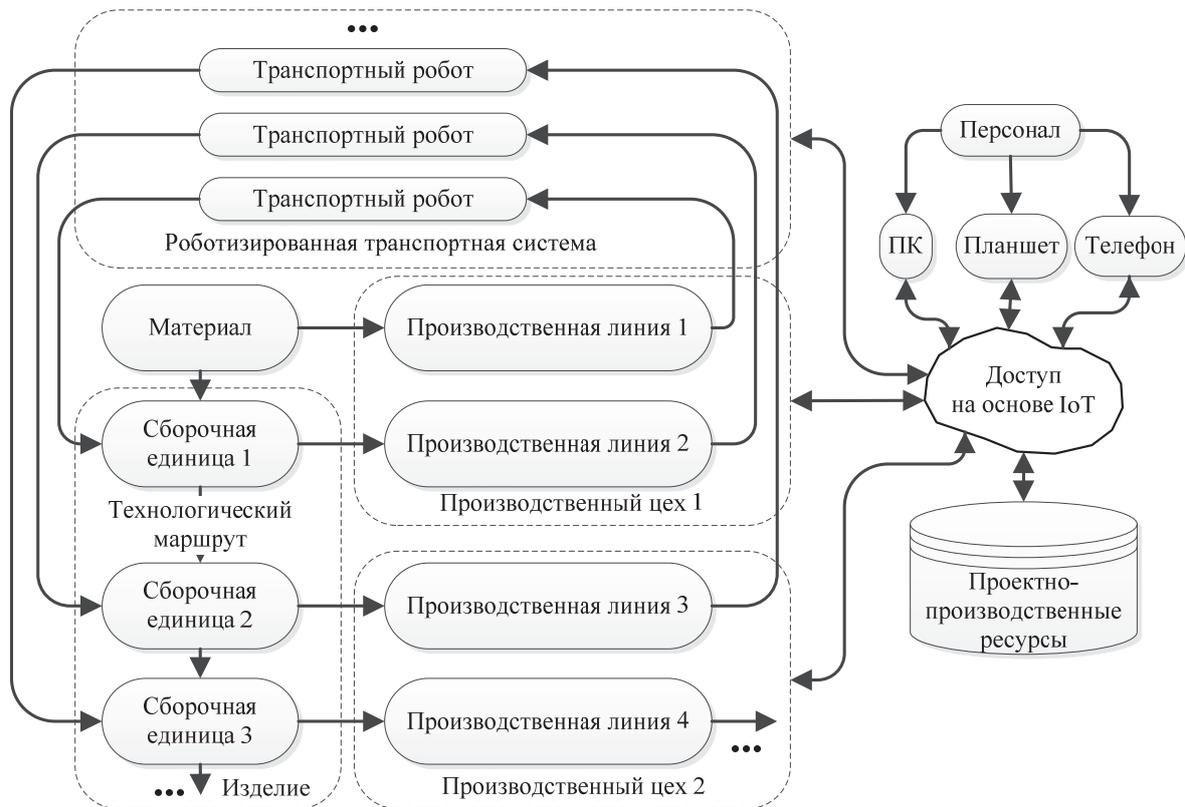


Рис. 2. Схема движения сборочных единиц на предприятиях Индустрии 4.0 типа «умная фабрика»

Взаимодействие отдельных компонентов киберфизических систем в составе единой производственной линии осуществляется на основе схемы (технологий) M2M и S2S, т.е. Machine-to-Machine и Systems-to-Systems соответственно. Пример схемы движения сборочных единиц на предприятиях Индустрии 4.0 типа «умная фабрика» приведен на рис. 2.

Каждая производственная линия состоит из набора автоматического технологического оборудования, выполняющего набор операций со сборочными единицами. В зависимости от назначения производственных автоматов это могут быть:

- технологические операции по установке компонентов элементной базы на печатные платы;
- операции промывки печатных плат после монтажа;
- операции рентгенологического контроля качества поверхностного монтажа компонентов;
- операции ультрафиолетового отверждения влагозащитного покрытия (лака);
- операции нанесения антикоррозионного гальванического покрытия на металлические детали;
- операции сборки модуля из набора деталей и печатной платы с установленными компонентами и пр.

Совокупность производственных линий образует производственный цех, специализирующийся на выполнении определенных технологических операций. Последовательность технологических операций, выполняемых в процессе изготовления изделия приборостроения, образует технологический маршрут изготовления изделия. Если технологический маршрут изготовления изделия предполагает выполнение с деталями (сборочными единицами) технологических операций на оборудовании различных производственных линий, то перемещение деталей в пределах цеха должно обеспечиваться специализированной роботизированной транспортной системой.

Роботизированная транспортная система включает набор транспортных роботов, поддерживающих обмен производственными данными по беспроводной сети IoT и предназначенных для доставки деталей (сборочных единиц, готового изделия) со склада готовой продукции или на склад временного хранения, а также для подачи (съемки) деталей (печатных плат) в приемные (выдающие) контейнеры производственных автоматов, выполняющих технологические операции.

Таким образом, транспортные роботы могут быть внутрицеховыми (перемещающими детали в пределах производственных линий и системы шкафов внутрицехового хранения изделий) и межцеховыми, предназначенными для перемещения изделий в соответствии с технологическим маршрутом в пределах всего производственного комплекса предприятия Индустрии 4.0.

квантно реальному устройству описывает принцип и характеристики его работы и размещается в облаке (уровень сервисов IoT). Наличие цифрового двойника оборудования на уровне физических устройств позволяет осуществлять дополнительный контроль качества выполнения производственных операций, а на киберуровне позволяет проводить имитационное моделирование процессов изготовления изделия приборостроения на этапах, когда цифровой завод еще только проектируется или разрабатываются технологические маршруты изготовления изделия нового типа, планируемого к постановке на производство на предприятии.

Привод технологического оборудования выполняет заданную производственную операцию (например, установка компонентов поверхностного монтажа на печатные платы) в рабочей камере технологического процесса. Контроль выполнения технологических операций осуществляется в автоматическом режиме при помощи сенсорной системы на основе датчика состояния выполнения производственных процессов. В зарубежной литературе такой подход к организации процессов сбора производственных данных принято называть «технологиями сенсорики» (от англ. sensor – датчик). Как правило, датчики технологических операций – аналоговые датчики, и для передачи измеренных величин, характеризующих состояние технологического процесса, в цифровой контроллер управления требуется выполнение операции аналого-цифрового преобразования этих данных.

Параллельно с выполнением реального технологического процесса на физическом уровне осуществляется вычисление параметров математической модели техпроцесса для цифрового двойника технологического оборудования, который включает подсистему киберпривода, подсистему кибердатчика и киберкамеру, в которой имитируется выполнение реальной технологической операции. Процессы вычисления параметров математической модели технологических процессов реализуются на киберуровне. Результаты вычислений через контроллер IoT также передаются в контроллер управления технологического оборудования. Таким образом, алгоритму работы производственного автомата, реализованному в виде программного обеспечения киберфизической системы, доступны:

- значения, выданные на привод технологического оборудования для выполнения технологической операции;
- измеренные значения, соответствующие состоянию выполнения технологической операции в рабочей камере;
- оцененные (ожидаемые) значения результата выполнения технологической операции, полученные в процессе расчета математической модели, адекватно реальному технологическому процессу описывающей производственную операцию.

По результатам сравнения измеренных в физическом мире и оцененных в кибермире значений контроллер управления киберфизической системы принимает решение о соответствии выполняемой технологической операции заданному алгоритму. При минимизации кванта времени, характеризующего дискретность частоты опроса сенсорной системы, представляется возможным организовать на производстве Индустрии 4.0 «реальное время» для контура выполнения технологических операций в рабочих камерах киберфизических систем.

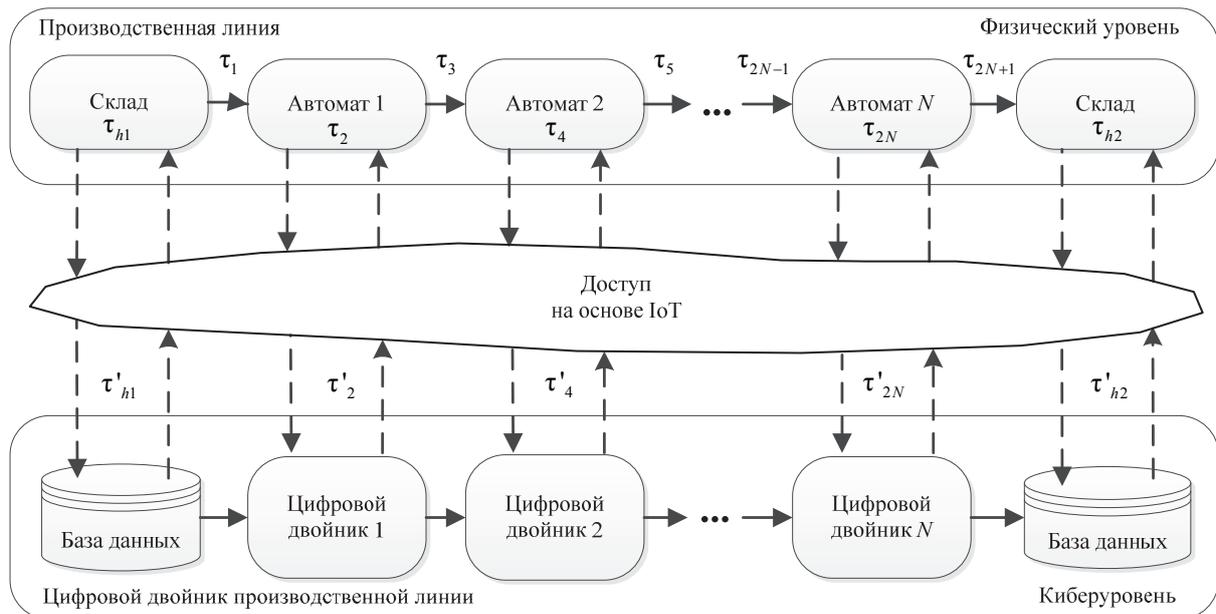


Рис. 4. Схема производственной линии предприятия Индустрии 4.0 с параметризованными временными оценками технологических операций в киберфизических системах

Компоненты производственной линии предприятия Индустрии 4.0 типа «умная фабрика» на физическом уровне и соответствующие им компоненты на киберуровне с параметризованными временными оценками выполнения технологических операций представлены на рис. 4, где τ_i – время выполнения технологической операции на производственном оборудовании цифрового завода; τ'_i – время (случайная величина) в протоколе IoT с гарантированной доставкой пакетов на киберуровне при выполнении алгоритмов в цифровых двойниках технологического оборудования.

Реализация системы складского учета и хранения на физическом уровне представлена на рис. 4 на киберуровне условно базой данных. Времена τ_i с четными значениями индексов соответствуют технологическим операциям, выполняемым в рабочих камерах производственных автоматов. Времена τ_i с нечетными значениями индексов соответствуют производственным операциям перемещения изделий, выполняемым транспортными роботами.

Анализ рис. 3 и рис. 4 показывает, что киберфизическая система на производстве Индустрии 4.0 представляет собой замкнутую цифровую систему автоматического управления со случайным запаздыванием [13, 14], где время запаздывания определяется характеристиками протокола IoT с гарантированной доставкой пакетов, поддерживающего облачные технологии, и временем выполнения алгоритмов в цифровых двойниках технологического оборудования.

Описание производственных процессов на предприятиях Индустрии 4.0 на основе онтологий

Схема формирования описания производственных процессов на основе онтологий на предприятиях Индустрии 4.0 типа «умная фабрика» приведена на рис. 5. Исходными данными для получения «цифрового двойника» предприятия и цифровых моделей технологических процессов являются:

- на физическом уровне – задействованные в технологическом процессе киберфизические системы (технологическое оборудование); технологическая документация, определяющая маршрут изготовления изделия (технологические карты, описания технологических процессов изготовления изделия и их последовательность выполнения);
- на уровне математических абстракций – онтологии предметной области цифрового производства на предприятиях Индустрии 4.0 типа «умная фабрика» и онтологический словарь;
- на уровне ресурсов – комплекты конструкторской, программной и технологической документации; государственные, межгосударственные, отраслевые и международные стандарты, а также руководящие документы и методические указания (МУ), на основе которых подготавливаются специальные методики испытаний для контроля качества изготавливаемой на производственном предприятии продукции.

Уровень цифровых моделей на производстве Индустрии 4.0 представлен совокупностью:

- цифровых двойников технологического оборудования;
- цифровых моделей операций технологического процесса изготовления изделий;
- цифровых моделей изготавливаемого изделия и его составных частей (входят в состав конструкторской (КД), программной (ПД) и технологической (ТД) документации);
- цифровых моделей внешних воздействующих факторов, необходимых для проведения виртуальных испытаний цифровой модели изделия с использованием технологий имитационного моделирования.

Онтология [15] в общем случае представляет собой спецификацию (детальное описание), используемую для формального и декларативного определения какой-либо области знаний, содержащую терминологический словарь этой области знаний и перечень терминологических связей, основанных на принципах математической логики, описывающих отношения терминов на уровне «часть–целое». Составными частями онтологии являются глоссарии (перечень терминов и их академических определений), тезаурусы (определяют семантическую связь между различными терминами) и пр.

Онтология – это один из способов структурирования терминов (понятий) в заданной предметной области. Характерной особенностью онтологического словаря, отличающей его от обычного, является логическая структурированность используемого терминологического аппарата при сохранении внутреннего единства словаря.

Зачастую, онтологии представляют в виде древовидной структуры классов или в формате программно реализованной базы данных, т.е. системы терминов, описывающих классы (термины, понятия), экземпляры классов (конкретные представители терминов), отношения и свойства классов и экземпляров. Существуют специальные языки программирования и форматы представления различных структур данных, используемые для описания онтологий: XML-формат; RDF (Resource Description Framework); OWL (Web Ontology Language); Cycl, Ontolingua и др.

Подход к описанию предметной области знаний на основе онтологий представляет собой форму человеко-машинного интерфейса, в которой термины онтологического словаря могут одновременно использоваться как разработчиком, так и автоматизированной системой в процессе машинной обработки

данных. Такой эффект достигается за счет представления терминов в онтологии на основе формальной семантики языка, доступной для компьютерной обработки и воспринимаемой человеком. Таким образом, онтологии выступают посредником между физическим миром автоматизированных систем и виртуальным миром технологий обработки информации.

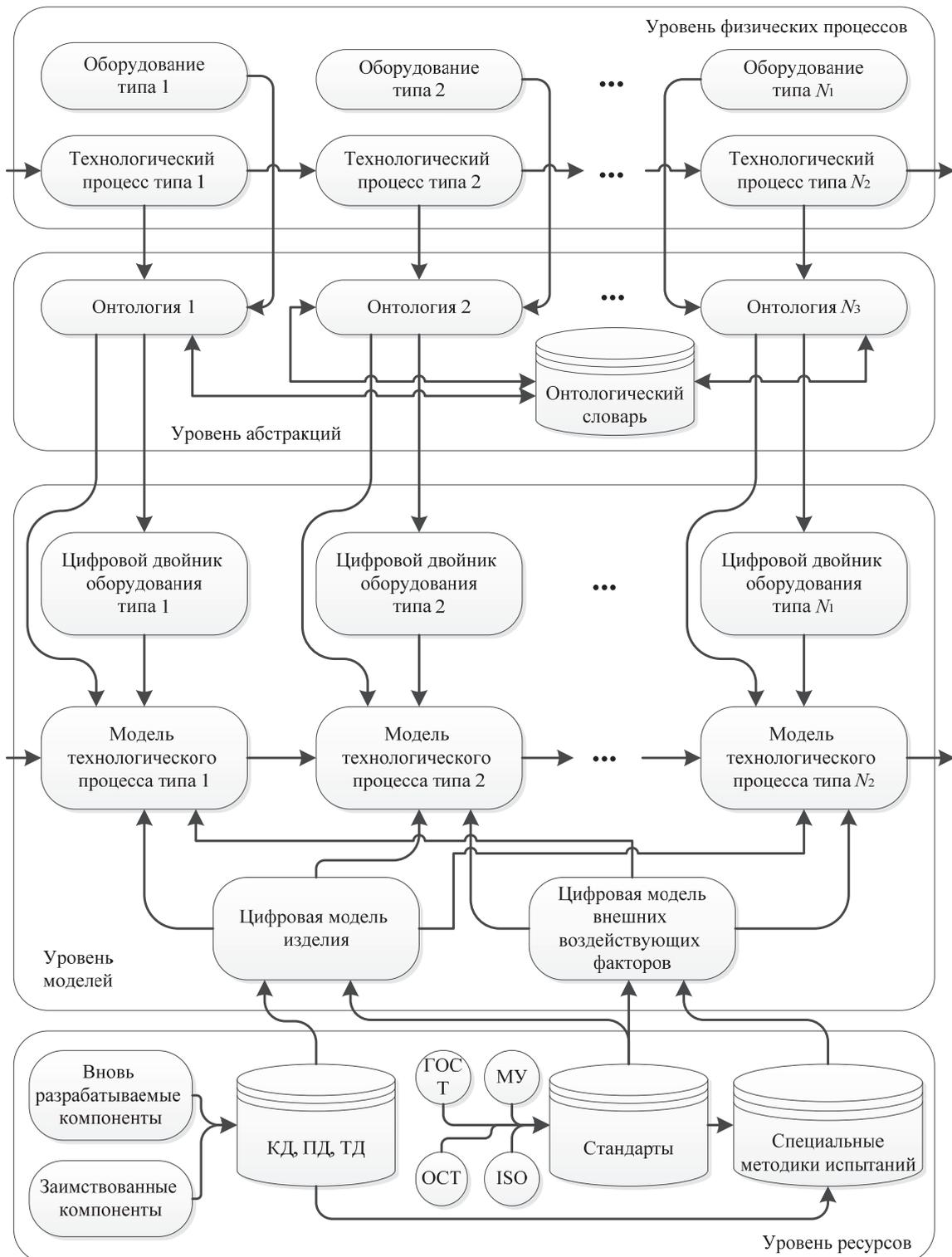


Рис. 5. Схема формирования описания производственных процессов на основе онтологий на предприятиях Индустрии 4.0 типа «умная фабрика»

В приложении к предметной области Индустрии 4.0 представителями физического мира автоматизированных систем выступают киберфизические системы, установленные на производственных предприятиях-

ях типа «умная фабрика», а представителями виртуального мира технологий обработки информации выступают облачные технологии и технологии промышленного Интернета вещей на уровне сервисов.

Центральное место в онтологии занимают классы (наборы объектов, коллекции и пр.), которые определяют основные понятия рассматриваемой предметной области. В части производственных предприятий Индустрии 4.0 целесообразно рассматривать два вида классов для онтологий:

- классы, соответствующие обобщенным понятиям на уровне кибермира;
- классы, соответствующие реальным объектам в физическом мире;

Классы, соответствующие обобщенным понятиям (абстрактные классы), определяют термины для описания процессов обработки информации на уровне абстракций с целью доступа пользователя (персонала завода, программного агента цифровой системы управления предприятием и пр.) к классам, соответствующим реальным объектам. Классы, соответствующие реальным объектам, определяют термины, необходимые для определения конкретных объектов (процессов) реального мира (экземпляров технологического оборудования, технологических операций и пр.) в автоматизированных системах производства Индустрии 4.0.

В этой связи онтология может быть представлена на уровне формальной модели упорядоченной совокупности множеств конечной размерности: термины, отношения между терминами (на уровне «часть-целое»), функции интерпретации терминов и отношений.

Функция интерпретации, заданная для каждого термина, позволяет поставить в соответствие семантику языка, воспринимаемую человеком, и семантику языка, пригодную для машинной обработки данных (например, с использованием терминологического аппарата баз данных). Таким образом, интерпретирующая функция транслирует термины классов онтологии в машинные запросы пользователя (персонала завода, программного агента цифровой системы управления предприятием и пр.) к базе данных, что может быть реализовано программным способом на уровне абстракций, как показано на рис. 5.

Заключение

Решение задачи совершенствования существующих отечественных производственных мощностей предприятий Индустрии 3.0 в рамках программы модернизации производства должно также включать пересмотр:

- роли компонентов основной и вспомогательной инфраструктур производства, в частности, роли технологического оборудования, которое в парадигме Индустрии 4.0 становится активным интернет-агентом (киберфизической системой), осуществляющим информационный обмен с компьютеризированной системой управления производством;
- роли сотрудников на предприятии, реализующих в организациях Индустрии 3.0 основные производственные функции по изготовлению изделий, так как для предприятий Индустрии 4.0, ориентированных на «безлюдное» производство, роль персонала будет ориентирована на функции обслуживания киберфизических систем. Таким образом, из компонента основной производственной системы Индустрии 3.0 сотрудники предприятия будут переведены в компонент вспомогательной системы производства Индустрии 4.0.

Литература

1. Schwab K. *The Fourth Industrial Revolution*. NY: Crown Business, 2017. 192 p.
2. Lee E.A. The past, present and future of cyber-physical systems: a focus on models // *Sensors*. 2015. V. 15. N 3. P. 4837–4869. doi: 10.3390/s150304837
3. Meissner H., Ilse R., Aurich J.C. Analysis of control architectures in the context of Industry 4.0 // *Procedia CIRP*. 2017. V. 62. P. 165–169. doi: 10.1016/j.procir.2016.06.113
4. Balasubramanian S., Srinivasan S., Buonopane F., Subathra B., Vain J., Ramaswamy S. Design and verification of cyber-physical systems using TrueTime, evolutionary optimization and UPPAAL // *Microprocessors and Microsystems*. 2016. V. 42. P. 37–48. doi: 10.1016/j.micpro.2015.12.006
5. Fang Zh., Mo H., Wang Y., Xie M. Performance and reliability improvement of cyber-physical systems subject to degraded communication networks through robust optimization // *Computers and Industrial Engineering*. 2017. V. 144. P. 166–174. doi: 10.1016/j.cie.2017.09.047
6. Hwang G., Lee J., Park J., Chang T.-W. Developing performance measurement system for Internet of Things and smart factory environment // *International Journal of Production Research*. 2017. V. 55. N 9. P. 2590–2602. doi: 10.1080/00207543.2016.1245883
7. Lee K.H., Hong J.H., Kim T.G. System of systems approach to formal modeling of CPS for simulation-based analysis // *ETRI*

References

1. Schwab K. *The Fourth Industrial Revolution*. NY, Crown Business, 2017, 192 p.
2. Lee E.A. The past, present and future of cyber-physical systems: a focus on models. *Sensors*, 2015, vol. 15, no. 3, pp. 4837–4869. doi: 10.3390/s150304837
3. Meissner H., Ilse R., Aurich J.C. Analysis of control architectures in the context of Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 2017, vol. 62, pp. 165–169. doi: 10.1016/j.procir.2016.06.113
4. Balasubramanian S., Srinivasan S., Buonopane F., Subathra B., Vain J., Ramaswamy S. Design and verification of cyber-physical systems using TrueTime, evolutionary optimization and UPPAAL. *Microprocessors and Microsystems*, 2016, vol. 42, pp. 37–48. doi: 10.1016/j.micpro.2015.12.006
5. Fang Zh., Mo H., Wang Y., Xie M. Performance and reliability improvement of cyber-physical systems subject to degraded communication networks through robust optimization. *Computers and Industrial Engineering*, 2017, vol. 144, pp. 166–174. doi: 10.1016/j.cie.2017.09.047
6. Hwang G., Lee J., Park J., Chang T.-W. Developing performance measurement system for Internet of Things and smart factory environment. *International Journal of Production Research*, 2017, vol. 55, no. 9, pp. 2590–2602. doi: 10.1080/00207543.2016.1245883
7. Lee K.H., Hong J.H., Kim T.G. System of systems approach to formal modeling of CPS for simulation-based analysis. *ETRI*

- Journal, 2015, V. 37, N 1, P. 175–185. doi: 10.4218/etrij.15.0114.0863
8. Ning H., Liu H., Ma J., Yang L.T., Huang R. Cybermatics: cyber-physical-social-thinking hyperspace based science and technology // *Future Generation Computer Systems*, 2016, V. 56, P. 504–522. doi: 10.1016/j.future.2015.07.012
 9. Qu T., Thurer M., Wang J., Wang Z., Fu H., Li C. System dynamics analysis for an Internet-of-Things-enabled production logistics system // *International Journal of Production Research*, 2017, V. 55, N 9, P. 2622–2649. doi: 10.1080/00207543.2016.1173738
 10. Vogel-Heuser B., Rosch S., Fischer J., Simon Th., Ulewicz S., Folmer J. Fault handling in PLC-based Industry 4.0 automated production systems as a basis for restart and self-configuration and its evaluation // *Journal of Software Engineering and Applications*, 2016, V. 9, N 1, P. 1–43. doi: 10.4236/jsea.2016.91001
 11. Wang L., Haghighi A. Combined strength of holons, agents and function blocks in cyber-physical systems // *Journal of Manufacturing Systems*, 2016, V. 40, P. 25–34. doi: 10.1016/j.jmsy.2016.05.002
 12. Zuehlke D. SmartFactory – towards a factory-of-things // *Annual Reviews in Control*, 2010, V. 34, N 1, P. 129–138. doi: 10.1016/j.arcontrol.2010.02.008
 13. Zhou P., Zuo D., Hou K.-M., Zhang Zh. A decentralized compositional decision process in self-managed cyber physical systems // *Sensors*, 2017, V. 17, N 11, Art. 2580. doi: 10.3390/s17112580
 14. Zhahg Zh., Eyisi E., Koutsonkos X., Porter J., Karsai G., Sztipanovits J. A co-simulation framework for design of time-triggered automotive cyber physical systems // *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2014, V. 43, P. 16–33. doi: 10.1016/j.simpat.2014.01.001
 15. Liao Y., Deschamps S., Loures E.F.R., Ramos L.F.P. Past, present and future of Industry 4.0 – a systematic literature review and research agenda proposal // *International Journal of Production Research*, 2017, V. 55, N 12, P. 3609–3629. doi: 10.1080/00207543.2017.1308576
- Journal*, 2015, vol. 37, no. 1, pp. 175–185. doi: 10.4218/etrij.15.0114.0863
8. Ning H., Liu H., Ma J., Yang L.T., Huang R. Cybermatics: cyber-physical-social-thinking hyperspace based science and technology. *Future Generation Computer Systems*, 2016, vol. 56, pp. 504–522. doi: 10.1016/j.future.2015.07.012
 9. Qu T., Thurer M., Wang J., Wang Z., Fu H., Li C. System dynamics analysis for an Internet-of-Things-enabled production logistics system. *International Journal of Production Research*, 2017, vol. 55, no. 9, pp. 2622–2649. doi: 10.1080/00207543.2016.1173738
 10. Vogel-Heuser B., Rosch S., Fischer J., Simon Th., Ulewicz S., Folmer J. Fault handling in PLC-based Industry 4.0 automated production systems as a basis for restart and self-configuration and its evaluation. *Journal of Software Engineering and Applications*, 2016, vol. 9, no. 1, pp. 1–43. doi: 10.4236/jsea.2016.91001
 11. Wang L., Haghighi A. Combined strength of holons, agents and function blocks in cyber-physical systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 2016, vol. 40, pp. 25–34. doi: 10.1016/j.jmsy.2016.05.002
 12. Zuehlke D. SmartFactory – towards a factory-of-things. *Annual Reviews in Control*, 2010, vol. 34, no. 1, pp. 129–138. doi: 10.1016/j.arcontrol.2010.02.008
 13. Zhou P., Zuo D., Hou K.-M., Zhang Zh. A decentralized compositional decision process in self-managed cyber physical systems. *Sensors*, 2017, vol. 17, no. 11, art. 2580. doi: 10.3390/s17112580
 14. Zhahg Zh., Eyisi E., Koutsonkos X., Porter J., Karsai G., Sztipanovits J. A co-simulation framework for design of time-triggered automotive cyber physical systems. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2014, vol. 43, pp. 16–33. doi: 10.1016/j.simpat.2014.01.001
 15. Liao Y., Deschamps S., Loures E.F.R., Ramos L.F.P. Past, present and future of Industry 4.0 – a systematic literature review and research agenda proposal. *International Journal of Production Research*, 2017, vol. 55, no. 12, pp. 3609–3629. doi: 10.1080/00207543.2017.1308576

Авторы

Гурьянов Андрей Владимирович – кандидат экономических наук, генеральный директор, АО «ОКБ «Электроавтоматика», Санкт-Петербург, 198095, Российская Федерация, Scopus ID: 57192234016, ORCID ID: 0000-0003-0858-6619, postmaster@elavt.spb.ru

Заколдаев Данил Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, декан, заведующий кафедрой, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57021875400, ORCID ID: 0000-0002-2520-1998, d.zakoldaev@mail.ru

Шукалов Анатолий Владимирович – кандидат технических наук, доцент, первый заместитель генерального директора – главный конструктор, АО «ОКБ «Электроавтоматика», Санкт-Петербург, 198095, Российская Федерация; доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; Scopus ID: 55982925200, ORCID ID: 0000-0003-0283-5207, aviation78@mail.ru

Жаринов Игорь Олегович – доктор технических наук, профессор, руководитель учебно-научного центра, АО «ОКБ «Электроавтоматика», Санкт-Петербург, 198095, Российская Федерация; заведующий кафедрой, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 56607228500, ORCID ID: 0000-0003-2508-5939, igor_rabota@pisem.net

Костишин Максим Олегович – кандидат технических наук, начальник сектора, АО «ОКБ «Электроавтоматика», Санкт-Петербург, 198095, Российская Федерация; доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 56826192300, ORCID ID: 0000-0001-9148-2866, maksim@kostishin.com

Authors

Andrey V. Gurjanov – PhD, CEO, Stock Company "Experimental Design Bureau "Electroavtomatika" named after P.A. Yefimov", Saint Petersburg, 198095, Russian Federation, Scopus ID: 57192234016, ORCID ID: 0000-0003-0858-6619, postmaster@elavt.spb.ru

Danil A. Zakoldaev – PhD, Associate Professor, Dean, Head of Chair, ITMO University, Saint Petersburg, Russian Federation, Scopus ID: 57021875400, ORCID ID: 0000-0002-2520-1998, d.zakoldaev@mail.ru

Anatoly V. Shukalov – PhD, Associate Professor, First Deputy General Director-Chief Design Manager, Stock Company "Experimental Design Bureau "Electroavtomatika" named after P.A. Yefimov", Saint Petersburg, 198095, Russian Federation; Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; Scopus ID: 55982925200, ORCID ID: 0000-0003-0283-5207, aviation78@mail.ru

Igor O. Zharinov – D.Sc., Professor, Head of learning-scientific center, Stock Company "Experimental Design Bureau "Electroavtomatika" named after P.A. Yefimov", Saint Petersburg, 198095, Russian Federation; Head of Chair, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 56607228500, ORCID ID: 0000-0003-2508-5939, igor_rabota@pisem.net

Maksim O. Kostishin – PhD, Sector Head, Stock Company "Experimental Design Bureau "Electroavtomatika" named after P.A. Yefimov", Saint Petersburg, 198095, Russian Federation; Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, Russian Federation, Scopus ID: 56826192300, ORCID ID: 0000-0001-9148-2866, maksim@kostishin.com