

РОЛЬ И ЗАДАЧИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ЭТАПЕ ПЕРЕХОДА ОТ ЦИФРОВОГО ПРОИЗВОДСТВА К «УМНЫМ ФАБРИКАМ»

Г. Е. Абаев, Н. А. Демкович, Е.И. Яблочников (Санкт-Петербург)

В условиях достигнутого уровня научно-технического прогресса, а также в связи с его постоянным ускорением, спровоцированным практическим подтверждением закона Мура в действии (с определенным допуском) [1] и, как следствие, постоянным развитием информационных технологий и ускорением их диффузии [2] остро стоит вопрос о создании новых моделей производств будущего, так называемых “умных фабрик”, основой для которых являются “цифровые фабрики”, поскольку дальнейшая реализация подобных организационных моделей в повсеместной промышленной практике зависит от уровня внедрения цифровых технологий в реальные процессы производства.

Термин “цифровое производство (Digital Manufacturing)” на протяжении длительного периода времени применялся в области конструкторско - технологической подготовки производства (КТПП), входил в концепцию PLM и включал в себя такие классы компьютерных систем, как CAD/CAM (Computer Aided Design/Manufacturing), CAE (Computer Aided Engineering), CAPP (Computer Aided Process Planning), системы программирования промышленных роботов, системы имитационного моделирования технологических процессов (ТП) и системы оценки и обеспечения эргономичности процессов производства и обслуживания изделия.

Однако, исходя из общих тенденций развития производственных технологий, можно утверждать, что термин “цифровое производство” расширился из области ТПП на область непосредственно самих процессов производства в цехе. Одной из первых масштабных научно-технических программ, касающихся области производства, стала немецкая Industry 4.0. Программа оказалась настолько актуальной, что практически сразу была подхвачена ведущими промышленными странами во всём Мире. В то же время, в России положения по “новому технологическому укладу” [4] были сформулированы в Национальной технологической инициативе.

Ключевыми технологиями, предоставляющими возможность такого перехода:

- IOT (Internet Of Things) – развитие промышленного Интернета, позволяющего организовывать производственные сети, объединяющие оборудование (M2M – Machine to Machine) и людей (M2H- Machine to Human).

- Big Data+B.I. (Business Intelligence) – техническая возможность собирать, хранить и обрабатывать большие объемы данных, поступающие в режиме реального времени с промышленного оборудования: сигналы с датчиков, программируемых логических контроллеров (PLC), сенсорных мониторов HMI (Human Machine Interface) и других цифровых устройств ввода/вывода в промышленных цехах.

- Развитие области АСУ ТП: SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition), DCS (Distributed Control System) и MES/MOM (Manufacturing Execution System / Manufacturing Operation Management). Данный класс систем известен с 80-х и 90-х годов XX века [5] как программно-аппаратный комплекс, предназначенный для сбора данных (SCADA) и управления производственными процессами (MES). Полный перечень функций данных систем и многоуровневая модель их взаимодействия с производственными информационными системами определены в [6]. Современный виток развития обозначенных систем вызван достижениями в информационных технологиях, в том числе описанных выше: промышленного Интернета и больших объемов данных.

- Постоянное увеличение количества мехатронных устройств и доли программной составляющей в каждом отдельно взятом устройстве.

• Глубокая системная интеграция – понимается не только создание новых изделий, таких как беспилотный транспорт или мобильные промышленные роботы, представляющие собой “систему систем” (Systems of Systems), но и новых организационных и социальных структур. Примером подобной системы систем является “умный город”, которой объединяет в себе умную транспортную инфраструктуру, умную энергетику, умное производство, которые, в свою очередь, включают более простые системы). В случае умного производства, такими примерами могут быть гибкие производственные ячейки, организованные согласно принципам модульности, оснащенные сетевой инфраструктурой, мобильными роботами и кибер-физическими промышленными системами.

• ICPS (Industrial Cyber-Physical Systems) – “промышленные кибер-физические системы - сеть взаимодействующих физических и вычислительных (информационных) компонентов, проектируемая как единая система, организованная в рамках единой базовой модели и адаптирующаяся к изменениям реального мира.” [7]

• Augmented Reality (AR) – дополненная (смешенная) реальность + Virtual Reality (VR) – виртуальная реальность – технологии, позволяющие с использованием устройств визуализации (очки AR/VR, мобильные планшеты и смартфоны) дополнять реальные производственные объекты информацией, поступающей из SCADA и DCS систем для контроля за ключевыми параметрами работы оборудования и обеспечения непрерывности процесса производства, а также организовывать доступ к документации не отвлекаясь от рабочего процесса, визуализировать рабочие инструкции по сборке, монтажу или обслуживанию непосредственно на объектах производства.

• SOA (Service-Oriented Architecture) – “миллионы устройств взаимосвязаны для предоставления и потребления информации через сеть и могут создавать возможные взаимодействия для достижения общих целей. Поскольку эти устройства должны быть одновременно как на кибер-, так и на физическом уровне, то сервис-ориентированный подход кажется многообещающим решением, т.е. каждое устройство должно предлагать свою функциональность как стандартный сервис и в то же время параллельно обнаруживать и вызывать по требованию функциональность других устройств. Эти технологии могут быть использованы для построения передовых функциональных возможностей в смарт-кибер-физических системах, что позволяет создавать специальные новые парадигмы распределенного приложения на основе взаимосвязанных “умных” компонентов с высоким уровнем автономии” [8].

Рассмотрим основные концепции организации производственных систем будущего согласно [9] [10], а также определение роли и задач, которые стоят перед инструментами имитационного моделирования на этапах:

- цифровой подготовки производства¹;
- цифрового производства;
- умного производства.

Цифровая подготовка производства

Стоит отметить, что несмотря на неразрывную связь этапов конструкторской и технологической подготовки производства (ТПП) в данной работе упоминание систем класса САД и САЕ связано именно со стадией ТПП. Применение данного класса систем необходимо для проектирования технологического оборудования и оснастки, а также анализа физических процессов, происходящих в процессе производства [11]. Примером подобного анализа может служить САЕ-анализ процесса литья полимеров с использованием термопластавтомата (ТПА).

¹ термин введён в силу описанных выше изменений в области применения термина “Цифровое производство”.

Рассмотрим инструменты имитационного моделирования производственных процессов в составе программного комплекса DELMIA 3DEXPERIENCE на примере модели роботизированного участка ТПА. Общий вид модели представлен на рис. 1.

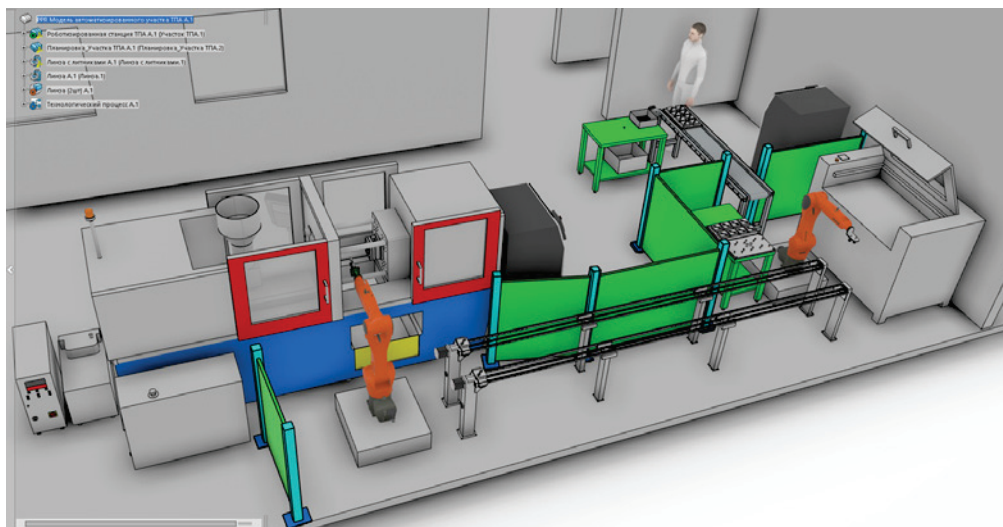


Рис. 1. Цифровая модель автоматизированного участка ТПА

Цифровая модель включает в себя следующие элементы:

- модель отливки изделия (линза);
- модель ТПА;
- модели 2-х промышленных роботов KUKA KR-10;
- модели 2-х систем линейного перемещения;
- модель лазерного резака;
- модель конвейера;
- модель станции упаковки готовых изделий (с виртуальным манекеном);
- модели вспомогательной оснастки.

На первом этапе имитационного моделирования в приложении DELMIA Robot Simulation были определены виртуальные контроллеры для каждого исполнительного устройства, представленного на 3d-модели участка (позиционер определён в качестве 7-й оси робота), установлена связь между виртуальными контроллерами на уровне входных и выходных сигналов, посылаемых между устройствами и обеспечивающих совместное взаимодействие при выполнении имитационного моделирования общего процесса работы участка.

Далее были смоделированы операции (задачи) для отдельных устройств: литьё полимера в формообразующую оснастку, перемещение отливки на позиционер, перемещение оснастки с отливкой позиционером, перемещение с позиционера в накопительную систему (оснастка), перемещение оснастки на стол лазерного резака, отрезка остаточной литниковой системы от изделия, перемещение роботом оснастки с изделиями с лазерного резака на конвейер и перемещение оснастки по конвейеру на станцию упаковки готовых изделий. Также были смоделированы вспомогательные задачи по перемещению освободившейся (пустой) оснастки для обеспечения относительной непрерывности процесса. При этом в программу каждой задачи вводятся переменные, инициирующие или останавливающие движение исполнительных устройств для обеспечения синхронности и своевременности выполнения задач несколькими устройствами.

В качестве примера подобного взаимодействия можно привести задачу по извлечению отливки из формообразующей детали (ФОД) ТПА: промышленный робот находится в режиме ожидания до тех пор, пока в ТПА происходит процесс литья и остывания полимера, по завершении которого с контроллера ТПА приходит соответствующий сигнал. Новый процесс литья не начинается до поступления сигнала с контроллера робота, означающего, что робот покинул зону рабочих органов ТПА. При этом на уровне модели обеспечивается возможность управления технологическими параметрами (например, временем впрыска полимера и его остывания после размыкания литьевой формы). Значения данных параметров могут быть получены экспериментально или проведением имитационного моделирования процесса литья и остывания ФОД и отливки в САЕ-системе.

Далее была описана общая последовательность задач для полного технологического цикла на 8 отливок. На рис. 2 показан цикл вызова задач на верхнем уровне модели для симуляции производства 2 отливок.

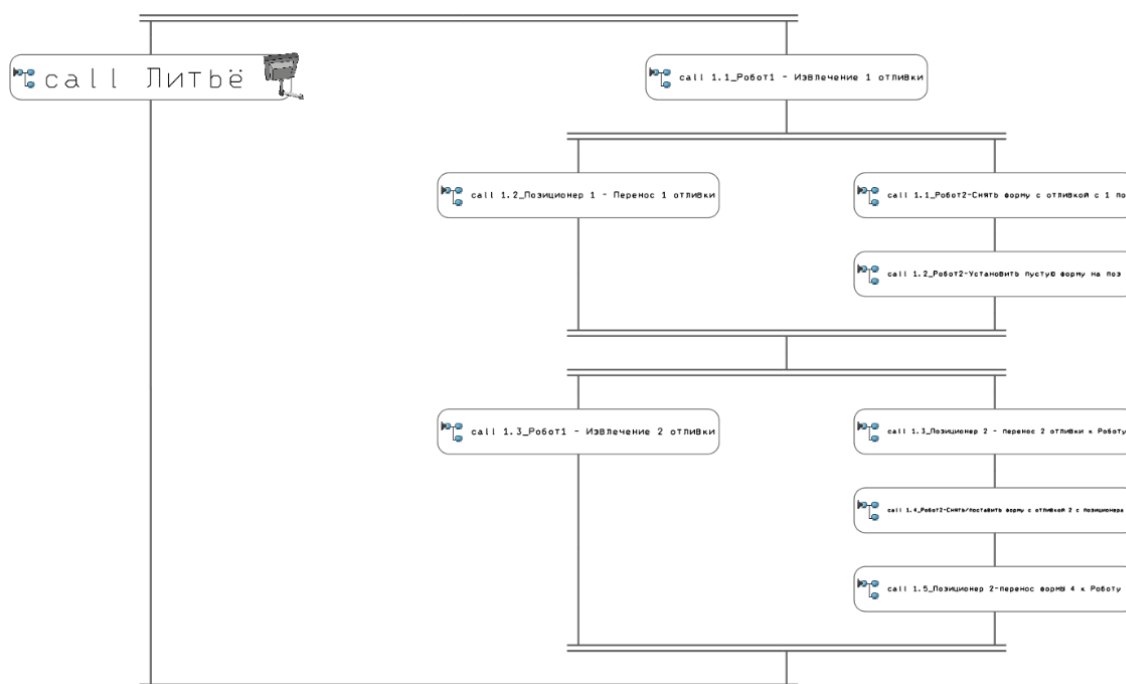


Рис. 2. Цикл задач для производства двух отливок

На втором этапе была построена общая модель маршрутного ТП для расчета производительности роботизированного участка с применением инструментов имитационного моделирования маршрутных ТП системы DELMIA. Временные параметры технологических операций и циклов берутся из детальной симуляции, описанной выше. Модель и результаты моделирования работы участка на протяжении 8 часов показаны на рис. 3.

Таким образом, имитационное моделирование на стадии ТПП сводится к дискретно-событийной парадигме с возможностью учёта результатов детального моделирования отдельных технологических операций (сборка, роботизированные операции, обработка на станках с ЧПУ, задачи для виртуальных манекенов). При этом подобная многоуровневая организация цифровых моделей предоставляет возможность их масштабирования, формирования управляющих программ для реального оборудования в цехе, получение результатов по оценке производительности проектируемой системы для обоснования экономической эффективности решения.

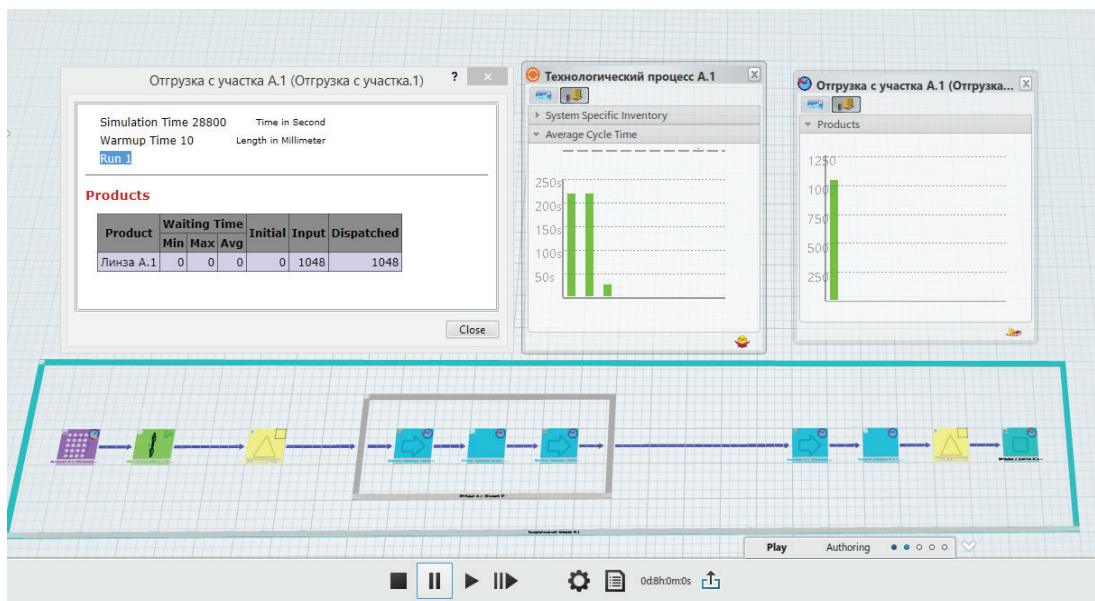


Рис. 3. Имитационная модель и результаты моделирования процесса за 8 часов

Цифровое производство

Технологии, позволившие нам говорить о цифровом производстве “в цехе” уже перечислялись выше, поэтому в данной части обозначаются некоторые промышленные примеры того, что с условным допуском можно также отнести если не к имитационному моделированию, то к его производной:

Вариант 1. Результаты имитационного моделирования ТП на этапе ТПП могут быть внедрены в процессы производства в виде электронных рабочих инструкций на каждую технологическую операцию, подобные инструкции передаются через MES на сенсорные мониторы, установленные в сборочном цехе. При этом рабочий получает всю связанную с выполнением операции техническую документацию на мобильное устройство, после отметки о выполнении операции, информация поступает в отдел планирования и диспетчеризации производства, что позволяет оперативно, в реальном времени, оптимизировать производственные графики [12].

Вариант 2. Создание сценариев под использование очков дополненной реальности, что, например, при сборке электрических шкафов, может увеличить производительность до 34% [2]. При подобном варианте использования информации происходит наложение изображений на реальные объекты. Например, это могут быть принципиальные схемы электрических или гидравлических устройств, интерактивные инструкции по монтажу/демонтажу или техническому обслуживанию различных [13] инженерных систем или 3d-инструкции по сборочным операциям, наложенные непосредственно на реальный объект сборки.

Вариант 3. Цифровой двойник (Digital Twin). Концепция цифрового двойника производственного модуля, ячейки или целой системы позволяет на основе данных, собираемых SCADA-системой с датчиков или PLC, дополнять 3D-модели производственных единиц актуальной информацией об их состоянии в режиме реального времени. В глобальном срезе цифровой двойник является реализацией двусторонней связи между иерархической моделью взаимодействия производственных систем, описанной в ГОСТ Р 62264-2014 или ISA-95, и концепцией PLM (Product Lifecycle Management). Выгоды от подобной информационной модели определяются конкретными задачами.

Один из вариантов применения данной концепции используется для имитационного моделирования поведения физических промышленных контроллеров. Подобный вариант был продемонстрирован компанией Dassault Systemes на выставке Hannover Messe 2017 [14]. От промышленного контроллера Bosch Rexroth осуществляется управление 3d-моделью промышленного оборудования в системе 3DEXPERIENCE. При этом цифровая модель описывается на уровне 3d-моделей, логических структурных схем и функциональной математической моделью на языке Modelica. Все модели связаны между собой и представляют единую цифровую модель производственного оборудования. Связь с физическим (реальным) контроллером также осуществляется через математическую модель этого контроллера, заложенную в систему проектирования, что позволяет отрабатывать функционал промышленного контроллера на виртуальной модели без риска нанесения ущерба реальному оборудованию.

Умное производство

«Производство, оснащенное высокотехнологичным оборудованием: 3D-принтерами, ЧПУ–станками, робототехническими комплексами, датчиками, сенсорами, а также автоматизированными системами управления технологическими процессами и системами оперативного управления производственными процессами на уровне цеха, которые позволяют осуществлять быструю и гибкую («автоматизированную») переналадку оборудования (в т.ч. межмашинное взаимодействие). Такой подход предоставляет возможность радикально повысить производительность, экологичность и энергоэффективность производства как массовой, так и кастомизированной продукции, удовлетворяющей требованиям рынка и потребителей. «умная» фабрика формируется, как правило, на основе цифровой фабрики» [10].

Из этого определения можно выделить следующее отличие от «цифрового производства»: возможность переконфигурирования производственной системы под меняющиеся условия окружающей бизнес-среды в кратчайшие сроки за счёт интеллектуальной составляющей и межмашинного и многоагентного взаимодействия.

Для обеспечения высокой скорости перенастраиваемости производственных систем необходимо реализовать следующие критерии [15]:

- Plug in / Plug out – единство коммутационных интерфейсов и протоколов передачи данных. Принцип модульности.
- Plug and produce – технология, предназначенная для быстрого определения и конфигурирования устройств в общей производственной сети на уровне Web-сервисов, поставляемых устройствами (агентами) в общую интеллектуальную среду взаимодействия на уровне сервисов и запросов. Принцип системной интеграции.
- Период перенастройки системы составляет 1–2 недели.

Подобные системы в области производства получили название промышленных кибер-физических систем. «Кибер-физические системы интегрируют в себе кибернетическое начало, компьютерные аппаратные и программные технологии, качественно новые исполнительные механизмы, встроенные в окружающую их среду и способные воспринимать её изменения, реагировать на них, самообучаться и адаптироваться. Ключевой в CPS является модель, используемая в системе управления, – от того, как она соотносится с реальностью, зависит работоспособность кибер-физической системы» [17].

Интересный подход к имитационному моделированию в области кибер-физических систем продемонстрирован в [18] и [19]. Несмотря на то, что в представленных примерах CPS не являются промышленными объектами, большой интерес представляет модель взаимодействия физической и кибер- составляющих, а также задачи, на решение которых были направлены данные прототипы:

- В [18] на основе технологии “цифровой двойник”, реализованной инструментами платформы 3DEXPERIENCE для системного проектирования, спроектирована трёхмерная модель робота типа “Humanoid”, инструментами CATIA Dymola (объектно-ориентированный, декларативный, мультидоменный язык моделирования Modelica для компонентно-ориентированного моделирования сложных систем [20]) реализована связь с реальным роботом. В результате получилась модель цифрового двойника, воздействие на которую возможно как с уровня физического объекта (цифровой двойник повторяет движения реального робота и записывает их в цифровом окружении), так и с уровня цифрового (моделирование движений робота в виртуальной среде). При таком подходе в первую очередь решаются задачи обучения кибер-физических систем и реализации функций удаленного управления и контроля.

- В примере [19] организована подобная примеру [18] модель с аналогичными объектами (робот-гуманоид и его цифровой двойник) и теми же инструментальными средствами. Однако в глобальную модель добавлена окружающая среда в виде комнаты и конкретная задача по взаимодействию с этой средой: разблокировка двери на кодовом замке. При этом положение циферблата и его внешний вид могут меняться, а комбинация цифр, необходимая для разблокировки замка, задаётся человеком через мобильное приложение и может меняться по его желанию в любой момент времени.

Стоит отметить в данных проектах большую долю математического моделирования объектов, позволяющую соединить реальные и цифровые объекты без использования систем SCADA и DCS, тем самым повысив гибкость и приспособляемость кибер-физической системы. При этом, библиотеки языка Modelica позволяют имитировать поведение информационных потоков в системе с учетом цифровых задержек, паразитных шумов и других нежелательных явлений, присущих неидеальным системам [21]. Результаты работ [18] и [19] с цифровыми моделями, техническим описанием и логистикой проектов представлены в открытом доступе на веб-сайте URL: <https://academy.3ds.com/en/visit-our-lab>.

Выводы

Влияние информационных технологий оказывает ключевое воздействие на развитие производственной отрасли. Для реализации парадигмы “умного производства” необходим высокий уровень цифровизации производственных процессов, возможность контролировать и использовать информацию как на операционном, так и на информационном уровнях функциональной модели, описанной в ГОСТ Р 62264-2014 / ISA-95. Данная информация служит для организации сервис-ориентированной архитектуры взаимодействия промышленных кибер-физических систем, что является актуальной задачей.

Для организации промышленных кибер-физических систем предлагается использовать методику, применяющуюся на этапе цифровой подготовки производства (проектирование производственных моделей) и усиленную математическими инструментами и системным подходом к проектированию (проектирование информационной составляющей). Применение технологии “цифровой двойник” для решения задач проектирования и обучения ICPS актуально.

Применение и развитие систем имитационного моделирования в новых производственных парадигмах актуально. Особое значение уделяется вопросам решения задач имитационного моделирования программной (адаптивной, “умной”) составляющей CPS, в том числе и многоагентных самоорганизующихся систем.

Литература

1. More Moore White Paper, International Roadmap for Devices and Systems, IEEE, 2016 [Электронный ресурс] // Институт инженеров электротехники и электроники IEEE: [сайт]. URL: https://irds.ieee.org/images/files/pdf/2016_MM.pdf (дата обращения: 19.09.2017г.).
2. **Биленко П.Н.** Жизнь в форме J: риски и возможности ускорения диффузии технологий. 24.05.2017 [Электронный ресурс] // Forbes: [сайт]. URL: <http://www.forbes.ru/tehnologii/344377-zhizn-v-forme-j-riski-i-vozmozhnosti-uskoreniya-diffuzii-tehnologii>. (Дата обращения: 19.09.2017г.).
3. **Добрынин А.П., Черных К.Ю., Куприяновский В.П., Куприяновский П.В., Свиягов С.А.** Цифровая экономика – различные пути к эффективному применению технологий (BIM, PLM, CAD, IOT, Smart City, BIG DATA и другие) // International Journal of Open Information Technologies. 2016. Т.4, №1. С.4–11.
4. Послание Президента РФ В.В. Путина Федеральному Собранию РФ от 4.12.2014.
5. SCADA // Википедия. [2017—2017]. Дата обновления: 14.08.2017. URL: <http://ru.wikipedia.org/?oldid=87064230> (дата обращения 21.09.2017).
6. ГОСТ Р 62264-1-2014. Национальный стандарт Российской Федерации. Интеграция систем управления предприятием. Введен Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии. Разработан на основе перевода на русский язык международного стандарта МЭК 62264-1:2013 “Интеграция систем управления предприятием. Часть 1. Модели и терминология” (IEC 62264-1:2003 “Enterprise-control system integration - Part 1: Models and terminology”). 2014.68 с.
7. **Яблочников Е.И.** “Цифровые и интеллектуальные производства в приборостроении” // XLVI научная и учебно-методическая конференция Университета ИТМО. 31 января – 3 февраля 2017г. Программа. – СПб.: Университет ИТМО, 2017. С.19.
8. **Colombo A., Bangemann Th., Karnouskos S., и др.** Industrial Cloud-Based Cyber-Physical Systems. The IMC-AESOP Approach // Springer Science & Business Media, 2014
9. **Левенцов В.А., А.Е. Радаев, Н.Н. Николаевский** Аспекты концепции «Индустрия 4.0» в части проектирования производственных процессов [Электронный ресурс] // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Сер.: Экономические науки. 2017. Т. 10. № 1. URL: <http://elib.spbstu.ru/dl/2/j17-243.pdf> (дата обращения: 22.09.2017).
10. План мероприятий («дорожная карта») «Технет» (передовые производственные технологии) Национальной технологической инициативы. Обосновывающие материалы (выдержки). 16.06.2016 [Электронный ресурс] // сайт НТИ. URL: <http://www.nti2035.ru/technology/technet> (дата обращения: 22.09.2017).
11. **Яблочников Е.И., Фомина Ю.Н., Саломатина А.А.** Компьютерные технологии в жизненном цикле изделия. Учебное пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2010.
12. Alstom Transport Works With Dassault Systèmes to Improve Industrial Operations Performance [Электронный ресурс] // Сайт MES-система Apriso. URL: http://www.aprison.com/library/video/alstom_success_story_en.php (дата обращения 22.09.2017).
13. **Vogt W.** A new way to make machinery. A complex manufacturing environment opens the door to interesting new tech at Agco: informed reality. 19.04.2017 // [Электронный ресурс] Farm Industry News – URL: www.farmindustrynews.com/internet-things/new-way-make-machinery (дата обращения: 22.09.2017).
14. Bosch Rexroth: Wie der Digitale Zwilling Zeit spart [Электронный ресурс] // Youtube. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=FGUSSOjetUM> (дата обращения 22.09.2017).

15. **Colombo A.** General Information about Emden. August 29th – September 9th 2016, St. Petersburg, Russia. проф. А. Коломбо. Материалы лекции в Университете ИТМО. Август – Сентябрь 2016г.
16. CPS PWG Draft Framework for Cyber-Physical Systems Release 1.0 May 2016. [Электронный ресурс] // Сайт National Institute of Standards and Technology. U.S. Department of Commerce. URL: <https://pages.nist.gov/cpspwg/> (дата обращения 25.09.2017).
17. **Куприяновский В.П., Намиот Д.Е., Синягов С.А.** Кибер-физические системы как основа цифровой экономики // International Journal of Open Information Technologies. 2016. Т. 4, № 2. С. 19–25.
18. Poppy Poppy Humanoid Robot and the 3DEXPERIENCE [Электронный ресурс] // Сайт 3DS Academy. URL: <https://academy.3ds.com/en/lab/poppy-humanoid-robot-and-3dexperience> (дата обращения 25.09.2017).
19. NAO and its Avatar. A Swiss Knife in Engineering Education [Электронный ресурс] // Сайт 3DS Academy. URL: <https://academy.3ds.com/en/lab/nao-and-its-avatar> (дата обращения 25.09.2017).
20. Modelica // Википедия. [2017—2017]. Дата обновления: 01.06.2017. URL: <http://ru.wikipedia.org/?oldid=85740549> (дата обращения 24.09.2017).
21. **Henriksson D., Elmqvist H.** Cyber-Physical Systems Modeling and Simulation with Modelica [Электронный ресурс] // Сайт Research gate. URL: https://www.researchgate.net/publication/267305724_Cyber-Physical_Systems_Modeling_and_Simulation_with_Modelica (дата обращения 25.09.2017).