

Внедрение цифровых двойников как одно из ключевых направлений цифровизации производства

Н.В. Курганова, М.А. Филин, Д.С. Черняев, А.Г. Шаклеин, Д.Е. Намиот

Аннотация — В статье рассматривается одно из самых активных направлений цифровизации производства – решение для виртуального представления реальных статических и динамических характеристик технологической системы, коротко называемое «цифровой двойник». Технология призвана не только выводить получаемые данные для оператора посредством API, но и принимать решения в рамках производственных процессов на основе наработок в сфере машинного обучения. Таким образом снижается потребное число персонала, повышается автономизация, устойчивость и надежность работы технологических систем. В статье поэтапно разобраны принципы и порядок работы технологии цифровых двойников, каждый из этапов проиллюстрирован примерами используемого оборудования и достигаемых результатов. Так, авторами статьи приводятся исследования в области цифровизации железнодорожного транспорта, которые впоследствии могут быть применимы в рамках рассматриваемой технологии. Представлено краткое описание программных решений, принимаемых в концепции Цифровых двойников. На конкретных примерах рассмотрены условия и проблемы внедрения Цифровых двойников в мире, в частности – в России. Авторы брали в качестве ориентиров такие общеизвестные технологии, как Интернет вещей, Краевая аналитика и Большие данные. Использована литература отечественных и зарубежных авторов, многие из которых профессионально заняты в области разработки Цифровых двойников.

Ключевые слова — цифровые двойники, технологические системы, физические прототипы, виртуальный макет, имитация, инновационные технологии, моделирование, глобальный рынок технологий, железнодорожный транспорт, цифровизация.

I. ВВЕДЕНИЕ

Цифровые двойники – технология, создаваемая с целью упростить и усовершенствовать работу физических прототипов изделий или производственного оборудования, целых систем и отдельных процессов.

Статья получена 29 марта 2019.

Курганова Н.В., студент РУТ (МИИТ), (email:lilo13071996@yandex.ru)

Филин М.А., студент РУТ (МИИТ), (email: basilur128@gmail.com)

Черняев Д.С., студент РУТ (МИИТ), (email: dmitrychernyaev95@gmail.com)

Шаклеин А.Г., аспирант РУТ (МИИТ), (email:a.shaklein@rut.digital)

Намиот Д.Е., МГУ имени М.В. Ломоносова; РУТ (МИИТ), (email:dnamiot@gmail.com)

Это гибридная модель (одновременно физическая и цифровая), которая создается специально для определенных целей компании-производителя, например, предсказать неудачи, снизить затраты на обслуживание, предотвратить незапланированные отключения [5].

Термин «Цифровые двойники» в настоящее время применяется преимущественно относительно промышленного производства. Впервые понятие «Цифровые двойники» появилось в 2003 году. В употребление термин вошел после публикации статьи профессора и помощника директора Центра управления жизненным циклом и инновациями в Технологическом институте Флориды Майкла Гривса «Цифровые двойники: превосходство в производстве на основе виртуального прототипа завода» [6, с. 90].

По своей сути цифровые двойники – это виртуальные прототипы реальных объектов, групп объектов или процессов. Цифровые двойники представляют собой, как правило, сложный программный продукт, который создается на основе самых разнообразных данных и технологий, и объединяет в себе искусственный интеллект, компьютерное обучение и программное обеспечение со специальными данными для создания живых цифровых моделей. Эти цифровые двойники постоянно обновляются вслед за изменением физических прототипов [3].

В статье поэтапно разобраны принципы и порядок работы технологии цифровых двойников, каждый из этапов проиллюстрирован примерами используемого оборудования и достигаемых результатов. Так, авторами статьи приводятся исследования в области цифровизации железнодорожного транспорта, которые впоследствии могут быть применимы в рамках рассматриваемой технологии. Представлено краткое описание программных решений, принимаемых в концепции Цифровых двойников. На конкретных примерах рассмотрены условия и проблемы внедрения Цифровых двойников в мире, в частности – в России.

II. СОДЕРЖАНИЕ И ПРИНЦИП РАБОТЫ ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

Цифровые двойники являются собирательной технологией на основе облачных хранилищ, Интернета вещей и машинного обучения, ставшей возможной к реализации благодаря повышению безопасности хранения данных и постепенному снижению объемов и

стоимости их хранения и передачи. Тогда как первое условие всё ещё предполагает перед собой значительное пространство для работы, решением для второго является развитие технологии Edge Analytics. Объектами технологии являются как отдельные детали и единицы оборудования, так и целые компании.

Цифровой двойник помогает решать задачи распределенного накопления данных за счет Edge Analytics (подробно рассматривается в следующем разделе), их анализа на основе как прошлых, так и текущих наблюдений, что ведет соответственно к стратегическому и оперативному принятию решений системой самостоятельно.

Цифровой двойник работает в три этапа: видеть, думать и делать. Для примера рассмотрен цикл поведения двойника одной технологической единицы.

На стадии «видения» речь идет о получении данных о ситуации. Это информация двух видов: эксплуатационные данные (например, температура кипения и любые другие внутренние факторы) и данные из окружающей среды (внешние факторы).

Следующий шаг – «думать», связан с тем, что на этом этапе цифровой двойник анализирует полученную информацию и принимает решение, соответствующее заданным технико-экономическим параметрам, статистическим данным и условиям безопасной эксплуатации объекта. В некоторых случаях прорабатываются несколько вариантов и финальный выбор остается за человеком.

Третий шаг – «делать», связан непосредственно с реализацией того, что необходимо сделать. Цифровой двойник на данном этапе отвечает за дальнейший ход рабочего цикла объекта – контролирует состояние каждого узла и системы целиком, при этом распоряжаясь их работой. На производстве не обязательно видеть перед собой, к примеру, всю турбину целиком, для того чтобы обнаружить пробойну. Технология цифрового двойника позволяет обнаружить проблему в реальном времени с помощью компьютерной визуализации. Получая информацию о нарушении в работе производства, искусственный интеллект (ИИ) в рамках цифрового двойника принимает соответствующее решение о самостоятельной нейтрализации неисправности или необходимости вмешательства человека. Вывод информации для работника осуществляется посредством простого API.

Цели и содержание технологии цифровых двойников выражаются в шести факторах, приведенных ниже.

1. Совокупность документов цифрового двойника можно рассматривать как электронный паспорт изделия, в котором фиксируются все данные о сырье, материалах, произведенных операциях, испытаниях и лабораторных исследованиях. Это значит, что вся информация, начиная с чертежей и технологии производства и заканчивая правилами техобслуживания и утилизации, будет оцифрована и доступна для считывания устройствами и людьми. Такой принцип позволяет отслеживать и гарантировать качество продукции, обеспечивать ее эффективное обслуживание на всём

жизненном цикле.

В рамках электронного паспорта авторы предполагают размещение следующих данных:

- Геометрическую модель объекта;
- Набор расчётных данных деталей, узлов и объекта в целом (математические модели, описывающие все происходящие в объекте физические процессы);
- Информацию о технологических процессах изготовления и сборки;
- Некоторые данные об испытаниях объекта, например, показания датчиков, по которым могут быть подтверждены расчётные данные;
- Систему управления жизненным циклом изделия (PLM) в совокупности с ИИ, которые связывают все вышеперечисленные данные в единую структуру и утверждают эталонный принцип работы объекта. [7, с. 50].

2. Современные технологии дают возможность построить цифровые двойники абсолютно любых производственных активов, будь то нефтеперерабатывающий завод или логистическая компания. В будущем эти технологии позволят удаленно управлять всем производственным процессом в режиме реального времени. На базе цифрового двойника можно объединить все системы и модели, используемые для планирования и управления производственной деятельностью предприятий, что повысит прозрачность процессов, точность и скорость принятия решений, упорядочит хранение данных и упростит оперативный доступ к ним. Идеальная работа цифрового двойника предполагает минимальное участие человека во всех вышеперечисленных процессах.

3. Помимо объединения разрозненных цифровых технологических решений, метод цифровых двойников позволяет выстроить математическую зависимость между отдельными составляющими виртуальной модели объекта.

Благодаря наличию всех элементов, включение которых в электронный паспорт изделия было предложено выше, цифровой двойник позволяет в виртуальном пространстве смоделировать изменение состояния и характеристик всего изделия при изменении характеристик любого из его элементов. Главной задачей цифрового двойника является предоставление возможности в реальном времени управлять всеми факторами, влияющими на стоимость и качество продукта ещё до начала его производства. Параллельной задачей той же технологии можно обозначить выявление дефектов в работе объекта прежде, чем они приведут к губительным последствиям. Оно осуществляется в рамках комплексов «краевой аналитики» (Edge Analytics) – одной из составляющих цифрового двойника. Например, обнаружение серьезного дефекта пути впереди идущего поезда позволит их совместному цифровому двойнику смоделировать ситуацию крушения и безопасно остановить состав. ИИ, связанный с набором датчиков, имеет возможность обнаружить подобную проблему гораздо раньше человеческого глаза.

Тот же принцип взаимозависимости элементов

системы соблюдается и при составлении двойника целого производственного цикла, например, при определении необходимого количества и оптимального расположения оборудования в зависимости от объёма и номенклатуры выпускаемых изделий.

Когда цифровые двойники разрабатываются для вновь создаваемых производств, появляется возможность через симуляцию его работы глобально выявить возможные риски и недочёты, скорректировать проект.

Цифровой двойник существующего производства позволяет прорабатывать внедрение или изменение технологических процессов без реального вмешательства в работу.

4. Говоря об объединении всех цифровых промышленных технологий под началом цифровых двойников, необходимо упомянуть главное достоинство этой технологии – динамичность во времени, таким образом, цифровой двойник – это виртуальное воспроизведение рабочего состояния реального физического объекта, процесса, системы или целой службы, что является ключевым условием независимого принятия решений. К примеру, цифровой двойник авиадвигателя отражает как его конструктивные особенности, так и реальные характеристики узлов, которые отслеживаются и корректируются в процессе его эксплуатации.

5. Немаловажной функцией цифрового двойника является наследование данных об изделии при создании его новых модификаций. Другими словами, максимальное использование предыдущего опыта проектирования, изготовления и испытаний при разработке новых изделий.

6. Еще один значимый аспект – возможность осуществления коллективной работы над изделием территориально удалённых коллективов и инженерных центров. Это позволяет использовать значительно больший научный потенциал и трудовые ресурсы, чем при условно «бумажной» технологии проектирования.

Стратегические преимущества технологии цифровых двойников следующие. Значительно возрастает скорость принятия технических решений и снижается стоимость получения требуемых характеристик изделия. Имея цифровой двойник, можно на порядок сократить количество натурных испытаний, число попыток отработки техпроцессов, всего того, что связано с изготовлением реальной материальной части и её испытаниями, стоимость которых значительно выше, чем стоимость математического моделирования.

Цифровой двойник важен для сложных технологий в том случае, когда продается не просто изделие, а результат, к примеру, готовность к вылету самолета, тогда требуется постоянная и тесная связь с покупателем. В этом случае учитываются особенности эксплуатации двигателя и на основании данных, получаемых от цифрового двойника, возможно вместе с авиакомпанией спланировать сроки и объём ремонта двигателя, выполнение профилактических работ на крыле для повышения его характеристик.

Данные возможности делают крайне ценной технологию цифрового двойника для потребителей,

поскольку его применение позволяет более точно оценивать состояние двигателей авиатранспорта и, таким образом, повышать степень готовности к вылету. Ценность заключается в снижении издержек, связанных с объёмом внеплановых гарантийных ремонтов, фиксации и переноса опыта высококвалифицированных специалистов в электронную систему. Так, в компании General Electric Aviation цифровые двойники самолетов объединяют разные источники данных для повышения скорости обнаружения дефектов и точности ремонта. В итоге в 2016 году это позволило сэкономить 125 млн долл. США [4, с. 15].

III. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА СБОРА И ПЕРВИЧНОГО АНАЛИЗА ИНФОРМАЦИИ ЦИФРОВЫМИ ДВОЙНИКАМИ

Основываясь на упомянутой выше технологии Edge Analytics, на первом этапе работы цифрового двойника можно обозначить две его основные функции – считывание информации посредством датчиков и её первичная обработка.

Для считывания и первичной обработки информации стандартно используются:

1. Видеокамеры высокого разрешения (например, Locovision, рис. 1); иногда применяются тепловизоры (например, при необходимости обнаружения человека на путях или проверки состояния наливного груза в цистерне, рис. 2); различные датчики температуры, интенсивности света и т.д.

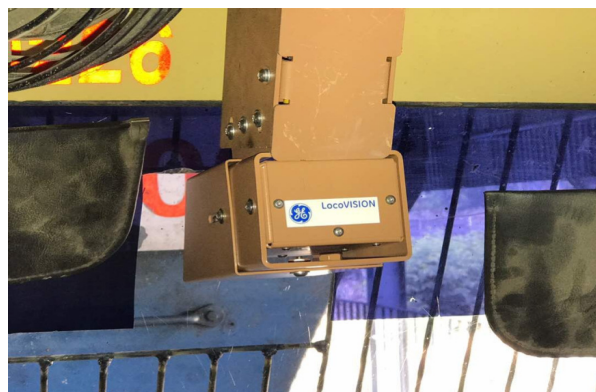


Рис. 1. Видеокамера Locovision, размещенная в кабине машиниста локомотива [15]

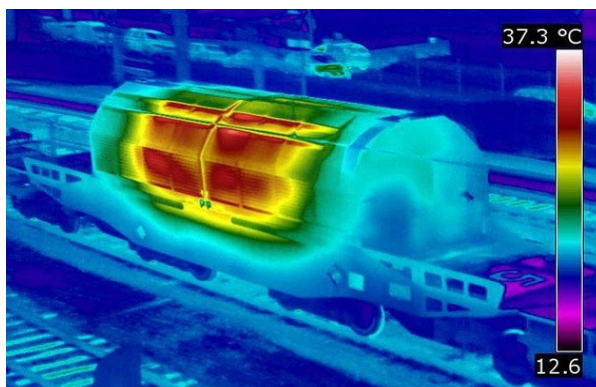


Рис.2. Работа тепловизора по проверке состояния наливного груза в цистерне

2. Бортовой компьютер с платами видеозахвата,

минимально необходимым объемом памяти для работы с оперативными данными (рис. 3).



Рис. 3. Типовой бортовой компьютер [15]

3. Специализированное программное обеспечение (ПО), позволяющее производить замеры расстояния, температуры и прочего на основе полученного изображения.

4. Программное обеспечение, высчитывающее возможное отклонение показателей от нормы, принимающее и исполняющее соответствующее решение.

Четвертый пункт и представляет собой технологию Edge Analytics. Это программное обеспечение, которое собирает и обрабатывает данные, не отправляя их в облако для оперативного анализа. Он осуществляется «на месте», т.е. на датчике, сетевом коммутаторе и т.д. Это экономит время и пропускную способность сети, а также уменьшает нагрузку на серверы. Программа имеет возможность обращаться к шаблонным данным из облака и использовать их для сравнения с собственными.

Технология получила распространение благодаря расширению возможностей Интернета вещей (IoT). Во многих организациях потоковые данные с производственных машин, промышленного оборудования, трубопроводов и других удаленных устройств, подключенных к IoT, создают огромный избыток оперативных данных, которые могут быть сложными и дорогостоящими. Сортируя данные с помощью аналитического алгоритма, созданного «на краю» корпоративной сети, компании могут устанавливать параметры, по которым информация может отправляться в облако или на локальное хранилище данных для последующего использования.

Анализ данных сразу в месте их накопления также может уменьшить задержку в процессе принятия решений на подключенных устройствах. Например, если данные датчиков из производственной системы указывают на вероятный сбой определенной части, правила, встроенные в алгоритм «краевой» аналитики, могут автоматически отключать машину и отправлять оповещение ответственным лицам. Это может сэкономить время по сравнению с передачей данных в центр для ручной обработки и анализа, что потенциально позволяет организациям сократить или избежать незапланированного простоя оборудования.

Ещё одним преимуществом «краевой» аналитики является масштабируемость – компания имеет возможность значительно увеличить количество оборудования с соответствующими датчиками и объем данных, считываемых ими без существенного расширения центральных серверов.

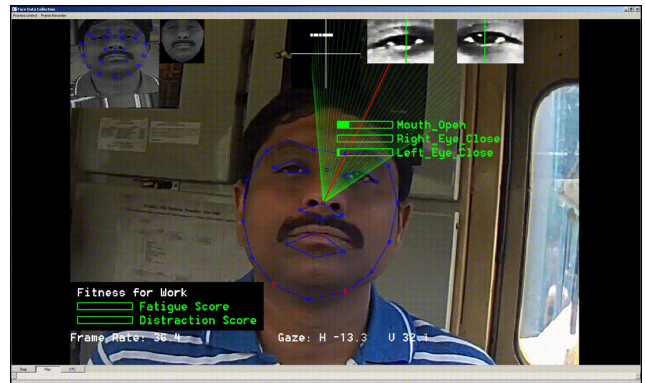


Рис. 4. Процесс сбора информации о состоянии организма машиниста локомотива [15]

Примером технологии EA может служить используемый GE Кластер GPU. Он представляет собой компьютерный кластер, в котором каждый узел оснащен графическим процессором (GPU). Используя вычислительную мощь современных графических процессоров с помощью универсальных вычислений на графических процессорах (GPGPU), очень быстрые вычисления могут быть выполнены с помощью графического процессора. Благодаря данному кластеру впоследствии можно получить графическое изображение данных и свойств цифрового двойника.

После обработки на уровне Edge Analytics информация поступает в облако, доступ к которому открыт с платформы Интернета вещей непосредственно в офисе компании или на рабочем посту оператора. На данном этапе возможно более масштабная и сложная обработка данных, функционал которой зависит от конкретной платформы Интернета вещей, например ANSYS или Predix.

На сегодняшний день существуют технические возможности считывания окружающей и внутренней информации посредством регистрации различных колебаний. Она позволяет, например, эмпирически выявить наличие дефекта пути за счет обнаружения изменений в продольных, вертикальных и поперечных колебаниях подвижного состава при прохождении поврежденного участка (рис. 5). Однако автоматический просчет для точной локализации и изучения свойств дефекта по-прежнему остается довольно сложной задачей за счет большого количества краевых условий. [13]

Следует отметить, что накопленная с различных датчиков техническая информация об объекте может значительно упростить и ускорить будущее проектирование его комплектующих – вплоть до полной автоматизации. Данное преимущество реализуется, например, в рамках системы ANSYS Simplorer, об особенностях которой будет сказано далее.

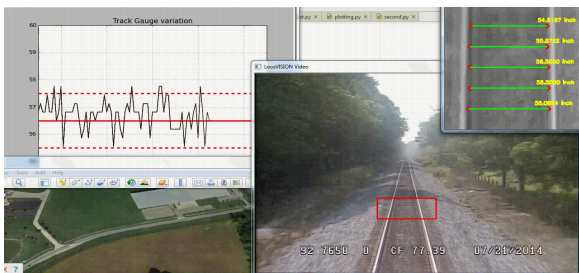


Рис. 5. Процесс сбора информации о состоянии верхнего строения железнодорожного пути на основе визуальных замеров [15]

IV. ФОРМИРОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ МАКЕТОВ И РАБОТА С НИМИ В РАМКАХ ПЛАТФОРМЫ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ПРОИЗВОДСТВА

Цифровой макет – важнейшая составляющая технологии цифровых двойников, определяемая как комплекс электронных документов, которые описывают изделие на этапах его создания, обслуживания, ремонта и утилизации. Это первый этап обработки информации на платформе Интернета вещей. Он содержит электронные чертежи на плоскости и/или трехмерные модели изделия и его составляющих, модели и чертежи дополнительного оборудования и комплектующих, связанных с основной единицей. Рассматриваемая технология предполагает также динамическое моделирование эксплуатации объекта и всех внутренних его процессах вплоть до скрепления деталей. Также в состав макета входит различная техническая информация, такая как принятые понятия, меры веса, размера, различные базовые величины. Включаются требования, распоряжения, инструкции, эксплуатационная документация и любая иная, регулирующая работу с объектом и его цифровым макетом. Совокупность приведенных выше данных макета используется ИИ для принятия решений применительно к реальному объекту. Принципы работы ИИ в рамках цифрового двойника подробно описан в разделе 4, о характеристиках самого цифрового макета как ядра технологии речь идет ниже.

Цифровые двойники как один из приоритетных векторов развития цифровизации разрабатываются промышленными конгломератами или независимыми разработчиками, и лишь со временем на основе совместных наработок возможна будет унификация стандартов в данной области в рамках мировой промышленности и/или отдельных государств. Несмотря на то, что на современном этапе различается и сама структура всех цифровых двойников у различных авторов данной технологии, обобщенно модельную составляющую можно представить следующим образом.

Прототипами формирования модели в рамках цифрового двойника являются различные PLM (product lifecycle management) системы. Такие организационно-технические базы предполагают работу со сложными техническими объектами, такими как компьютерные сети, единицы подвижного состава и инфраструктуры различных видов транспорта и др. PLM предназначены для удаленного согласованного управления компанией и

текущим производством в режиме реального времени, а также для наблюдения за состоянием готовых единиц продукции, отпущенных в работу и находящихся на гарантии производителя. Ключевой составляющей PLM является PDM-подсистема, отвечающая за управление и хранение данных об изделии. Данная технология предполагала полный контроль и принятие решений человеком, тогда как в технологии цифрового двойника использование ИИ позволяет добиться большей производительности в самой сути управления жизненным циклом объекта, открывая возможность на основе динамического моделирования точнее и своевременнее принимать решения.

Используя в той или иной степени определенные в разделе базовые технологии цифровизации производства, компании строят свои цифровые двойники в виде глобальных платформ для моделирования, имитации и анализа своих производственных систем. К примеру, принципы работы с данными, обрабатываемыми ИИ при формировании первоначальной модели следующие.

Информация с различных датчиков реального прототипа сводится в единую трехмерную модель, как правило, отображаемую в принятой на предприятии САПР (системе автономного проектирования) или любого ее аналога, разработанного в рамках платформы. Также САПР пользуются инженеры-конструкторы для разработки новых изделий.

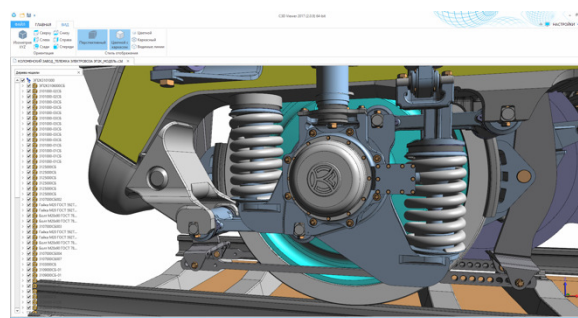


Рис. 6. Представление модели тележки локомотива в САПР

В рамках платформы для цифрового двойника формируются контейнеры, содержащие набор программ, необходимых для работы с каждой отдельной частью объекта на каждой из стадий ее функционирования. Не каждый пользователь, имеющий доступ к платформе в целом, имеет надобность в использовании всех ее функций, к примеру, ПО для проектирования – сама система и файлы, обрабатываемые ей, как правило, имеют большой вес. Стоит также вопрос безопасности – все рабочие места, подключенные к администрированию платформы, а следовательно и имеющие возможность редактировать данные, строго персонифицированы, и их количество ограничено. В целом, для удобства доступа всех пользователей, включая клиентов, платформа создает копию модели нужного элемента (сочетания элементов) в одном из общедоступных форматов. После загрузки копии документа, так называемого «вторичного

представления», появляется возможность построить предварительный просмотр документа непосредственно в интерфейсе клиента платформы. Преимущество большинства популярных программ для «вторичного представления», таких как eDrawings, 3D PDF, C3D Viewer – совместимость с большинством электронных устройств и возможность обмена сопутствующей информацией при помощи заметок и аннотаций.

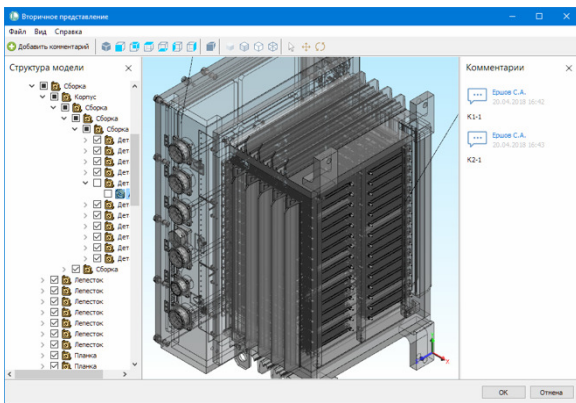


Рис. 7. Послойное разделение модели в САПР

При составлении комбинаций различных элементов цифрового двойника системы следует внимательно относиться к максимально точной цифровой передаче их совместимости (по размеру, материалу и т.д.), а так же к индикации их качественного состояния в настоящий момент. Для сверки деталей в рамках цифровых двойников постепенно формируются библиотеки виртуальных моделей, описывающие типовые используемые комплектующие, многие из которых оговорены общепринятыми стандартами.

К примеру, формирование модели в рамках платформы для цифрового двойника компании ANSYS происходит следующим образом.

Цифровой двойник применяется на всех стадиях жизненного цикла изделия, включающих в себя разработку, изготовление и эксплуатацию. Уже на этапе эскизного проектирования с использованием ANSYS Simplorer возможно создание вариаций системной модели разрабатываемого изделия для оценки и выбора из различных версий технических решений. Далее на этапе технического проектирования, полученная на предыдущем этапе модель может дорабатываться и уточняться при помощи более точных системных моделей элементов, которые в свою очередь могут быть получены посредством численного моделирования в других пакетах ANSYS, возможна интеграция встроенного ПО и интерфейсов управления и многое другое. Данная многофизичная точная системная модель (рис. 8) позволяет учесть и оптимизировать взаимодействие всех элементов с учетом режимов работы и воздействий окружающей среды, в совокупности называемых краевыми условиями.

На этапе производства (изготовления) разработанная системная модель (которая уже может называться цифровым двойником изделия) поможет в определении требуемых допусков, точностей изготовления для

соблюдения характеристик и безотказной работы изделия в течение всего срока службы, а также позволит быстро выявить причины неисправностей в процессе тестирования.

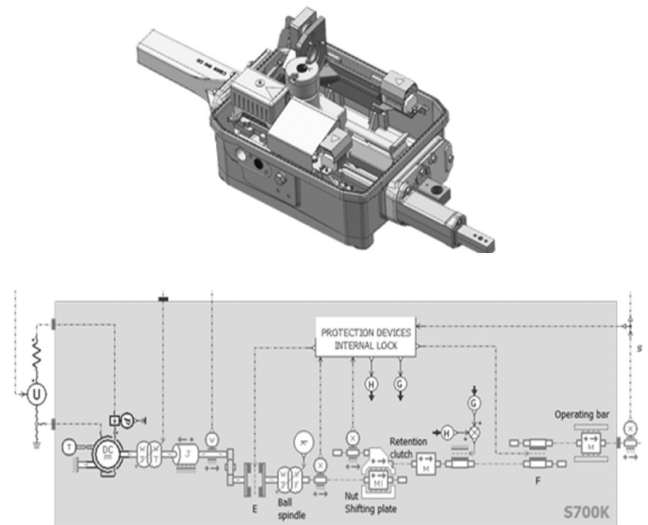


Рис. 8. Построение многофизичной модели [14]

Важным аспектом успешного применения цифровых двойников является то, что разработка всех задействованных устройств и систем должна вестись с учетом данной концепции, что позволит существенно повлиять на качество и соответствие бизнес-процессов/производства предприятия.

V. ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ КАК ИНСТРУМЕНТ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

Имея составленную модель производства, то есть готовую виртуальную копию объекта, необходимо обеспечить ее работоспособность и динамичность. Общим ориентиром при разработке ПО для работы с макетом также служит минимальное участие человека в процессе, в чем состоит главное отличие цифрового двойника от обыкновенной трехмерной визуализации. Основа данного этапа – обучение и последующее самообучение искусственного интеллекта выполнять поставленные задачи. Машинное обучение – класс методов искусственного интеллекта, характерной чертой которых является не прямое решение задачи, а обучение в процессе применения решений множества сходных задач. Для построения таких методов используются средства математической статистики, численных методов, методов оптимизации, теории вероятностей, теории графов, различные техники работы с данными в цифровой форме.

Известный пример платформы Интернета вещей – продукт «Predix» от компании General Electric (GE). Это программная платформа для сбора и анализа данных промышленного оборудования. General Electric планирует поддерживать растущий промышленный Интернет вещей облачными серверами и магазином приложений.

GE является членом Индустриального интернет-

консорциума, который работает над развитием и использованием промышленных интернет-технологий.

Платформа Predix, как утверждается, позволяет реализовать управление эффективностью активов в промышленном масштабе и оптимизировать операции, предоставляя стандартный способ подключения компьютеров, данных и людей. Платформа позволяет получать доступ и управление производством посредством приложений для Android, iOS и стандартных ОС для ПК. Построенная на основе технологии Open Source Cloud Foundry, Predix предоставляет модель компании на основе микросервисов с распределенной архитектурой (облачной и на машинной основе).

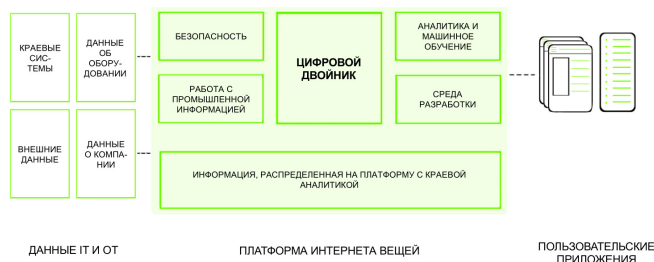


Рис. 9. Схема цифрового двойника с использованием платформы Predix

Основными компонентами Predix являются:

- Predix Machine — программный уровень, отвечающий за связь с промышленным активом и облаком Predix, а также запуск локальных приложений, таких как краевая аналитика. Этот компонент может быть установлен на шлюзах, промышленных контроллерах и датчиках.
- Predix Connectivity — услуга позволяет машинам работать с Predix Cloud через виртуальную сеть, состоящую из сотовых и проводных телефонных линий связи, а также и спутниковых технологий.
- Predix EdgeManager — обеспечивает подключение, управление и настройку периферийных устройств, на которых работает Predix Machine.
- Predix Cloud — глобальная безопасная облачная инфраструктура, оптимизированная для промышленных рабочих нагрузок и удовлетворения регулирующих потребностей.
- Predix Services — предоставляет промышленные услуги, которые разработчики могут использовать для создания, тестирования и запуска.
- Predix for Developers — предоставляет разработчикам инфраструктуру для общения с сервисами. Его модульная конструкция обеспечивает постоянный внешний вид, а также контекстный пользовательский интерфейс как в веб-приложениях, так и в мобильных приложениях.

Платформа Predix хранится в облачном сервисе. Она собирает информацию с датчиков, которые расположены в главных сегментах производственной инфраструктуры. Как правило, это турбины, котлы и двигатели. Платформа располагает ресурсами подвергать ежедневному анализу терабайты данных. В

результате такого анализа система может оценить уровень эффективности, спрогнозировать срок дальнейшей корректной эксплуатации, время потенциального выхода оборудования из строя, а также предвидеть необходимость ремонта и модернизации.

На самом деле платформа Predix имеет намного большие возможности, чем простое обнаружение поломки. Система самостоятельно создает виртуальную копию машины и сравнивает реальные данные с прогнозной моделью. Такой интеллектуальный анализ позволяет быстро выявить отклонения и опробовать разные варианты решения проблемы сначала на виртуальной модели, таким образом соответствуя вырабатываемому понятию цифрового двойника.

Компания Minds + Machines привела пример успешного использования платформы Predix. Благодаря наличию интеллектуальной системы мониторинга, которая смогла обнаружить множество незначительных, на первый взгляд, поломок в турбине, удалось выявить гораздо более серьезную проблему, которая могла сократить срок службы турбины на 69%.

Помимо основной платформы Интернета вещей и её облачного хранилища могут использоваться вспомогательные программные средства, в случае отсутствия подобного функционала на платформе.

Существующие библиотеки для машинного обучения:

TensorFlow — открытая программная библиотека для машинного обучения, разработанная компанией Google для решения задач построения и тренировки нейронной сети с целью автоматического нахождения и классификации образов, достигая качества человеческого восприятия. Применяется как для исследований, так и для разработки собственных продуктов Google.

Keras — открытая нейросетевая библиотека, написанная на языке Python. Нацелена на оперативную работу с сетями глубинного обучения, при этом спроектирована так, чтобы быть компактной, модульной и расширяемой. Эта библиотека содержит многочисленные реализации широко применяемых строительных блоков нейронных сетей, таких как слои, целевые и передаточные функции, оптимизаторы, и множество инструментов для упрощения работы с изображениями и текстом. Ее код размещен на GitHub, а форумы поддержки включают страницу вопросов GitHub, канал Gitter и канал Slack. [11]

Технологии для интеграции разрозненных частей цифрового двойника в единый образ:

Docker — программное обеспечение для автоматизации развёртывания и управления приложениями в среде виртуализации на уровне операционной системы. Позволяет «упаковать» приложение со всем его окружением и зависимостями в контейнер, который может быть перенесён на любую Linux-систему с поддержкой в ядре, а также предоставляет среду по управлению контейнерами.

Kubernetes — открытое программное обеспечение для автоматизации развёртывания, масштабирования и управления контейнеризированными приложениями. Поддерживает основные технологии контейнеризации,

включая Docker, также возможна поддержка технологий аппаратной виртуализации.

VI. ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ И УГРОЗЫ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

Несмотря на очевидные преимущества цифровых двойников, на сегодняшний день их внедрение сопровождается рядом проблем и является стратегическим решением, определяющим будущее конкретного производства на несколько десятков лет.

Основную проблему представляет большой объём работ по цифровизации всех объектов и технологических процессов существующих или создаваемых производств, недостаток высококвалифицированных специалистов данной области [3]. Поэтому относительно аспекта цифровизации не существует единственно правильного ответа — для разных компаний решение будет различным, выбор системы может быть обусловлен спектром факторов:

- возможностью интеграции в существующую структуру и определения горизонтов затрат — особенно долго и болезненно это представляется для масштабных производств;
- возможностью дальнейшего развития;
- сложностью поддержки, соответствием стратегии организации и так далее.

Технология цифровых двойников находится на начальном этапе и опыта в ее применении недостаточно для полного и объективного законодательного оформления и выработки профессиональных стандартов. Данная ситуация является парадоксальной, поскольку множество производственных предприятий направлены на внедрение цифровых двойников, в первую очередь, с целью повышения конкурентоспособности на рынке, но ни государственные заказчики, ни гражданские, ни военные не запрашивают разработку в цифровом виде [3]. Как следствие основная товарная продукция конструкторских бюро представлена бумажными чертежами и бумажными техническими отчетами, и процесс создания цифровых двойников в данной ситуации создает только издержки.

В ряд значимых проблем развития цифровых двойников входит обеспечение информационной безопасности, поскольку они претендуют на роль ключевых элементов управления предприятием.

Рассмотрим, к примеру, внедрение цифровых двойников в современные средства вооружения: беспилотные летательные аппараты, роботизированные комплексы разминирования и т.п.

На основании классически устоявшихся подходов к защите техники можно выделить:

- основными угрозами являются деструктивные воздействия на программную среду в виде компьютерных атак, воздействий вирусов, неправомерного доступа и т.п.;
- основными показателями защищенности являются конфиденциальность, целостность и доступность;

- защита строится на основе экспертно признанной модели угроз и соответствующих мер противодействия.

Однако, если раньше управление осуществлялось в цепочке «человек – компьютер – исполнительный механизм», то при обновлении технологии управление осуществляется через «цифровых двойников» в цепочке «человек – компьютер – цифровой двойник – компьютер – исполнительный механизм» [1, с. 15]. Преимуществом такого подхода является сосредоточение операторов на стратегических аспектах управления, при этом тактические аспекты управления исполнительными механизмами делегируются программно-аппаратным средствам.

Вместе с тем, внедрение «цифровых двойников» приводит к появлению нового вида угроз, связанных с адекватностью цифровой модели. Так, например, согласно одной из версий неудачного запуска ракетносителя с космодрома «Восточный» в ноябре 2017 г. явилась ошибка в модели взлета, рассчитанной для космодрома «Байконур». При этом в настоящее время не известны работы в области теории защиты информации, связанные с угрозами в отношении «цифровых двойников» и мерами по их защите [2, с. 275].

На данный аспект потенциальных угроз от внедрения цифровых двойников обратим особое внимание. Классическая теория защиты информации оперирует только понятиями «конфиденциальность», «целостность» и «доступность». Применительно же к «цифровым двойникам» необходимо ставить вопрос об их адекватности реальным исполнительным механизмам либо объектам управления. Поскольку «цифровые двойники», описывают изменяющиеся объекты, традиционные подходы, связанные с обеспечением целостности, могут быть не применимы.

Следовательно, в критических сферах применения, таких как средства вооружения или атомная промышленность, создание и применение цифровых двойников должно осуществляться под особым контролем. Вместе с тем, данная проблема приобретает особую актуальность в связи с тем, что «цифровые двойники» в ближайшей перспективе будут использоваться не только для моделирования или прототипирования сложных объектов в ходе их разработки, но и для повышения параметров эффективности в процессе эксплуатации в самых различных областях применения.

Несмотря на явный характер угрозы, на текущий момент проблема информационной безопасности «цифровых двойников» в основном рассматривается только в постановочном плане.

VII. КАК ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ МЕНЯЮТ РЕАЛЬНОЕ ПРОИЗВОДСТВО: ПРИМЕРЫ ЛУЧШИХ ПРАКТИК ЗАРУБЕЖНОГО И ОТЕЧЕСТВЕННОГО ОПЫТА

В отчете консалтинговой компании Deloitte приводится ряд примеров того, как в мире внедряют технологии цифровых двойников [9]. Вот некоторые из

них:

Maserati. Этот производитель автомобилей использует цифровых двойников для ускорения проектирования новых моделей машин. Виртуальные макеты и имитации сокращают потребности в создании дорогостоящих реальных прототипов, в аэродинамических испытаниях и пробных поездках, и это на 30% укорачивает время разработки нового автомобиля.

Intermarché. Французская сеть супермаркетов использует информацию с датчиков на торговом оборудовании для создания цифровых двойников реальных торговых площадок, что позволяет менеджерам следить в реальном времени за наличием товаров на полках и тестировать эффективность различных планировок торговых залов.

GE. Широкопрофильный технический гигант использует цифровые двойники для моделирования цепочек поставок и производственных процессов в своих цехах в Неваде для лучшего управления материально-техническим снабжением производства.

Dassault Systems. В своей деятельности в области медицины эта компания создала библиотеку реалистических моделей работы человеческого сердца, благодаря которой врачи смогут обращаться к таким моделям в повседневной практике, чтобы лучше оценить состояние пациента и сформировать верную тактику его лечения [9].

Драйверами развития рынка цифровых двойников в России являются отрасли нефтегазовой и нефтехимической промышленности. Не менее востребована технология в самолетостроении и двигателестроении, а также в транспортной отрасли. Издание Rusbase [10] приводит следующие примеры цифровой трансформации производственных процессов в ведущих российских компаниях на базе создания цифровых двойников:

Нефтегазовая отрасль. На Яйском нефтеперерабатывающем заводе компанией Schneider Electric реализуется проект создания цифрового двойника с использованием цифрового тренажера для операторов, а также система безопасности и предиктивной аналитики, которые позволят предотвращать аварийные ситуации. Проект подразумевает внедрение системы кибербезопасности, направленной на защиту цифрового двойника предприятия от взлома. Другой пример — ПАО «Газпром нефть», определившее в 2018 году цифровую трансформацию бизнеса как приоритетное направление деятельности. Цифровые технологии позволяют тестировать гипотезы по разработке месторождений, строительству инфраструктуры и эксплуатации промысла без рисков для людей и объектов. Для этого создаются цифровые двойники скважин, заводов, производственных площадок и месторождений.

Нефтехимическая промышленность. ПАО «Сибур Холдинг» активно развивает все направления, связанные с созданием цифрового двойника – системы управления инженерными данными, моделирование производственных процессов, имитационные модели

производства и логистики. В базе инженерных данных собрана всевозможная информация по оборудованию и его взаимосвязям: место оборудования в производственной цепочке, нормативные режимы работы, частота обслуживания, геометрические и технические характеристики и многое другое. Данные хранятся в СУИД (системе управления инженерными данными) в виде структуры и в привязке к объектам, что облегчает доступ к ним и делает возможной автоматизированную обработку. Эта система позволяет существенно сократить потери времени, а также число ошибок при обслуживании, ремонте и заказе запчастей. Она также даёт возможность делать навигацию по оборудованию для ремонтников, заранее планировать операции при проектных ремонтах, проводимых раз в 4-5 лет. В том числе система подскажет, какие элементы оборудования следует отключить или перекрыть, чтобы безопасно провести ремонт.

Транспортная отрасль. Вышеупомянутый «Сибур холдинг» также запустил проект по оптимизации логистики железнодорожных перевозок. Цифровые двойники помогают снизить затраты на ремонтные работы, выявить возможность осуществления двояких операций при управлении парком подвижного состава и более эффективно управлять отгрузками. Цифровой двойник внедряется и на площадках КАМАЗа, где уже были созданы 3D-модели 28 единиц станков с ЧПУ и 20 универсальных станков, а также более 50 единиц различного технологического оборудования (роботы, манипуляторы, кантователи, рольганги). 3D-модели применяются при моделировании механообработки и сборки, а также для размещения оборудования на 3D-планировках заводов. В ОАО «РЖД» цифровые копии стали применяться для эффективной эксплуатации скоростных электропоездов «Сапсан» и «Ласточка». В 2018 году внедрение цифрового двойника производства анонсировал также «Трансмашхолдинг».

Строительная отрасль. Строительные компании активно работают над созданием цифровых двойников зданий прежде всего для управления всей инфраструктурой объекта. В основном управление осуществляется ресурсами, которые увязываются с климатическими и производственно-технологическими процессами предприятия, такими как электроменеджмент (контроль электричества), контроль водных ресурсов и теплоснабжения». На последующих этапах решается задача создания трехмерной модели здания: интегрировать данные с САД-системой, что дает возможность делать 3D-визуализацию объекта. О курсе на цифровизацию говорят и в Министерстве строительства и ЖКХ РФ. В настоящее время обсуждаются проекты моделирования цифровых двойников для каждого российского города численностью более 100 тысяч человек [10].

VIII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учитывая, что технологии цифровых двойников

пользуются поддержкой IT-гигантов, включая IBM и SAP, предприятиям сегодня следует обратить на эти технологии самое пристальное внимание. «Цифровые двойники могут существенно усилить способность предприятий принимать проактивные решения на базе данных, повысить эффективность их деятельности и избавиться от потенциальных проблем, — говорится в отчете Deloitte. — Они также могут предоставить возможность безопасным и экономным образом прорабатывать сценарии что-если, то есть по сути дела экспериментировать с будущим» [9].

Согласно прогнозам, глобальный рынок технологий цифровых двойников к 2023 г. достигнет 16 млрд. долл., тогда как обороты рынка технологий, формирующих базу для этого прогресса, к 2020 г. по прогнозам должны удвоиться. Зонами наиболее интенсивного роста использования цифровых двойников, являются ресурсоемкие отрасли, такие как промышленное производство, нефтегазовая индустрия, аэрокосмическая и автомобильная промышленности.

Очевидно, что решение приведенных проблем, разработка новых параметров и требований к цифровым двойникам по информационной безопасности является актуальной научной и практической задачей.

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Боровков А.И., Рябов Ю.А., Марусева В.М. «Умные» цифровые двойники – основа новой парадигмы цифрового проектирования и моделирования глобально конкурентоспособной продукции нового поколения // Трамплин к успеху. Цифровая экономика знаний. – 2018. - №13. – С. 13-17.
- [2] Гурьянов А.В., Заколдаев 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.
- [3] Два в одном: для чего заводу нужен цифровой близнец // РБК Цифровая Россия, [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://digital-russia.rbc.ru/article-page_11.html
- [4] Добрынин А.П., Черных К.Ю., Куприяновский В.П., Куприяновский П.В., Синягов 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. – Том 4, № 1. – С. 4-11.
- [5] Комраков А.В., Сухоруков А.И. Концепция цифрового двойника в управлении жизненным циклом промышленных объектов // Сетевой научный журнал «Научная идея». – 2017. - №3(3) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nauch-idea.ru/>
- [6] Куприяновский В.П. и др. Оптимизация ресурсов в цифровой экономике // International Journal of Open Information Technologies. – 2016. – Том 4, № 12. – С. 86-96.
- [7] Синягов С.А., Куприяновский В.П., Куренков П.В., Намиот Д.Е., Степаненко А.В., Бубнов П.М., Распопов В.В., Селезнев С.П., Куприяновская Ю.В. Строительство и инженерия на основе стандартов BIM как основа трансформаций инфраструктур в цифровой экономике // International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – Том 5, № 5. – С. 46-79.
- [8] Никоноров А., Шишмарев А. Цифровой двойник. Системы 3D-моделирования используются для создания цифровых двойников оборудования на НПЗ «Газпром нефти». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.gazprom-neft.ru/press-center/sibneft-online/archive/628/1119180/>
- [9] Цифровой HR: платформы, люди и работа. Глава седьмая из отчета Deloitte 2017. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.talent-management.com.ua/3284-tsifrovoy-hr-deloitte-2017/>
- [10] Как цифровые двойники помогают российской промышленности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rb.ru/longread/digital-twin/>
- [11] Джулли А., Пал С. Библиотека Keras — инструмент глубокого обучения. – ДМК Пресс, 2017. – 294 с.
- [12] Официальный сайт Predix [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.predix.io>
- [13] Вакуленко С.П., Волосов К.А., Волосова Н.К. К методу оценки состояния железнодорожного полотна // Мир Транспорта. – 2016. – Том 14, №3. – С. 20-35.
- [14] Stefan Boschert, Christoph Heinrich, Roland Rosen. Next Generation Digital Twin // Proceedings of TMCE 2018, Las Palmas de Gran Canaria, Spain, 7-11 May, 2018.
- [15] Dattaraj Jagdish Rao Digital Twin for the Railway Network. Making Trains “Look” for Track Defects // GE Transportation – Digital Solutions, 2018.

Digital twins' introduction as one of the major directions of industrial digitalization

Nadezhda Kurganova, Michael Filin, Dmitry Cherniaev, Artem Shaklein, Dmitry Namiot

Abstract — This article observes one of the vital directions of industrial digitalization. It is a smart decision for virtual setting of static and dynamic data of a technological system, generally called a “digital twin”. The technology not only allows an operator to get data through API but also makes decisions based on machine learning considering production processes. Thus less number of personnel is required. Autonomy, reliability and stability of technological system are possibly boosted. An order of how the technology works is sorted out stepwise. Each step is illustrated with the examples of technical facilities used and goals achieved. The authors also have studied researches on digitalization of the railway which can be integrated in the observed technology later. The article presents a brief overview of program solutions used in the concept of digital twin. The article states conditions and problems of digital twins integration in the world and in Russia in particular. The authors considered such modern technologies as the Internet of Things, Edge Analytics and Big Data. The existing literature written by Russian and foreign researchers working in the field of digital twins has been referred to.

Keywords — digital twins, technological systems, physical prototypes, virtual model, simulation, innovative technologies, modeling, global technology market, railway transport, digitalization.

REFERENCES

- [1] Borovkov A. et al. «Umnyye» tsifrovyye dvoyniki – osnova novoy paradigmy tsifrovogo proyektirovaniya i modelirovaniya globalno konkurentosposobnoy produktsii novogo pokoleniya // Trampolin k uspekhu. Tsifrovaya ekonomika znaniy. – 2018. - №13. – p. 13-17.
- [2] Gurianov A. et al. Organizatsiya tsifrovyykh proizvodstv Industrii 4.0 na osnove kiberfizicheskikh sistem i ontologiy // Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologiy. mekhaniki i optiki. - 2018. - Vol. 18. - № 2. - p. 268-277.
- [3] Dva v odnom: dlya chego zavodu nuzhen tsifrovoy bliznets // RBK Tsifrovaya Rossiya: http://digital-russia.rbc.ru/article-page_11.html
- [4] Dobrynin A. et al. The Digital Economy - the various ways to the effective use of technology (BIM, PLM, CAD, IOT, Smart City, BIG DATA, and others) // International Journal of Open Information Technologies. – 2016. – Vol 4, № 1. – p. 4-11.
- [5] Komrakov A., Sukhorukov A. Kontseptsiya tsifrovogo dvoynika v upravlenii zhiznennym tsiklom promyshlennykh ob'ektov // Setevoy nauchnyy zhurnal «Nauchnaya ideya». – 2017. - №3(3) <http://www.nauch-idea.ru/>
- [6] Kupriyanovskiy V. et al. Optimizing the use of resources in the digital economy // International Journal of Open Information Technologies. – 2016. – Vol 4, № 12. – p. 86-96.
- [7] Sinyagov S., et al. Building and Engineering Based on BIM Standards as the Basis for Transforming Infrastructures in the Digital Economy // International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – Vol 5, № 5. – p. 46-79.
- [8] Nikonorov A., Shishmarev A. Tsifrovoy dvoynik. Sistemy 3D-modelirovaniya ispolzuyutsya dlya sozdaniya tsifrovyykh dvoynikov oborudovaniya na NPZ «Gazprom nefi»: <http://www.gazprom-neft.ru/press-center/sibneft-online/archive/628/1119180/>
- [9] Tsifrovoy HR: platformy. lyudi i rabota. Glava sedmaya iz otcheta Deloitte 2017: <https://www.talent-management.com.ua/3284-tsifrovoy-hr-deloitte-2017/>
- [10] Kak tsifrovyye dvoyniki pomogayut rossiyskoy promyshlennosti: <https://rb.ru/longread/digital-twin/>
- [11] Dzhulli A., Pal S. Biblioteka Keras — instrument glubokogo obucheniya. – DMK Press. 2017. – 294 p.
- [12] Official website Predix: <https://www.predix.io>
- [13] Vakulenko S., Volosov K., Volosova N. K metodu otsenki sostoyaniya zheleznodorozhnogo polotna // Mir Transporta. – 2016. – Vol 14. №3. – p. 20-35.
- [14] Stefan Boschert, Christoph Heinrich, Roland Rosen Next Generation Digital Twin // Proceedings of TMCE 2018, Las Palmas de Gran Canaria, Spain, 7-11 May, 2018.
- [15] Dattaraj Jagdish Rao Digital Twin for the Railway Network. Making Trains “Look” for Track Defects // GE Transportation – Digital Solutions, 2018.