

УДК: 681.5

DOI: 10.30987/article_5cf2d1c56f8944.09486334

К.С. Пономарев, А.Н. Феофанов, Т.Г. Гришина

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ПРОИЗВОДСТВА – СРЕДСТВО ЦИФРОВИЗАЦИИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ

В статье рассматриваются аспекты применения на предприятиях цифровых двойников производства. Указано, что цифровой двойник – это представленная в виде математических зависимостей цифровая модель реального объекта или системы. Выявлен принцип функционирования цифрового двойника производства. Сформулировано, что применение цифрового двойника позволяет добиться повышения эффективности функционирования предприятия, а так же снижения рисков, связанных с возможными отклонениями функционирования технологических процессов производства.

Ключевые слова: цифровой двойник, Индустрия 4.0., деятельность организации, автоматизация, безлюдное производство, цифровизация, идентификация изделий.

K.S. Ponomarev, A.N. Feofanov, T.G. Grishina

ENTERPRISE DIGITAL TWIN – INSTRUMENT OF DIGITALIZATION THE ACTIVITY OF THE ORGANIZATION

The article discusses aspects of the use of digital twins of enterprises in manufacturing. It is indicated that a digital twin is a digital model of a real object or system presented in the form of mathematical dependencies. The principle of operation of enterprise's digital twin is revealed. It is formulated that the use of the digital twin allows increasing the efficiency of the enterprise, as well as reducing the risks associated with possible deviations in the functioning of technological processes of production.

Keywords: digital twin, Industry 4.0., organization's activities, automation, manless manufacturing, digitalization, product identification.

Введение

В связи с растущей сложностью технологических процессов, процессов управления предприятием, постоянно растущим объемом данных, которые необходимо подвергать интерпретации, обработке и анализу в настоящий момент уже практически невозможно осуществлять эффективное функционирование предприятия без использования инструментов новой цифровой эры – эры Индустрии 4.0. К таким инструментам можно отнести различные системы автоматизации управления предприятием, такие как *MES, ERP, SCADA*, системы автоматизированного проектирования *CAD, CAM, CAE*, системы класса *PLM, PDM*, а так же цифровизацию деятельности предприятия, в том числе его технологических процессов, с помощью виртуальных моделей процессов, работ, изделий – цифровых двойников.

1. Преимущества применения технологии цифрового двойника на предприятии

Цифровой двойник представляет собой виртуальную копию физического мира, виртуальную модель реального объекта или ситуации, которая на микро- и макроуровне с помощью набора математических моделей описывает состояние объекта и всех его элементов [1]. То есть цифровой двойник – это представленный в цифровой среде двойник физического объекта, системы или процесса. Цифровой двойник позволяет в виртуальном

пространстве смоделировать изменение состояния и характеристик всего изделия при изменении характеристик любого из его элементов благодаря тому, что созданная виртуальная трехмерная модель изделия связана с информационной базой данных, в которой каждому элементу можно присвоить дополнительные атрибуты[2]. Это позволяет оперативно отслеживать изменения, происходящие в реальном процессе, и адекватно реагировать на них. Кроме того, появляется возможность проводить определенные производственно-технологические эксперименты не на дорогостоящем оборудовании, жертвуя при этом драгоценными временными ресурсами, а в виртуальной цифровой среде, сведя на нет риски, связанные с порчей и простоем оборудования, угрозой человеческому здоровью и окружающей среде. Так же, в процессе накопления информации о функционировании технологических, логистических, информационных процессов предприятия, цифровой двойник повышает предиктивность управления, то есть с его помощью можно отслеживать и во время принять меры по потенциальным отклонениям и несоответствиям в тех или иных процессах деятельности организации.

Благодаря использованию методов цифрового двойника, можно на порядок сократить количество натуральных испытаний, число попыток отработки техпроцессов, всех тех действий, которые связаны с изготовлением реальной материальной части и её испытаниями, стоимость которых значительно выше, чем стоимость математического моделирования[3]. В качестве условий функционирования предприятия, можно задать необходимые ограничения, условия, критерии производительности того или иного оборудования, и провести моделирование деятельности организации при выполнении поставленных условий с высокой степенью адекватности реальной производственной ситуации. Цифровой двойник даст возможность повысить предиктивность функционирования организации. На основе получаемых данных, а также учитывая процессы, происходящие на предприятии, и находя взаимосвязь между ними, в том числе благодаря решению уравнений физики, механики, термо- и электродинамики, теплообмена, цифровой двойник позволяет моделировать и «предсказывать» некоторые нештатные, непредвиденные ситуации и режимы, а также предоставлять наиболее эффективный вариант их предотвращения. Также, благодаря накоплению статистической информации, появляется возможность более рационально проводить ремонт технологического оборудования. Можно осуществлять получение информации о методах и процедурах технического обслуживания согласно принятым государственным или внутренним стандартам на техническое обслуживание того или иного средства производства. По результатам проведенного технического обслуживания составленный отчет также можно передать в информационную среду цифрового двойника предприятия. На основе получаемых в оперативном режиме данных, а также опытных данных за предыдущие периоды времени, цифровой двойник может отследить тенденции выхода из строя элементов технологического оборудования, и дать сигнал о необходимости его ремонта. Таким образом, появляется возможность проводить ремонт по текущему состоянию оборудования, тем самым снизив затраты на его плановый и профилактический ремонт. Благодаря этому, можно более эффективно распоряжаться тем временем, которое ушло бы на вынужденный простой оборудования, и, возможно, всей технологической линии, в случае поломки оборудования.

2. Принцип функционирования цифрового двойника в контексте стратегии Industrial Internet of Things

Цифровой двойник получает необходимую информацию с датчиков, сенсоров, установленных непосредственно на оборудовании, технологической линии, в цехе. Датчики фиксируют текущее состояние оборудования, окружающей среды, различные параметры технологического процесса, наличие сырья, идентифицируют этапы прохождения изделия по производственным стадиям. Интеграция с реальными производственными операциями создает каналы ценной обратной связи [4]. Получаемая информация с датчиков передается

посредством проводной, или, что более актуально с точки зрения безопасности и минимизации количества непроизводственных элементов цеха, беспроводной связи (сети *WiFi, LTE, ZigBee*) в единую цифровую среду предприятия, которая, по сути, и является основой цифрового двойника. Далее происходит обработка полученной информации, ее анализ и визуализация в приемлемом виде (рис. 1). По мере накопления информации о работе датчиков, появляется возможность актуализировать их количество и места расположения на предприятии, чтобы исключить избыточную или неверную информацию (например, вследствие влияния на показания датчика электрических наводок, температуры, влажности т.д.), а так же повысить скорость обработки и внесения информации в среду цифрового двойника. Такое взаимодействие датчиков, фиксирующих информацию, цифровой среды, где происходит ее обработка, накопление и анализ, производственных объектов (оборудования), где информация генерируется и каналов передачи такой информации носит название Индустриального Интернета Вещей (*Industrial Internet of Things, IIoT*), который также является одним из инструментов концепции Индустрии 4.0.

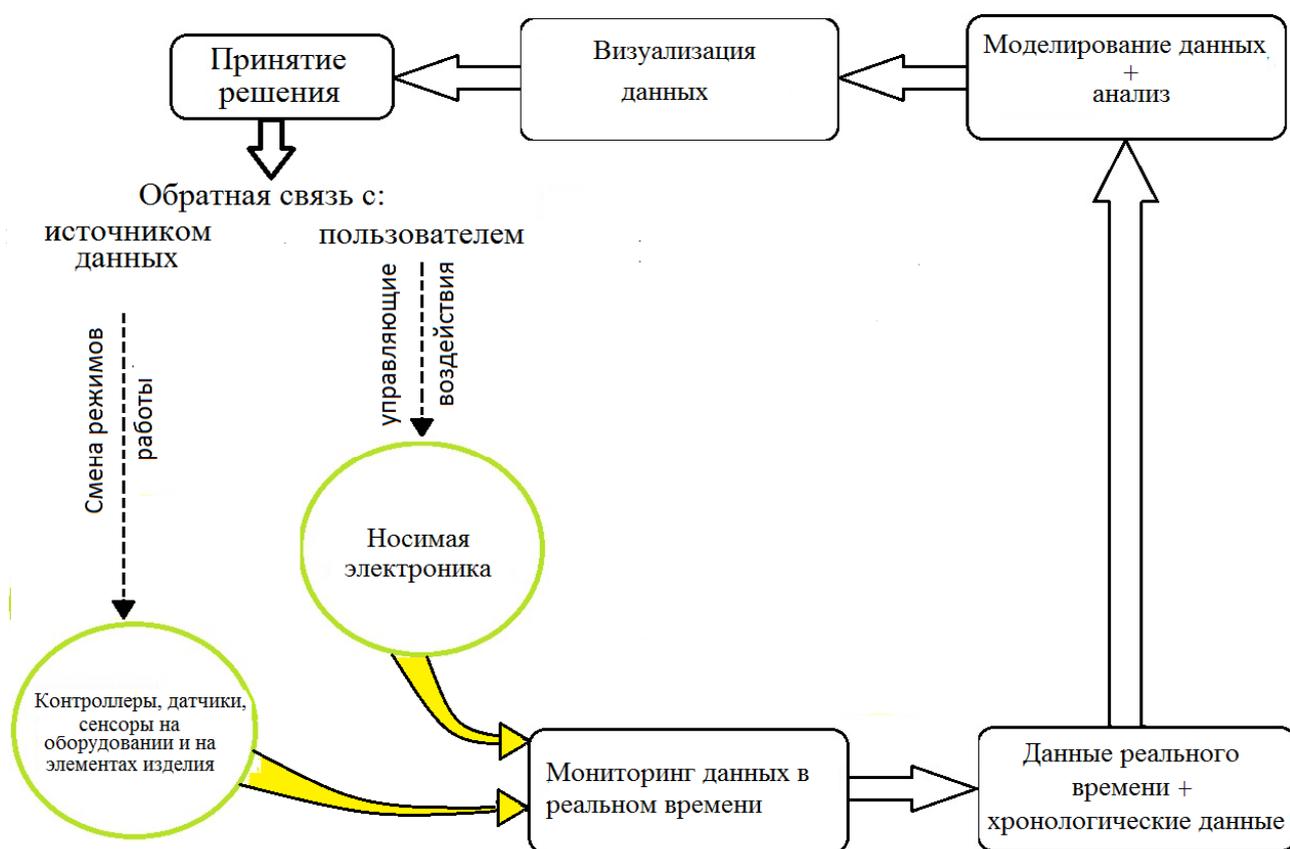


Рис. 1. Процесс функционирования цифрового двойника в рамках производственной системы предприятия

3. Роли цифрового двойника в процессах функционирования предприятия

Стоит отметить, что цифровой двойник может выступать в качестве одного из инструментов предотвращения нештатных ситуации на предприятии. Датчики, установленные на территории предприятия, могут регистрировать различные параметры, такие как уровень задымленности, радиационного фона, температуры, освещённости. При превышении определенных значений, информация об этом будет передана в соответствующие отделы, и в автоматическом режиме будут приняты определенные меры (остановка оборудования, активация пожарной тревоги, оповещение специальных служб). В

этой связи исключительно важно обеспечить защиту передачи информации, так как ее искажение может обернуться непредвиденными последствиями для функционирования всего предприятия.

Важнейшим аспектом применения цифрового двойника является возможность дистанционной обработки, анализа и управления данными предприятия. Например, в случае, если производственные цеха географически распределены, поступающая от них в цифровой двойник информация позволяет управлять всем предприятием дистанционно, что повышает эффективность, оперативность и прозрачность функционирования. С точки зрения логистики в таком случае цифровой двойник позволяет координировать поставку сырья, отгрузку продукции, перемещение средств производства между цехами. Становится возможным применение стратегии *Just in Time (JIT)*, согласно которой минимизируются складские запасы, а материальные единицы поступают в необходимом количестве на определенный этап производства точно в срок. Благодаря этому снижаются временные и финансовые потери, связанные с накоплением большого количества продукции или сырья на складах, транспортировкой материальных единиц, исключаются возможные логистические простои, связанные с отсутствием необходимых материальных активов к определенному сроку. Для обеспечения подобных преимуществ в цифровой двойник вносится информация о времени и месте нахождения определенной партии продукции, сырья, транспортных средств путем их цифровой идентификации. Данные по многим параметрам: марке и типу сырья, номеру технологического участка обработки, применяемому при этом оборудованию и оператору, работающему на этом оборудовании, времени и типам операций заносятся в интегрированную цифровую среду цифрового двойника. В случае, если для изготовления изделия применяются комплектующие, изготовленные на других предприятиях, в цифровой двойник передается также информация об организации-изготовителе конкретного компонента, времени прибытия на предприятие, номере партии, контролере или сотруднике отдела технического контроля, принявшего данную партию и т.д. Цифровой двойник отслеживает каждый элемент изделия при помощи присвоения ему уникального идентификационного номера, который заносится в объектно-ориентированную базу данных, и постоянно присваивает этому номеру определенные атрибуты, исходя из процесса прохождения элемента по технологическим этапам производства. Таким образом, обеспечивается контроль жизненного цикла изготовления изделия, начиная с этапа отливки или механической обработки заготовки, и заканчивая процессом отгрузки изготовленного изделия потребителю. В случае обнаружения брака, обеспечивается возможность получить исчерпывающую информацию о технологической операции, приведшей к появлению несоответствия, использовавшемуся при этом оборудовании, дате и времени выполнения операции и о других параметрах технологического процесса. Благодаря этому, повышается однозначность идентификации брака, сокращаются временные затраты на поиск причин появления брака и повышается оперативность принятия корректирующих мер.

Для целей идентификации конкретного элемента или изделия могут использоваться различные средства автоматизации учета, например, штрих-коды или радио-метки. В начале цикла изготовления, на каждый элемент будущего изделия наносится штрих-код. В процессе прохождения по этапам технологического процесса, на каждой технологической операции, штрих-код сканируется специальным сканером. Таким образом, информация о месте нахождения конкретной материальной единицы, и, как следствие, о выполняемой над ней технологической операции (вместе со сведениями от регистрирующих датчиках об используемом оборудовании, его параметрах, температуре, влажности, освещенности на конкретном рабочем месте, ответственном операторе) передается в режиме реального времени в информационную среду цифрового двойника, где происходит её обработка и анализ. В этой связи, становится возможным в каждый момент времени идентифицировать каждый конкретный элемент, и получить исчерпывающую информацию о складывающейся ситуации его изготовления.

В случае, если нанести на элемент штрих-код является затруднительным, или у сканера нет возможности «увидеть» штрих-код и считать его, можно воспользоваться методами радиочастотной идентификации. В элемент встраивается метка, которая, при подаче на неё сканирующего радиосигнала определенной частоты и модуляции, передает уникальный сигнал в ответ.

Говоря о возможностях координации функционирования географически распределенных цехов или даже отдельных предприятий (например, входящих в холдинг), отметим, что цифровой двойник дает возможность повысить уровень координации работ между производственными системами цехов или предприятий. Например, в случае выхода из строя какого-либо оборудования в одном из цехов, цифровой двойник, получая данные из *ERP/MES*-систем всего предприятия, поможет провести имитационное моделирование складывающейся ситуации и оперативно провести эксперимент, связанный с перераспределением материальных потоков между цехами и технологическими линиями. По результатам такого эксперимента появляется возможность принять наиболее рациональное решение с учетом всех влияющих факторов. В рассматриваемой ситуации, например, может быть принято решение о переносе части работ на оборудование смежного цеха с последующим перерасчетом производственного расписания.

4. Предпосылки развития концепций безлюдного производства на основе применения стратегии цифрового двойника

Вообще, корреляция систем кластера *CALS*-технологий (*CAD/CAM/CAE, ERP, MES, SCADA, PLM, PDM*) с информационной средой цифрового двойника и применением промышленных роботов при производстве продукции создает предпосылки для развития безлюдного производства, когда от момента создания *3D* модели изделия до момента его изготовления человеческое вмешательство будет сведено к минимуму или полностью исключено. К тому же, использование технологий дополненной реальности в контексте применения цифрового двойника может служить средством визуализации производственной деятельности предприятия. Возможно, в скором будущем, технолог, используя *VR*-очки, сможет «увидеть» полномасштабную виртуальную *3D* модель технологического процесса, внести в него изменения и тут же получить измененный процесс в цифровой форме, при этом, никак не влияя негативно на реальное производство. Цифровой двойник производства, на основе статистических данных, сможет предложить наиболее рациональный путь усовершенствования технологического процесса, и тут же визуализировать его в цифровом виде дополненной реальности.

Еще 10 – 15 лет назад существовали теоретические предпосылки для создания цифрового двойника, однако средства аппаратного и программного обеспечения на тот момент не соответствовали уровню непосредственной реализации концепции цифрового двойника. Теперь, в том числе благодаря применению облачных технологий, применение стратегий цифрового двойника является важным шагом развития предприятий.

Говоря об использовании цифрового двойника производства, отметим тот факт, что существует возможность передачи данных от готового изделия в цифровую среду предприятия, в том числе его цифровому двойнику. Если оснастить изделие регистрирующими датчиками, и снимать с них показания (как в режиме реального времени, так и например, при прохождении ремонтных работ или технического обслуживания изделий), то можно добиться получения ценной обратной связи, которая станет ключом к различного рода усовершенствованиям. Например, датчик, установленный в изделии, фиксирует утечку жидкости, и либо посылает информацию через беспроводные сети в режиме онлайн на производство, либо записывает эти данные в специально предусмотренное информационное хранилище, входящее в состав изделия. При диагностике или техническом обслуживании изделия информация из хранилища передается в информационную среду цифрового двойника. Цифровой двойник, в свою очередь, анализирует полученную

информацию, находит потенциальные причины проблемы (например, утечка вследствие коррозии металла резервуара, где хранится жидкость) и предлагает возможные варианты ее решения (напыление антикоррозийного слоя, изменение условий изготовления резервуара и т.д.). Далее, проводится виртуальный эксперимент, и из множества предложенных решений выбирается наиболее эффективное. Такое свойство цифрового двойника позволяет экономить временные и финансовые ресурсы, которые уходят на поиск причины определенного несоответствия и проверку предложенных решений путем натуральных испытаний.

Конечно, внедрение цифровых двойников пока что связано с определенными трудностями. По оценкам экспертов, к таким трудностям можно отнести и сложность математического моделирования, и нехватку специалистов в области цифровизации предприятий, и высокую стоимость разработки и внедрения цифрового двойника производства на предприятии. Однако, развитие технологий Индустрии 4.0., растущая сложность производств изделий, повышение технической и компьютерной грамотности специалистов, вызовы, стоящие перед предприятиями любой сферы экономики по всему миру – все это является признаком того, что без применения передовых информационных инструментов развития предприятиям станет все труднее соответствовать требованиям современного мира. В этой связи, внедрение цифрового двойника производства является актуальной задачей, решение которой позволит повысить конкурентоспособность и занять лидирующие позиции в отрасли деятельности организации.

Выводы

Таким образом, применение цифрового двойника в полной мере соответствует переходу к использованию кибернетических систем, что, в свою очередь, является одним из аспектов стратегий Индустрии 4.0. Несмотря на определенные трудности имплементации цифрового двойника в деятельность предприятия, эффект от его применения позволит значительно повысить эффективность, результативность и конкурентоспособность организации. В условиях повсеместной цифровизации и автоматизации внедрение цифровых технологий является важным шагом к развитию предприятия, сохранению и увеличению его влияния на рынке.

Список литературы:

1. Пономарев К.С. Цифровой двойник производства как инструмент цифровизации технологических процессов предприятия / К.С. Пономарев, А.Н. Феофанов // Актуальные тренды и перспективы развития науки, техники, технологий: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции / Под общ. ред. Е. П. Ткачевой. – Белгород: ООО Агентство перспективных научных исследований (АПНИ), 2019. – С. 141 – 144.
2. <http://www.rbplus.ru> (дата обращения 28.02.2019). Экономика двойников: как роботы приходят в менеджмент – URL: <http://www.rbplus.ru/news/5b5e4f2f7a8aa92e8c50df14>.
3. <https://cheremuha.com> (дата обращения 28.02.2019) Цифровой двойник: зачем создавать в виртуальной среде симуляторы деталей, двигателей и целых цехов – URL: <https://cheremuha.com/2018/04/13/digital-twin.html>
4. Фюер Ц. Преимущества “цифрового двойника” / Ц. Фюер, Ц. Вейсманн // CAD/CAM/CAE Observer. 2017. - №5 (113) - стр. 50-53 // Радио-промышленность. 2015. № 4. С. 56-64..

References:

1. Ponomarev K.S. (2019). Digital twin of enterprise as a tool of digitalization of technological processes of enterprise // K.S. Ponomarev, A.N. Feofanov // Actual trends and prospects for the development of science, engineering and technology: collection of scientific papers on the materials of the International scientific-practical conference / edited by E.P. Tkacheva. Belgorod : LLC Agency of perspective scientific researches (APNI). pp. 141 – 144.[in Russian language]
2. Economy of twins: how robots come to management. Available at:<http://www.rbplus.ru> (Accessed: 28.02.2019).[in Russian language]
3. Digital twin: why to create simulators of parts, engines and entire workshops in a virtual environment. Available at: <https://cheremuha.com> (Accessed:28.02.2019).[in Russian language]
4. Feuer Z., Weissman Z. (2017). Advantages of digital twin. CAD/CAM/CAE Observer. No5 (113), pp. 50-53.

Статья поступила в редколлегию 13.03.19.

Рецензент: к.т.н., доцент Брянского государственного технического университета
Терехов М.В.

Статья принята к публикации 27.04.19.

Сведения об авторах

Пономарев Кирилл Сергеевич

аспирант кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления, ФГБОУ ВО Образования «Московский Государственный Технологический Университет «СТАНКИН», Россия, г. Москва
тел.: +7 (909) 666 43 80,
E-mail: sergej.ponomarev@bk.ru

Феофанов Александр Николаевич

профессор кафедры инженерной графики, д-р технических наук, ФГБОУ ВО «Московский Государственный Технологический Университет «СТАНКИН», Россия, г. Москва
тел.: +7 (903) 724 24 91,
E-mail: feofanov.fan1@yandex.ru

Гришина Татьяна Геннадьевна

профессор кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления, кандидат технических наук ФГБОУ ВО «Московский Государственный Технологический Университет «СТАНКИН», Россия, г. Москва
тел.: +7 (905) 511 99 37,
E-mail: grishena@mail.ru

Information about authors:

Ponomarev Kirill Sergeevich

Postgraduate of department of automated data processing systems and management, Federal State Educational Institution of Higher Education "Moscow State Technological University " STANKIN ", Russia, Moscow
tel.: 7 (909) 666 43 80,
E-mail: sergej.ponomarev@bk.ru

Feofanov Alexander Nikolaevich

Professor of engineering graphics department, PhD in Engineering, Federal State Educational Institution of Higher Education "Moscow State Technological University " STANKIN ", Russia, Moscow
tel.: +7 (903) 724 24 91,
E-mail: feofanov.fan1@yandex.ru

Grishina Tatyana Gennadyevna

Professor of department of automated data processing systems and management, Federal State Educational Institution of Higher Education "Moscow State Technological University " STANKIN ", Russia, Moscow
tel.: +7 (905) 511 99 37,
E-mail: grishena@mail.ru