

УДК 519.876.5

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ПРЕДИКТИВНЫЕ ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ В ВИРТУАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ

Борисенок С.В., Тявловский А.К.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

**Аннотация.** Проведено сравнение информационных и предиктивных цифровых двойников применительно к средствам измерений. В то время как в машиностроении наибольшее распространение получили информационные цифровые двойники, в приборостроении наиболее целесообразно и технически возможно создание предиктивных цифровых двойников средств измерений. Их внедрение послужит развитию новой перспективной области, которую можно охарактеризовать как «виртуальные измерения».

**Ключевые слова:** цифровые двойники, прогнозирование, математические модели, виртуальные измерения.

## INFORMATION AND PREDICTIVE DIGITAL TWINS IN VIRTUAL MEASUREMENTS

Borisenok S.V., Tyavlovsky A.K.

Belarusian National Technical University  
Minsk, Republic of Belarus

**Abstract.** Informational and predictive digital twins are compared in relation to measuring instruments. While information digital twins are most widespread in mechanical engineering, in instrument engineering it is most expedient and technically possible to create predictive digital twins of measuring instruments. Their implementation will contribute to the development of a new promising area, which can be described as "virtual measurements".

**Key words:** digital twins, predicting, mathematical models, virtual measurements.

Адрес для переписки: Тявловский А.К., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь  
e-mail: tyavlovsky@bntu.by

Цифровой двойник (англ. *Digital Twin*) – цифровая копия физического объекта или процесса, помогающая оптимизировать эффективность управления этими объектами и процессами. Концепция «цифрового двойника» является частью четвертой промышленной революции и призвана помочь предприятиям быстрее обнаруживать физические проблемы, точнее предсказывать их результаты и производить более качественные продукты [1].

К настоящему времени сформировалось несколько классификаций цифровых двойников. В рамках цифровизации приборостроительной отрасли наибольший интерес представляет классификация по назначению, в соответствии с которой можно выделить следующие виды цифровых двойников [2]:

1. **Информационные** цифровые двойники синхронизируются со своим прототипом и передают оператору данные об объекте в реальном времени. Это нужно для своевременной диагностики, например, конвейера или автомобиля. Кроме 3D-моделей, в информационных цифровых двойниках используют *IoT*-датчики, которые устанавливаются непосредственно на сам объект.

Создание и использование информационных цифровых двойников требует оснащения объекта реального мира большим количеством датчиков, непрерывно регистрирующих и передающих зна-

чения параметров, включенных в цифровую модель объекта. Такой подход приемлем, когда в модели используется сравнительно небольшое количество параметров либо когда изначально высокая сложность объекта делает дополнительное усложнение его за счет установки датчиков сравнительно небольшим. Кроме того, сами габариты объекта должны позволять размещение необходимых датчиков без значительного увеличения веса и габаритов конструкции. В частности, такие цифровые двойники есть у каждого автомобиля *Tesla*. Датчики встроены в автомобиль и передают данные на завод, где искусственный интеллект решает, требуется машине техническое обслуживание или нет. Таким образом, часть ошибок компания может устранить удаленно.

2. **Предиктивные** цифровые двойники позволяют прогнозировать работу объекта во время эксплуатации и в разных ситуациях. С помощью предиктивных двойников можно спрогнозировать, при каких обстоятельствах объект выйдет из строя. В этом случае наличие *IoT*-датчиков позволяет повысить достоверность прогнозирования за счет наличия обратных связей от реального объекта, однако не является безусловно обязательным. При наличии полной математической модели объекта, учитывающей как его собственные параметры, так и влияние внешних факторов, прогнозирование поведения реального объекта с

использованием предиктивного цифрового двойника может осуществляться путем ввода в эту модель данных от независимых (не связанных с объектом) датчиков параметров окружающей среды либо прогнозных (модельных) значений этих параметров, тогда как в качестве собственных параметров объекта подставляются параметры цифрового двойника.

3. **Операционные** цифровые двойники помогают смоделировать бизнес-процессы компании и решать управленческие задачи.

Независимо от вида деятельности можно выделить несколько ключевых задач, которые помогают решать виртуальные двойники. К этим задачам относятся:

1. Повышение эффективности бизнеса (производства).
2. Обеспечение безопасности.
3. Экономия ресурсов.

Повышению эффективности способствует в первую очередь применение предиктивных цифровых двойников, позволяющих отслеживать состояние оборудования в реальном времени и заблаговременно предугадывать сбой или поломку. Это позволяет осуществлять эксплуатацию оборудования «по состоянию», не прибегая к планово-предупредительным ремонтам, сопровождающимся простоями оборудования, и при этом осуществлять ремонты как предупредительные, а не по факту выхода оборудования из строя, тем самым избегая дополнительных потерь при внезапных поломках.

Безопасность обеспечивается в первую очередь информационными цифровыми двойниками, позволяющими удаленно контролировать параметры потенциально опасного объекта или производства, в том числе непосредственно в ходе развития аварийной ситуации без риска для персонала.

Экономия ресурсов обуславливается в первую очередь возможностью предварительного тестирования изменений, вносимых в конструкцию или технологический процесс, без вмешательства в функционирование реального объекта. Это позволяет отбросить неэффективные решения, в том числе те, где неэффективность связана с долговременными последствиями изменений, до внесения реальных изменений в процесс или конструкцию, а также внедрять уже отлаженные на цифровом двойнике изменения без переходного периода.

Создание цифрового двойника измерительного прибора требует учета параметров большого количества элементов, составляющих измерительный тракт, причем в большинстве случаев для каждого из компонентов требуется учет более, чем одного параметра. В то же время математические модели, описывающие поведение каждого компонента и их взаимное влияние основаны на

известных физических законах и хорошо отработаны. С учетом этого, на современном уровне развития технологий создание полноценных информационных цифровых двойников измерительных приборов не представляется возможным из-за необходимости учета чрезмерно большого количества параметров в компактной конструкции. Напротив, создание предиктивных цифровых двойников на основе математической модели прибора и без обратных связей с реальным объектом или с минимальным количеством таких связей не только возможно, но и высоко актуально, поскольку такие двойники позволяют повысить эффективность использования приборов. Не в последнюю очередь это связано с тем, что большинство отказов средств измерений являются т. н. метрологическими отказами, при которых каждый из узлов прибора в отдельности сохраняет свою работоспособность, однако метрологические характеристики средства измерений в целом выходят за пределы допускаемых значений [3]. На реальном приборе такие отказы выявляются только в ходе его поверки, при этом невозможно определить, как долго в течение межповерочного интервала прибор эксплуатировался с метрологическим отказом. Использование предиктивного цифрового двойника позволит не только предсказать метрологический отказ до момента (либо в момент) его наступления, но и определить его причины и способы устранения. В последнем случае перспективным является также использование упомянутого выше подхода, применяемого в настоящее время только к информационным цифровым двойникам и предусматривающего использование искусственного интеллекта для распознавания отказа и необходимости мер по его устранению. Задача определения метрологического отказа и степени его критичности относится к классу многофакторных неформализуемых задач, для которых эффективны нейросетевые методы решения [4].

Таким образом, создание цифровых двойников средств измерений составляет актуальную задачу метрологии, которую можно отнести к отдельной новой области «виртуальных измерений», и решение которой может быть получено в форме предиктивных цифровых двойников, в максимальной степени использующих виртуальные модели приборов и их компонентов и нейросетевые методы анализа метрологических отказов.

#### Литература

1. Цифровой двойник [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A6%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B9%20%D0%B4%D0%B2%D0%BE%D0%B9%D0%BD%D0%B8%D0%BA#0>.
2. Гумаров, С. Что такое цифровые двойники и где их используют [Электронный ресурс] / С. Гумаров,

А. Крылов. – Режим доступа: <https://secrets.tinkoff.ru/razvitie/digital-twin/>.

3. Метрология. Основные термины и определения: РМГ 29-2013 ГСИ. – 2013.

4. Samarasinghe, S. Neural Networks for Applied Sciences and Engineering / S. Samarasinghe. – Boca Raton, FL: Auerbach Publications, 2006. – 570 p.

УДК 519.876.5

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ В ПРИБОРОСТРОЕНИИ

Борисенок С.В., Тявловский А.К.

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

**Аннотация.** Рассмотрена сущность цифровых двойников технических изделий и устройств, предъявляемые к ним требования и современное применение цифровых двойников в промышленности. К настоящему времени сформирована необходимая база для создания цифровых двойников средств измерений, однако дальнейшая цифровизация приборостроения сдерживается необходимостью решения многофакторной задачи моделирования взаимодействия электрических, механических и тепловых процессов в приборах, что является темой дальнейших исследований.

**Ключевые слова:** цифровые двойники, приборостроение, цифровизация, виртуальные модели.

## PROSPECTIVE APPLICATIONS OF DIGITAL TWINS IN INSTRUMENTATION ENGINEERING

Borisenok S.V., Tyavlovsky A.K.

*Belarusian National Technical University  
Minsk, Republic of Belarus*

**Abstract.** The essence of digital twins of technical items and devices, the requirements for them and the modern use of digital twins in industry are considered. To date, the necessary basis for creating digital twins of measuring instruments has been formed. However, further digitalization of instrumentation engineering is hampered by the need to solve the multifactor problem of modeling the interaction of electrical, mechanical and thermal processes in measuring devices, which is a topic for further research.

**Key words:** digital twins, instrumentation engineering, digitalization, virtual models.

*Адрес для переписки: Тявловский А.К., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь  
e-mail: tyavlovsky@bntu.by*

Цифровой двойник позволяет смоделировать внутренние процессы, технические характеристики и поведение физического объекта на этапе проектирования. За счет этого источники ошибок или сбоев можно выявить и устранить еще до начала реальной эксплуатации. Это также позволяет экономить время и даже самые сложные производственные маршруты рассчитывать быстро, тестировать и программировать с минимумом затрат и усилий. Более того, на протяжении всего жизненного цикла модель непрерывно генерирует данные о состоянии своего физического аналога, то есть ведет постоянный мониторинг состояния оборудования и производственных систем. Цифровой двойник должен видеть, то есть распознавать, внутренние и внешние изменения, происходящие в изделии. Он должен уметь анализировать совокупность всех факторов и предлагать готовые сценарии развития ситуации, а также управлять процессом, в том числе без вмешательства.

Области использования цифровых двойников обширны. На основании архивных документов

создаются 3D-модели утраченных памятников архитектуры. Но наибольшее распространение на данном этапе технология получила в промышленности, поскольку именно цифровые двойники позволяют кардинально оптимизировать все процессы в производственно-сбытовой цепочке.

Значимость технологии цифровых двойников осознают в горнодобывающей промышленности. Один из свежих проектов – создание цифрового двойника поведения горных пород при бурении [1]. Это не только позволяет собирать и эффективно применять данные о работе оборудования, но и создает возможности для моделирования и прогнозирования работы объектов в различных условиях и режимах. Курс на цифровизацию держит и сектор машиностроения. Ученые моделируют процесс взаимодействия химических элементов. Например тех, из которых состоят сверхкрупные шины для БЕЛАЗа, чтобы они получились прочными и долговечными.

Технология виртуальных двойников также используется для моделирования различных составляющих и деталей.