

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ ПО ПРОФИЛАКТИЧЕСКОМУ ТЕХНИЧЕСКОМУ ОБСЛУЖИВАНИЮ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЮ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

LITERATURE REVIEW ON PREDICTIVE MAINTENANCE BASED ON DIGITAL TWINS AND ITS APPLICATION IN INTELLIGENT MANUFACTURING

**Sultan Nebras
V. Petrov**

Summary. The rapid development in the manufacturing industries makes predictive maintenance more important, as traditional predictive maintenance cannot meet the current stage's needs in many cases. With the increasing introduction of digital twins in the industry, predictive maintenance based on digital twins has become a very significant research point in the manufacturing sector. This article presents research on the general methods of digital twin technology and predictive maintenance technology. It analyzes the research gap between them and highlights the importance of using digital twin technology to achieve predictive maintenance. Secondly, this article presents the application of digital twins in smart manufacturing and discusses the limitations, challenges, and opportunities for increasing reliance on digital twins in predictive maintenance.

Keywords: digital twins, predictive maintenance, fault prediction, smart manufacturing, fault diagnosis.

Султан Небрас

аспирант, Московский государственный
технологический университет «СТАНКИН»
nebras.sultan88@gmail.com

Петров Валерий Евгеньевич

Кандидат технических наук, доцент, преподаватель,
Московский государственный технологический
университет «СТАНКИН»
cu58@mail.ru

Аннотация. Быстрое развитие в производственных отраслях делает предиктивное обслуживание более важным, так как традиционное предиктивное обслуживание во многих случаях не может удовлетворить потребности текущего этапа. С увеличением внедрения цифровых двойников в промышленности предиктивное обслуживание на основе цифровых двойников становится очень значимой областью исследований в производственном секторе. В данной статье представлены исследования общих методов технологии цифровых двойников и технологии предиктивного обслуживания. Анализируется разрыв в исследованиях между ними и подчеркивается важность использования технологии цифровых двойников для достижения предиктивного обслуживания. Во-вторых, в статье представлено применение цифровых двойников в умном производстве и обсуждаются ограничения, вызовы и возможности для увеличения зависимости от цифровых двойников в предиктивном обслуживании.

Ключевые слова: цифровые двойники, предиктивное обслуживание, прогнозирование неисправностей, умное производство, диагностика неисправностей.

Введение

В передовых и сложных отраслях, которые содержат множество машин и оборудования в производственном процессе, ремонт и обслуживание машин и оборудования являются очень важными.

Метод последующего обслуживания, который зависит от регулярной проверки состояния оборудования и машин и ремонта их неисправностей, является одним из методов, которые напрямую влияют на время работы и эффективность труда, поэтому был предложен метод предиктивного обслуживания.

Метод предиктивного обслуживания зависит от исторических данных, моделей и схем машин и их характеристик, с помощью которых можно прогнозировать работу оборудования и машин, а также прогнозировать неис-

правности, тем самым улучшая процесс принятия решений по обслуживанию и снижая риск отказов и простоев.

Для производственных компаний использование технологии предиктивного обслуживания позволяет избежать простоев, устранять неисправности, максимизировать время работы, повышать эффективность труда, снижать затраты на обслуживание и улучшать экономические показатели.

Хотя все больше и больше промышленных компаний осознают преимущества предиктивного обслуживания, на сегодняшний день лишь немногие компании внедрили предиктивное обслуживание, все еще существует большая зависимость от последующего обслуживания и профилактического обслуживания, что приводит к избыточности в значительных масштабах. Эта ситуация в основном связана с недостаточной точностью, на-

дежностью и адаптивностью метода предиктивного обслуживания. Исследователи работали над поиском подходящих способов решения этих проблем, анализируя технические характеристики и примеры применения, чтобы помочь в предиктивном обслуживании, улучшить недостатки на уровне диагностики и прогнозирования ошибок и своевременно принимать решения по обслуживанию [1].

Цифровой двойник и предиктивное обслуживание

В этом разделе мы главным образом рассматриваем общие методы цифрового двойника и предиктивного обслуживания, определяем разрыв в исследованиях между этими двумя технологиями и указываем на важность исследования метода предиктивного обслуживания на основе цифрового двойника.

1. Метод цифрового двойника:

Цифровой двойник представляет собой динамическую модель, которая постоянно обновляется и изменяется вместе с изменениями физических объектов, и представляет состояние оборудования, рабочие условия, геометрию и состояние ресурсов в виде синхронизации данных. При создании цифрового двойника обычно включаются следующие три части:

Информационная модель: информационная модель физического объекта относится к абстрагированию характеристик физического объекта и построению информационной модели о нем. Информационная модель обычно включает в себя модель внешнего вида и модель механизма физического объекта. Без информационной модели, описывающей особенности физического объекта, данные, передаваемые в киберпространство, теряют свой смысл и контекст [4].

Механизм связи: для создания цифрового двойника ключевым моментом является механизм передачи данных между цифровым объектом и физическим объектом. В физическом пространстве синхронизация состояния между цифровым объектом и физическим объектом зависит от двусторонней передачи данных в реальном времени. Система цифрового двойника чувствует параметры состояния и параметры производительности физического объекта с помощью высокоточного оборудования для сбора информации (таких как датчики) и реализует сбор и передачу данных в реальном времени [4].

Обработка данных: сложная система имеет множество параметров оборудования и большую избыточность данных, и эти параметры обладают сильной связностью, нелинейностью и временной изменчивостью, что напрямую влияет на качество данных. Технология цифрового двойника использует различные технологии

обработки данных, такие как большие данные, для хранения, отбора, обработки и взаимодействия с данными в реальном времени, чтобы эффективно оценивать и обрабатывать изменения внешней среды. Как применить алгоритмы искусственного интеллекта к технологии анализа больших данных, является ключом к дальнейшей реализации обработки и моделирования больших данных [5].

2. Метод предиктивного обслуживания:

Конкретное содержание предиктивного обслуживания обычно включает мониторинг состояния оборудования, диагностику неисправностей, прогнозирование остаточного срока службы и принятие решений по обслуживанию.

В области производства Ван [7] предложил функциональную модель системы предиктивного обслуживания, которая включает:

Предиктивное обслуживание, определяемое моделью, включает сбор и обработку данных, идентификацию состояния, идентификацию и локализацию неисправностей, прогнозирование здоровья, управление обслуживанием и выполнение обслуживания.

- *Сбор и обработка данных:* Основное оборудование для сбора и обработки данных состоит из датчиков и сборщиков данных. Датчик в основном используется для сбора информации о состоянии и процессе оборудования и связанной среды, а сборщик данных — для предоставления информации о процессе оборудования на производственной площадке.
- *Идентификация состояния:* Идентификация состояния означает агрегацию данных о характеристиках состояния и пороговое суждение с помощью анализа признаков для получения текущего состояния оборудования. Идентифицированное состояние оборудования используется в качестве входных данных для прогнозирования состояния, чтобы обеспечить основу для диагностики неисправностей или прогнозирования здоровья. Перед идентификацией состояния требуется предварительная обработка данных и анализ признаков собранных данных.
- *Идентификация и локализация неисправностей:* Диагностика неисправностей включает метод, основанный на модели механизма, и метод, основанный на данных. Метод, основанный на модели механизма, заключается в создании имитационной модели на основе механических и электрических принципов самого оборудования. При возникновении неисправности остаточная величина, полученная в результате сравнения выходных

данных и модели, основанной на выходных данных в нормальных условиях, используется для определения различных режимов неисправности и уровней неисправности [6].

- быть различенными в зависимости от входных данных в вышеуказанной модели [4].
- *Прогнозирование здоровья*: Прогнозирование здоровья заключается в использовании параметров состояния и характеристических сигналов для оценки состояния здоровья и будущей тенденции изменений оборудования на основе различных методов анализа и моделей прогнозирования, а также прогнозирования тенденции неисправностей и здоровья до их возникновения. В литературе [9] систематически обобщены приложения предиктивного обслуживания в индустрии 4.0, и указывается, что текущие методы обнаружения и прогнозирования неисправностей оборудования в основном включают алгоритмы, основанные на моделях, и алгоритмы, основанные на данных.
- *Управление обслуживанием и выполнение обслуживания*: Интеллектуальное принятие решений по обслуживанию. Управление обслуживанием интеллектуального производственного оборудования заключается в разработке соответствующей стратегии обслуживания путем комбинирования выходных результатов прогнозирования состояния здоровья с управлением оборудованием предприятия на основе полного учета безопасности и затрат.

3. Анализ разрыва в исследованиях между двумя направлениями:

Подводя итоги, при возникновении неисправности оборудования предиктивное обслуживание акцентирует внимание на анализе состояния оборудования, прогнозировании его неисправностей и вспомогательном принятии решений. Достаточное количество практических случаев показывает, что традиционное предиктивное обслуживание может описывать динамический процесс только в рамках определенного пространственного и временного масштаба и не может осуществлять долгосрочное динамическое обслуживание. Цифровой двойник акцентирует внимание на симуляции состояния оборудования. Цифровой двойник имитирует работу оборудования, собирает данные об оборудовании, которые динамически изменяются со временем, и может предоставлять более интеллектуальное приложение обслуживания по сравнению с предиктивным обслуживанием, что позволяет реализовать долгосрочное динамическое обслуживание оборудования. Можно сказать, что основная идея цифрового двойника способствует эволюции модели предиктивного обслуживания.

4. Важность предиктивного обслуживания на основе цифровых двойников:

Анализируя разрыв между предиктивным обслуживанием и цифровыми двойниками в предыдущем разделе, в этом разделе будет объяснена важность использования технологии цифровых двойников для реализации предиктивного обслуживания с учетом этих разрывов.

Важность предиктивного обслуживания для производственных и других отраслей широко признана. В то же время это также ключ к обеспечению эффективного и устойчивого обслуживания оборудования. Однако, из-за недостатков предиктивного обслуживания, не так много предприятий [1]. В настоящее время основными режимами обслуживания остаются последующее обслуживание и крупномасштабное избыточное профилактическое обслуживание [3]. В то же время рост технологии цифровых двойников является новой возможностью для традиционных отраслей и новым трендом взаимной интеграции технологий в различных отраслях. Цифровой двойник сделал достаточное количество попыток в промышленности. С 2004 года многие крупные компании в отрасли начали использовать технологию цифровых двойников для выполнения множества полезных попыток в проектировании продукции, производстве, обслуживании и других аспектах. Сочетание цифрового двойника и предиктивного обслуживания также является новым трендом, возникающим в последние годы. Использование технологии цифрового двойника может хорошо решить проблему недостатков предиктивного обслуживания.

В наши дни требования к непрерывности работы промышленного оборудования становятся все выше. Внезапная остановка из-за отказа оборудования будет влиять на непрерывность производства и снижать его эффективность. С точки зрения экономических выгод, бесплечное обслуживание и регулярное обслуживание в традиционной модели обслуживания будут влиять на производственную эффективность и качество продукции, а также значительно увеличивать затраты производителей. По сравнению с традиционной моделью обслуживания, предиктивное обслуживание может улучшить производительность за счет повышения доступности и качества оборудования, продлить срок службы оборудования и снизить сложность обслуживания и затраты на его выполнение.

Характеристика предиктивного обслуживания на основе цифровых двойников

В этом разделе мы сначала опишем уникальные характеристики метода предиктивного обслуживания на основе цифрового двойника.

1. Восприятие в реальном времени:

Восприятие в реальном времени является основой для построения модели цифрового двойника оборудования. По сравнению с традиционным предиктивным обслуживанием, ключевое отличие предиктивного обслуживания на основе цифровых двойников заключается в способности к восприятию, регулированию и прогнозированию в реальном времени. Конкретно, построение виртуальных цифровых двойников предоставляет множество преимуществ для предиктивного обслуживания на основе цифровых двойников:

1. Высокая интерактивность данных в реальном времени
2. Восприятие всех факторов в реальном времени
3. Способность к интеллектуальному принятию решений
4. Моделирование множества сценариев применения в реальном времени

2. Высокоточная модель:

Высокоточная модель — это подготовка данных для построения модели цифрового двойника оборудования. Отличные высокоточные модели могут сделать результаты симуляции ближе к поведению реальных устройств.

3. Прогнозирование с высокой степенью уверенности:

Прогнозирование с высокой степенью уверенности является основной функцией цифровых двойников. После завершения высокоточной модели цифровой двойник может коррелировать данные инспекций и измерений, ключевые параметры технического состояния и т. д., и проводить анализ прогнозирования состояния физического оборудования на основе физической модели и модели анализа, основанной на данных, таких как мониторинг состояния здоровья оборудования, прогнозирование оставшегося полезного срока службы и прогнозирование неисправностей.

3.1. Обнаружение и прогнозирование неисправностей:

Обнаружение неисправностей и прогнозирование неисправностей являются функциональными модулями системы и оценкой состояния системы. Они используются для описания состояния здоровья системы, включая наличие неисправностей в системе или вероятность будущих отказов, серьезность неисправностей и т. д.

В настоящее время методы прогнозирования неисправностей оборудования в основном включают две категории: первая — это алгоритм, основанный на модели, вторая — алгоритм, основанный на данных [6]. Лин предложил это.

3.2. Прогнозирование остаточного ресурса:

Прогнозирование остаточного ресурса основано на данных системы и связанных технологиях, чтобы точно предсказать возможные отказы и местоположения неисправностей системы в течение определенного периода времени в будущем и точно предсказать оставшийся срок службы компонентов системы. Прогнозирование остаточного ресурса помогает вовремя принимать меры по ремонту неисправных компонентов для обеспечения нормальной работы системы и успешного выполнения задач. С точки зрения виртуального моделирования, управляемого цифровым двойником, прогнозирование остаточного ресурса включает методы без глубокого обучения и методы глубокого обучения. Методы без глубокого обучения включают процесс Винера, скрытую марковскую модель, регрессионную модель и т. д. Методы глубокого обучения включают глубокие нейронные сети, сверточные нейронные сети и т. д. В настоящее время промышленность в основном сосредоточена на исследовании динамических байесовских алгоритмов и алгоритмов глубокого обучения. Айвалиотис и др. [2] описывают методы и механизмы, разработанные и оцененные для прогнозирования остаточного ресурса. Расчет остаточного ресурса интегрирован в общую структуру, называемую «инструмент прогнозирования поведения машины для приложений обслуживания». Анис и др. [3] расширяют технологию долгосрочной и краткосрочной памяти для создания высокоточного и низко ошибочного прогнозирования остаточного ресурса в рамках цифрового двойника. Сюй и др. [4] реализуют мониторинг в реальном времени и предиктивное обслуживание с помощью двухэтапного метода диагностики неисправностей цифрового двойника на основе глубокого переносного обучения, перенося предварительно обученную модель диагностики из виртуального пространства в физическое.

3.3. Прогнозирование потребностей в обслуживании и затрат на обслуживание:

В сочетании с цифровым двойником можно также проводить анализ потребностей и прогнозирование затрат на процесс обслуживания. Цифровой двойник может выполнять все процессы в запланированной задаче, прогнозировать потребности в обслуживании и затраты на оборудование в этот период и планировать последующие задачи и затраты. Лу и др. [4] используют технологию компьютерного моделирования для снижения производственных и испытательных затрат, чтобы модель цифрового двойника обладала способностью к диагностике неисправностей и оптимальному проектированию. Хайм и др. [5] могут оценить потребности в поддержке формирования, моделируя цифровые двойники каждого самолета в формировании. Деятельность по техническому обслуживанию и замене компо-

нентов может быть отражена через обновление данных цифрового двойника для реализации управления конфигурацией одного самолета.

Области применения

Предиктивное обслуживание на основе цифровых двойников может быть применено в различных областях. В этом разделе будут представлены и обсуждены некоторые представительные области.

1. Интеллектуальное производство:

В области производства цифровые двойники могут всесторонне улучшить эффективность производственного процесса и работу производственной линии путем моделирования и прогнозирования всех аспектов изготовления оборудования и производственного цикла. В производственном сценарии производственную линию можно разделить на две части: пространственное измерение и временное измерение из разных измерений. Для различных уровней строятся соответствующие виртуальные модели в информационном мире, моделируется состояние работы оборудования, мониторится состояние работы производственного оборудования и процесса во взаимодействии с целевой системой, и проводится анализ, прогнозирование и принятие решений [[8], [5]]. Интеллектуальное производство постепенно становится актуальным в текущем технологическом развитии. Это производственная парадигма, направленная на оптимизацию распределения ресурсов. Она обладает характеристиками реального времени анализа, интеллекта, точности и гибкости восприятия состояния рынка и клиентов в реальном времени. Производство переходит от массового производства к индивидуализированному производству.

1.1. Технологическое оборудование

С быстрым распространением цифровых технологий в производстве объем данных, генерируемых промышленными объектами, стал больше, чем когда-либо прежде. Для полного использования большого количества доступных данных о процессах и оборудовании в современных промышленных комплексах очень важно разработать стратегию управления здоровьем оборудования.

Станки с числовым программным управлением (ЧПУ), как основное оборудование в промышленности, являются важным производственным оборудованием. В настоящее время многие промышленные проекты нуждаются в высокоточных станках, состоящих из сотен компонентов. Компоненты станков необходимо мониторить и обслуживать, чтобы избежать отказов, влияющих на эффективность работы. Для обеспечения непрерывной работы производственной линии необходимо пони-

мать состояние каждого станка и его компонентов. Если неисправность не будет устранена своевременно, это может привести к потере точности и повлиять на производство. Луо и др. [6] изучили гибридный метод, управляемый цифровыми двойниками. Этот метод представляет собой гибридный метод предиктивного обслуживания, основанный на моделях цифровых двойников и данных, используемых в цифровых двойниках. Было исследовано применение этого метода для прогнозирования срока службы инструмента. Айвалиотис и др. [6,2] используют цифровые двойники для расчета оставшегося срока службы механического оборудования на основе физической модели, чтобы мониторить и прогнозировать состояние машины через моделирование. Если состояние каждого оборудования известно в любое время, план обслуживания будет легче составить. Буусе и др. [3] не полагаются на исторические данные об отказах для оценки состояния активов, а используют глубокие цифровые двойники для отслеживания деградации активов и различия режимов отказов в стационарных и нестационарных условиях работы. Кроме того, из-за сложного дизайна современных машин создание цифровых моделей может быть сложной задачей. Айвалиотис [5] предлагает метод, основанный на передовом физическом моделировании. Согласно методу, предложенному в статье, пользователи могут определять, создавать и использовать цифровую модель ресурсов.

1.2. Управление жизненным циклом продукта:

Сервис онлайн-мониторинга состояния и управление жизненным циклом продукта становятся все более важными для продления срока службы системы и раннего обнаружения неисправностей. В последние годы предприятия уделяют все больше внимания управлению качеством продукции. Управление жизненным циклом продукта и онлайн-мониторинг состояния продукта, реализованные с помощью цифрового двойника, отвечают этим требованиям. Халил и др. [3] представляют приложение, которое получает данные о работе машины и обрабатывает их на платформе IIoT для оценки состояния системы и визуализации результатов в пользовательском интерфейсе с дополненной реальностью. Хан [4] считает, что самостоятельное обслуживание является основным направлением текущих исследований и разработок, и обсуждает роль цифровых двойников как инструмента для принятия решений.

1.3. Диагностика неисправностей:

Диагностика неисправностей на основе технологии цифровых двойников предлагает новую парадигму для интеллектуального производства. Традиционный метод диагностики неисправностей на основе данных обычно предполагает, что обучающие и тестовые данные подчиняются одному и тому же распределению, что нереа-

листично в реальном производственном процессе, который является динамическим. В этой ситуации модели с различными уровнями детализации анализа должны сосуществовать, взаимодействовать и поддерживать взаимную согласованность. Чимино и др. [5] предлагают метод моделирования для решения проблемы несоответствия динамических моделей в случае виртуального и реального взаимодействия, и приводят пример поддержки на основе объектно-ориентированного языка моделирования. Одновременно динамичность среды системы может сделать основную модель непригодной для меняющейся реальности и, таким образом, ослабить весь подход. Объединяя расчет вероятности обнаружения с установленным методом управления процессом, Борс и Гервен [8] предлагают метод обнаружения нарушений пространства работы цифровых двойников и аналогичных технологий, а также локализуют необходимые обновления для обеспечения эффективного обслуживания модели. Ватхупан и др. [9] вводят новый модульный метод корректирующего обслуживания, который использует цифровой двойник модуля автоматизации. С помощью своего цифрового двойника и связанного с ним визуального интерфейса он предоставляет поддержку по установлению причин неисправностей для технических специалистов, выполняющих корректирующие операции по обслуживанию модулей автоматизации.

Научное обсуждение темы

Мы продемонстрировали уникальные характеристики и потенциал предиктивного обслуживания на основе технологии цифровых двойников. Однако превращение концепции предиктивного обслуживания на основе цифровых двойников в практическую систему сталкивается с рядом вызовов. В этом разделе мы суммируем ключевые технические вызовы и исследовательские возможности в этой новой области. В будущем цифровые двойники будут развиваться в трех направлениях: общая платформа, полный жизненный цикл и интеграция. Согласно обзору литературы, существует значительное количество исследований, касающихся вызовов использования моделей цифровых двойников для обслуживания и прогнозирования срока службы. Однако до сих пор отсутствует общая платформа для создания физических моделей с использованием общих методов. Более конкретно, для обслуживания производственного предприятия внедрение технологии цифровых двойников требует создания цифровой модели для каждой машины. Из-за различных типов машин, включенных в производственное предприятие, каждый цифровой двойник нужно строить независимо, что усложняет общий процесс обслуживания. Таким образом, необходимо определить общую структуру для создания цифровых двойников. В настоящее время нет стандартной структуры цифрового двойника, которая могла бы адаптироваться

к различным производственным системам, и нет общей методики разработки и внедрения концепции цифрового двойника. Следовательно, создание общей структуры для цифровых двойников является вызовом для развития предиктивного обслуживания на основе цифровых двойников.

Концепция проектирования цифрового двойника предполагает моделирование всего жизненного цикла оборудования. Однако на данном этапе исследования цифрового двойника оборудования в основном сосредоточены на стадии проектирования оборудования или послепродажного обслуживания и редко касаются стадии производства оборудования. Можно ожидать, что исследования и применение цифрового двойника оборудования на стадии производства оборудования станут горячей точкой в будущем. Этот вид исследований может дополнить пробел в оптимизации всего плана обслуживания с точки зрения всего процесса. Кроме того, одним из вызовов цифрового двойника является определение оптимального уровня детализации и различных связей при создании моделей цифровых двойников.

Заключение

Мы представили метод предиктивного обслуживания на основе цифрового двойника (predictive maintenance based on digital twins), который использует технологию цифровых двойников для устранения недостатков традиционного предиктивного обслуживания. Метод предиктивного обслуживания на основе цифрового двойника обладает тремя уникальными характеристиками: восприятие в реальном времени, высокоточная модель и высоконадежное моделирование и прогнозирование. Проанализировав роль традиционного предиктивного обслуживания и цифровых двойников, мы выделили основные характеристики, включая высокую интерактивность данных в реальном времени, восприятие всех факторов в реальном времени, интеллектуальные способности принятия решений, моделирование в реальном времени для различных сценариев применения, высокоточную виртуальную модель, слияние мультифизических моделей, обнаружение и прогнозирование неисправностей, прогнозирование остаточного срока службы, анализ потребностей в обслуживании и прогнозирование затрат на обслуживание.

Предиктивное обслуживание на основе цифровых двойников будет способствовать развитию и совершенствованию многочисленных областей применения, таких как интеллектуальное производство, энергетическая промышленность, умные здания и т. д. На основе анализа существующих систем и выявленных характеристик мы предложили референсную структуру для создания системы предиктивного обслуживания на основе цифровых двойников в производственной отрасли. Эта

структура может быть успешно применена для промышленных роботов и более крупных областей применения. В заключение мы определили несколько ключевых вызовов и исследовательских возможностей для предиктивного обслуживания на основе цифровых двойников.

Этот обзор литературы закладывает фундамент для дальнейших исследований по углублению зависимости от предиктивного обслуживания на основе цифровых двойников в умных индустриях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cheng J. et al. DT-II: Digital twin enhanced Industrial Internet reference framework towards smart manufacturing //Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. — 2020. — Т. 62. — С. 101881.
2. Li X. et al. Framework for manufacturing-tasks semantic modelling and manufacturing-resource recommendation for digital twin shopfloor //Journal of Manufacturing Systems. — 2021. — Т. 58. — С. 281–292.
3. Qi Q. et al. Enabling technologies and tools for digital twin //Journal of Manufacturing Systems. — 2021. — Т. 58. — С. 3–21.
4. Wu J. et al. The development of digital twin technology review //2020 Chinese Automation Congress (CAC). — IEEE, 2020. — С. 4901–4906.
5. Liu M. et al. Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications //Journal of manufacturing systems. — 2021. — Т. 58. — С. 346–361.
6. Tao F. et al. Five-dimension digital twin model and its ten applications //Comput. Integr. Manuf. Syst. — 2019. — Т. 25. — №. 1. — С. 1–18.
7. Lu Y. et al. Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications, and research issues //Robotics and computer-integrated manufacturing. — 2020. — Т. 61. — С. 101837.
8. Wang C., Wang C., Wang K. Technology research and standard development of predictive maintenance for intelligent manufacturing equipment //China Standardization Journal. — 2021. — Т. 7.
9. Huang J. et al. The application of digital twin on power industry //IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — IOP Publishing, 2021. — Т. 647. — №. 1. — С. 012015.

© Султан Небрас (nebras.sultan88@gmail.com); Петров Валерий Евгеньевич (cu58@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»