

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-631578>

Оригинальное исследование



Постановка задачи диагностики неисправностей и анализа эксплуатации пневмогидравлических приводов с пневмогидравлическим мультипликатором давления на основе модели цифрового двойника

Н.С. Кривошеев, А.А. Жарковский, Л.А. Коткас

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье рассматривается концепция использования цифрового двойника для диагностики неисправностей и анализа эксплуатации пневмогидравлических приводов с пневмогидравлическим мультипликатором давления. Эта инновационная технология позволяет проводить более точные и эффективные проверки систем, что способствует повышению надёжности и безопасности оборудования. Цифровой двойник предоставляет возможность создания виртуальной модели системы, которая может использоваться для симуляции различных сценариев работы и выявления потенциальных проблем.

Цель исследования — повышение эффективности обнаружения неисправностей и оптимизации работы пневмогидравлических приводов с использованием инновационного подхода на базе цифрового двойника.

Материалы и методы. Для успешной реализации данного подхода используются современные методы анализа данных, математическое моделирование и алгоритмы машинного обучения. При этом особое внимание следует уделить точности данных, получаемых от датчиков, а также качеству программного обеспечения для создания модели цифрового двойника.

Результаты. Использование цифрового двойника обеспечивают надёжное обнаружение неисправностей. Результаты концепции показывают эффективность и точность процесса. Это инновационное решение повышает надёжность и продуктивность систем, сокращая время простоя оборудования.

Выводы. Модель цифрового двойника позволяет предвидеть отказы и повышает надёжность работы системы. Использование модели цифрового двойника улучшает производительность и снижает расходы на техническое обслуживание пневмогидравлических приводов.

Ключевые слова: цифровой двойник; пневмогидравлический привод; мультипликатор давления; цифровое управление; автоматизированный привод; гидравлический мультипликатор; пневмогидравлическая система; цифровая технология; инновационный привод; автоматизированный механизм; современная гидравлика; высокоточное управление давлением.

Как цитировать:

Кривошеев Н.С., Жарковский А.А., Коткас Л.А. Постановка задачи диагностики неисправностей и анализа эксплуатации пневмогидравлических приводов с пневмогидравлическим мультипликатором давления на основе модели цифрового двойника // Известия МГТУ «МАМИ». 2024. Т. 18, № 3. С. 203–211. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-631578>

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-631578>

Original Study Article

Setting up a problem of diagnostics of faults and analysis of the operation of pneumohydraulic drives with a pneumohydraulic booster based on the digital twin model

Nikita S. Krivosheev, Alexander A. Zharkovsky, Lyubov A. Kotkas

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: The paper considers the concept of using digital twins for diagnostics of faults and analysis of the operation pneumohydraulic drives with a pneumohydraulic booster. This innovative technology hel[s to conduct more accurate and efficient revisions of the systems which contributes to increase of reliability and safety of the equipment. The digital twin gives an opportunity to build the virtual model of the system, which can be used for simulation of various operation scenarios and for definition of potential issues.

AIM: Increasing the efficiency of definition of faults and optimization of operation of pneumohydraulic drives using the innovative approach on the basis of the digital twin.

METHODS: For the successful implementation of this approach, the modern data analysis methods, mathematical modeling and machine learning algorithms were used. A special attention should be paid to accuracy of the data obtained from the sensors as well as to quality of the software for the digital twin model development.

RESULTS: The use of the digital twin ensures reliable definition of faults. The results of the concept prove efficiency and accuracy of the process. This innovative solution increases reliability and productiveness of the systems, cutting the breakdown time of the equipment.

CONCLUSION: The digital twin model helps to forecast faults and increases the reliability of the system operation. The use of the digital twin model improves performance capacity and reduces costs of maintenance of pneumohydraulic drives.

Keywords: digital twin; pneumohydraulic drive; booster; digital control; automatized drive; hydraulic booster; pneumohydraulic system; digital technology; innovative drive; automatized mechanism; modern hydraulics; high-accuracy pressure control.

To cite this article:

Krivosheev NS, Zharkovsky AA, Kotkas LA. Setting up a problem of diagnostics of faults and analysis of the operation of pneumohydraulic drives with a pneumohydraulic booster based on the digital twin model. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2024;18(3):203–211. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-631578>

Received: 03.05.2024

Accepted: 22.11.2024

Published online: 22.11.2024

ВВЕДЕНИЕ

Цифровой двойник пневмогидравлического привода — это виртуальная модель или дубликат реального пневмогидравлического привода, созданный с использованием цифровых технологий и данных. Он представляет собой точное или приближённое отображение физических характеристик и поведения гидросистемы в цифровой форме. Значение цифровизации и инноваций имеет существенный инвестиционный потенциал, представляет интерес как дополнительный источник доходов в первую очередь именно для отечественных промышленных предприятий [1].

Цифровой двойник пневмогидравлического привода может быть создан с помощью различных методов, таких как математическое моделирование, компьютерная симуляция и сбор данных с реального гидравлического привода. Он включает в себя информацию о геометрии, материалах, компонентах и параметрах работы гидравлического привода. Одним из преимуществ использования цифрового двойника гидравлического привода является возможность проведения виртуальных испытаний и оптимизации его работы до физической реализации. Это позволяет сократить время и затраты на разработку и испытания гидравлического привода, а также улучшить его производительность и надёжность. Кроме того, цифровой двойник гидравлического привода может использоваться для мониторинга и диагностики реального гидравлического привода в режиме реального времени. Он позволяет отслеживать состояние и работу гидросистемы, выявлять потенциальные проблемы и предотвращать возможные отказы или поломки. Применение цифровых двойников гидравлического привода может значительно улучшить эффективность и надёжность работы гидросистемы, а также снизить потенциальные риски и затраты. Таким образом, цифровой двойник гидравлического привода позволяет создать виртуальное представление реальной гидравлической системы, обеспечивая возможность оптимизации его работы и предотвращения проблем до физической реализации.

Вопрос диагностики неисправностей и анализа эксплуатации пневмогидравлических приводов на основе модели цифрового двойника изучен недостаточно. В [13] рассматривается методика создания цифрового двойника кривошипного пресса для кузнечно-штамповочного производства. Элементы концепции цифрового двойника гидравлического привода рассматриваются в [14]. Обзор методов контроля состояния гидравлических приводов приведён в [15]. Однако данные работы не учитывают особенности рабочих процессов пневмогидравлических приводов. Актуальность внедрения цифровых технологий подтверждает растущий интерес к данной отрасли со стороны промышленных предприятий и профильных государственных учреждений [16].

Целью настоящей работы является составление концепции цифрового двойника пневмогидравлических

приводов с пневмогидравлическим мультипликатором давления для диагностики неисправностей, анализа эксплуатации и исследования рабочих процессов.

ОПИСАНИЕ И МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Пневмогидравлические приводы широко применяются в промышленном оборудовании благодаря возможности обеспечения плавного движения, возможно, создания высокого рабочего давления и общей простоты и компактности конструкции. Однако из-за неполной герметичности и конструктивных особенностей гидравлического и пневматического оборудования диагностика и прогнозирование неисправностей, как правило, являются сложными задачами. Существующие методы диагностики неисправностей и обслуживания пневмогидравлических приводов можно разделить на два типа: анализ режимов работы на основе математической модели и алгоритм машинного обучения на основе искусственного интеллекта. Первый метод может диагностировать только конкретные неисправности, основываясь на математической модели, которая не является универсальной, а второй должен полагаться на обширные исторические данные о неисправностях, которые невозможно получить на ранней стадии работы. Для решения этих проблем предлагается структура цифрового двойника, которая объединяет виртуальную модель с реальной частью для более реалистичного решения задач диагностики неисправностей в пневмогидравлическом приводе. Эта структура также расширяет функции прогнозирования неисправностей и отображения цифровой модели. Эффективность предлагаемой структуры иллюстрируется на примере исследования гидравлического цилиндра как типового исполнительного двигателя пневмогидравлического привода. При добавлении фактических данных о неисправностях точность диагностики может быть дополнительно улучшена.

С развитием экономики появился спрос на более быстрые, более эффективные, гибкие и точные системы. За последнее десятилетие был сделан большой шаг вперёд в области модернизации гидравлических компонентов и систем. Использование передовых компонентов в технологических системах ограничивается недостаточным взаимодействием компонентов внутри одной системы. Структура Индустрии 4.0 развивается с 2010 года, и благодаря основной идее сетевой гидравлики и интеллектуальной сети, отдельных интеллектуальных компонентов и систем, обеспечивающих высокоэффективную автоматизацию, становится ещё более важной с точки зрения самонастройки и самосознания самих систем [2], [17]. Это повышает гибкость гидравлических приводов в направлении умного производства. Часто используемые элементы умного производства — это интеллектуальные продукты, процессы и материалы, объединённые в интеллектуальную сеть киберфизических систем (Smart-NetCPS). Основными принципами интеллектуальной системы, являются:

- визуализация и аналитика данных;
- облачные технологии;
- интернет вещей (IoT);
- коммуникация в режиме реального времени;
- моделирование и симуляция процессов;
- компоненты с возможностью удалённой диспетчеризации (Smart components).

В автономной системе люди и интеллектуальные устройства связаны между собой через Интернет вещей (IoT). Благодаря стратегии сбора и анализа данных с течением времени система сама может прогнозировать поведение своих компонентов и подсистем, а также всей структуры системы. Анализ и оценка данных в облачном хранилище доказывают интеллект системы, которая способна прогнозировать и реагировать на сбои и проблемы на основе прошлых событий. Анализ данных осуществляется в общем облачном хранилище, подключённом к сети в режиме реального времени. В случае непредвиденных ситуаций автономная система вырабатывает решение, не останавливая машину. В процессе выполнения реального процесса параллельно выполняется имитационная модель процесса, отражённая в цифровой системе, корректирующая устройство и прогнозирующая будущие действия с использованием методов искусственного интеллекта. В зависимости от сложности рассматриваемого устройства или системы моделирование может выполняться в различных средах программирования. Существуют разные подходы к анализу цифровых двойников: в некоторых случаях аналитической методологии достаточно, но в большинстве случаев используются модели и моделирование в реальном времени. С помощью программ моделирования можно использовать методы конечных элементов для прогнозирования деформации твёрдых компонентов, например штока гидроцилиндров.

В современных системах основной задачей является обеспечение правильной связи между устройствами, управляющими и вычислительными элементами в информационной среде. Алгоритмы самообучения, разработанные на основе прошлого опыта, различают классическую и интеллектуальную систему. С помощью искусственного интеллекта система становится более полезной. Выбор элементов для любой автономной системы имеет решающее значение, поскольку он предполагает определённые методы измерения и параметры, причём последние должны иметь достаточную точность и надёжность. Однако параметры необходимо тщательно выбирать, так как в противном случае эффективность автономной системы с возможностью машинного обучения снижается. Предлагается концепция интеллектуального пневмогидравлического привода прессы. Киберфизическая система (CPS) состоит из нескольких подсистем, включая локальных цифровых агентов, которые принимают интеллектуальные решения на основе алгоритмов машинного обучения и улучшают процессы.

В цифровом двойнике пневмогидравлического привода происходит моделирование, симуляция и улучшение локальных подсистем. Чтобы определить реальное фактическое состояние процесса, необходимо учитывать различные модели. Стабильность процесса, деформация конструктивных элементов, изменение вязкости масла, влияние трения на гидроцилиндр, клапаны, мультипликатор давления — вот несколько возможных подсистем, которые могут быть включены в анализ моделирования для прогнозирования поведения системы. Благодаря интегрированным интеллектуальным датчикам исполнительным механизмам и возможностям отслеживания можно достичь надлежащего адаптивного управления.

СОСТАВЛЕНИЕ МОДЕЛИ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ПНЕВМОГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПРИВОДА

Устойчивость работы гидравлического привода зависит от способа управления и от характеристик установленных компонентов и исполнительных механизмов. Предлагаемая схема физической модели системы представлена на рис. 1, которая включает в себя пневмогидравлический мультипликатор давления, электропневматический преобразователь давления, датчики и блок управления. В качестве исполнительного механизма для преобразования гидравлической энергии в механическую используется гидроцилиндр. Создаваемая сила измеряется непосредственно датчиком силы. Датчики давления установлены как на полостях гидроцилиндра, так и на полостях пневматической части пневмогидравлического мультипликатора давления. Перемещение штока гидроцилиндра измеряется датчиком положения. Целью интеллектуального пневмогидравлического привода является контроль и саморегулирование усилия исполнительного гидроцилиндра для предотвращения разрушения и создания необходимого алгоритма работы, которые можно определить путём мониторинга усилия или с помощью машинного зрения.

Задающий сигнал подаётся таким образом, чтобы обеспечить постоянное давление в поршневой полости гидроцилиндра. Алгоритм контролирует работу пневмогидравлического мультипликатора давления и обеспечивает минимальное энергопотребление. Цифровой двойник в фоновом режиме параллельно оценивает возможные нештатные ситуации, позволяя системе управления корректировать параметры на основе полученных вычислений. Цифровой двойник пневмогидравлического привода представляет собой комплексное моделирование масштабированной физической модели с помощью симуляции, определяющей её функционирование с помощью коэффициента вероятности. Пример

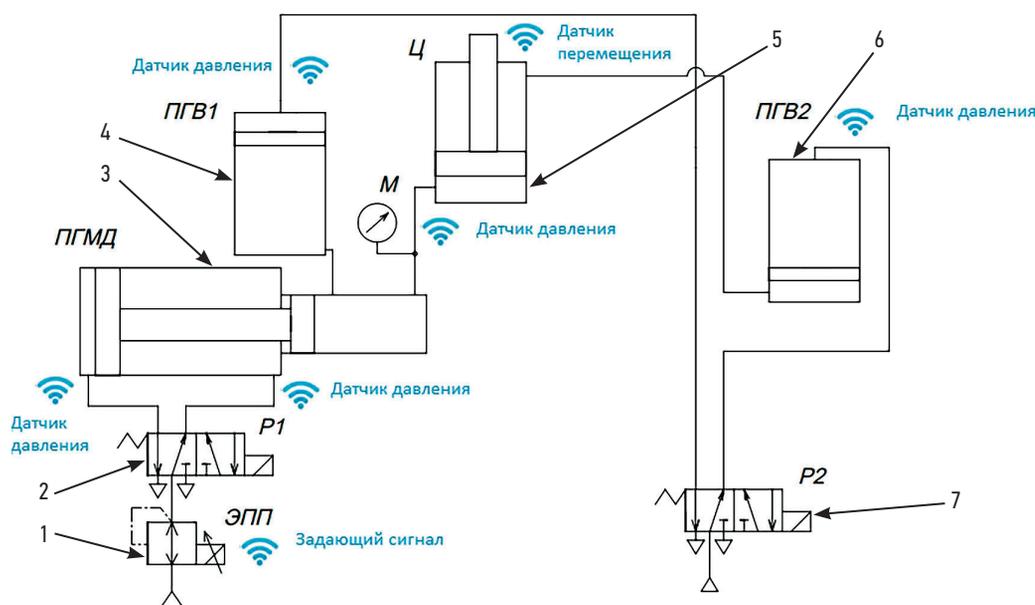


Рис. 1. Схема пневмогидравлического привода с возможностью удалённой диспетчеризации: 1 — электропневматический преобразователь давления; 2 — пневмораспределитель; 3 — пневмогидравлический мультипликатор давления; 4 — пневмогидравлический вытеснитель; 5 — гидроцилиндр; 6 — пневмогидравлический мультипликатор давления; 7 — пневмораспределитель.
Fig. 1. Diagram of the pneumohydraulic drive with the remote control ability: 1 — electro-pneumatic pressure converter; 2 — pneumatic valve; 3 — air-hydro pressure multiplier; 4 — air-hydro converter; 5 — hydraulic cylinder; 6 — air-hydro converter; 7 — pneumatic valve.

концепции цифрового двойника пневмогидравлического привода показан на рис. 2. В ходе выполнения процесса параллельно моделируется процесс, отражённый в цифровой системе, которая корректирует работу устройства и прогнозирует работу с использованием методов искусственного интеллекта. Взаимодействие между реальными и расчётными данными повышает производительность, стабильность и взаимодействие между компонентами.

Задаваемые параметры для модели цифрового двойника пневмогидравлического привода:

- диаметр поршня пневматической части мультипликатора (мм);
- диаметр поршня гидравлической части мультипликатора, штока пневматической части мультипликатора (мм);
- диаметры трубопроводов (мм);

- диаметр поршня пневмогидравлических вытеснителей ПГВ1, ПГВ2 (мм);
- диаметр поршня исполнительного гидроцилиндра (мм);
- диаметр штока исполнительного гидроцилиндра (мм);
- условные проходы (Cv) пневмораспределителей P1, P2;
- давление в пневматической магистрали (бар).

Настраиваемые параметры (которые задаются изначально, но возможно корректировать в процессе работы):

- давление, настраиваемое электропневматическим преобразователем (бар).

Отслеживаемые параметры:

- давление на каждом участке трубопроводов (бар);
- положение поршня исполнительного гидроцилиндра (мм);



Рис. 2. Концепция цифрового двойника пневмогидравлического привода.

Fig. 2. The concept of the digital twin of the pneumohydraulic drive.

- усилие на штоке исполнительного гидроцилиндра (Н).

Выходные параметры исполнительного гидроцилиндра могут изменяться за счёт изменения нагрузки на исполнительном цилиндре за счёт износа исполнительного цилиндра и возрастающих утечек, за счёт нерастворённого воздуха в гидравлической части пневмогидравлического привода, за счёт изменения вязкости рабочей жидкости. В облачное хранилище помещаются все задаваемые и отслеживаемые данные.

Данные от датчиков и история операций собираются и передаются через интерфейс, виртуальная цифровая модель объединяет несколько субъектов, определяет физические значения и обеспечивает прогнозирование работы привода с определённой степенью достоверности. Таким образом выявляются отклонения в системе, проводится настройка параметров привода в режиме реального времени и анализируется поведение системы. Взаимодействие между физической и виртуальной моделями происходит через цифровой интерфейс. Все цифровые датчики реализованы в системе в сочетании с логическими операциями. При необходимости виртуальные датчики используются для мониторинга дополнительных параметров, которые недоступны в реальной модели. Датчики фиксируют характеристики реальной системы, поэтому получение аналоговых значений с датчиком должно быть таким, чтобы алгоритмы информационной сети могли спрогнозировать поведение рассматриваемого привода. Смоделированные данные, собранные в цифровой модели, используются искусственным интеллектом, который на основе алгоритма управления производит окончательную коррекцию и калибровку входного задающего сигнала. Автономная система способна к самообнаружению, самоадаптации, самоорганизации и саморешению. Ответственность искусственного интеллекта заключается в определении и контроле параметров пневмогидравлического привода. Цифровой двойник — это мощный инструмент, который позволяет реализовать искусственный интеллект в любом гидравлическом приводе и обеспечивает возможность его настройки, диагностики и прогнозирования неисправностей. Виртуальная модель отражает состояние физической модели в реальном мире, что упрощает прогнозирование неисправностей и позволяет подобрать такие параметры управления, которые способствуют повышению производительности системы. Возможности цифрового двойника зависят от граничных условий виртуальной модели в цифровой среде и возможности обработки и анализа данных в режиме реального времени. Для конкретных задач и применений пневмогидравлических приводов привод необходимо сначала описать и подробно проанализировать в виртуальной среде. Таким образом сокращаются затраты и время разработки, а качество продукции и производительность привода повышаются.

Наиболее важными данными при мониторинге пневмогидравлического привода являются параметры,

полученные с выходных сигналов датчиков. Выбор этих параметров чрезвычайно важен, так как в случае неправильных параметров эффективность цифрового двойника, использующего методы машинного обучения, снижается. Анализ больших данных — важный аспект обработки данных, собранных с используемых датчиков. Обработка изначально не связанных и не структурированных данных и извлечение полезной информации для автоматической работы привода имеет важное значение. Важная информация о процессе собирается в процессе нештатных ситуаций, когда привод выходит из строя или обнаруживается неисправность. Обычно данные собираются в облаке через определённое время после возникновения события. Далее информационные инструменты, связанные с организацией Интернета вещей (IoT), обрабатывают большие объёмы данных и предоставляют возможность самообучения для создания соответствующей киберфизической системы (CPS).

Одним из типовых применений для пневмогидравлических приводов является привод пресса для вырубки или формовки металла. Качество процесса формовки зависит от деформации сырья в один или несколько этапов до достижения окончательной формы. Эффектами трансформации, которые определяют качество продукта, являются параметры процесса, свойства материала и форма или износ инструмента. Возникновение складок, трещин или неподходящей шероховатости поверхности часто невозможно предсказать путём мониторинга технологических параметров процесса формования. После процесса формования необходим контроль качества продукта для подтверждения надлежащего цикла формования. Включение системы искусственного зрения с интеллектуальными камерами может быть добавлено в процесс формования. Программное обеспечение машинного зрения, реализованное на обычном ПК с использованием библиотек с открытым исходным кодом, должно способствовать обнаружению недостатков конечного продукта. Система мониторинга на основе датчиков используется для контроля состояния штамповочного инструмента и качества продукции путём оценки изображения и звукового излучения. Для максимально быстрой обработки собранной информации рекомендуется обработка и фильтрация двоичных изображений, поскольку проверяется меньшее количество пикселей. Такой подход позволяет полностью освоить разработку между цифровым двойником параметров процесса и цифровым двойником искусственного зрения. Беспроводное соединение системы искусственного зрения может предоставить информацию о продукте, визуализируемом с определённого расстояния. Также система искусственного зрения сможет распознавать пневмогидравлические киберфизические системы (CPS) и взаимодействовать с ними.

Пневмогидравлические системы обеспечивают большие усилия на штоке гидроцилиндра в процессе формовки

металла благодаря соотношению мощности и массы. В целом операции прессования включают в себя быстрый подвод, прессование с медленным выдвиганием штока гидроцилиндра, поддержание давления и быстрый возврат. Известно, что максимальная потребность в энергии приходится на операцию прессования, при которой листовый металл формируется в изделии. Подавляющее большинство гидравлических приводов прессов имеют насос с постоянной производительностью, настроенный на максимально необходимую нагрузку, что приводит к потере неиспользованной гидравлической энергии в процессе циркуляции жидкости. Использование пневмогидравлического мультипликатора давления позволяет уменьшить потребление энергии. Экономия энергии может быть достигнута путём разработки метода управления в зависимости от требований работы пресса. При этом потребление энергии системой снижается, а процесс формования становится более стабильным, что приводит к улучшению формовки и качества продукции. Разработка подходящей имитационной модели, интегрированной в цифровой двойник пневмогидравлического привода, и разработка соответствующего алгоритма могут привести к созданию более энергоэффективного пневмогидравлического привода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование цифровых двойников при диагностике пневмогидравлических приводов открывает новые перспективы для отслеживания состояния оборудования, выявления неисправностей на ранних этапах и предотвращения аварийных ситуаций. Эта технология поможет значительно улучшить процесс обслуживания и повысить безопасность работы. В результате использования модели цифрового двойника в анализе эксплуатации пневмогидравлических приводов с мультипликатором давления достигается оптимальное сочетание надёжности, точности и эффективности. Это поможет компаниям сохранить конкурентные преимущества на рынке и повысить качество своей продукции. Таким образом, интеграция цифровых технологий в процесс диагностики и анализа эксплуатации пневмогидравлических систем является необходимым шагом для современных предприятий, стремящихся к оптимизации производственных процессов и повышению эффективности своей деятельности. Предлагаемые методы можно интегрировать в любой интеллектуальный пневмогидравлический привод для улучшения его характеристик. За счёт увеличения количества подсистем контроля и управления возрастает сложность модели; проблема сбора данных решается с помощью программируемого интерфейса системы, а различные форматы информации требуют разных протоколов связи. При правильном сборе и анализе данных хорошие возможности принятия решений могут быть достигнуты

с помощью использования искусственного интеллекта. Немедленное обнаружение неисправностей в режиме реального времени или оценка изношенности оборудования приводят к быстрой реакции искусственного интеллекта и предотвращению дальнейшего повреждения. Использование гидравлического привода с пневмогидравлическим мультипликатором давления наиболее эффективно в процессе, где множество параллельных гидравлических прессов используют один и тот же источник энергии.

В настоящий момент ведутся работы по созданию и практическому применению модели цифрового двойника пневмогидравлического привода. Результаты работы планируется представить в последующих публикациях.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Н.С. Кривошеев — обзор литературы, сбор и анализ литературных источников, подготовка и написание текста статьи; А.А. Жарковский — обзор литературы, сбор и анализ литературных источников, написание текста и редактирование статьи; Л.А. Коткас — обзор литературы, сбор и анализ литературных источников, и редактирование статьи. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования и подготовке публикации.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. N.S. Krivosheev — literature review, collection and analysis of literary sources, preparation and writing of the manuscript; A.A. Zharkovsky — literature review, collection and analysis of literary sources, writing the text and editing the manuscript; L.A. Kotkas — literature review, collection and analysis of literary sources, writing the text and editing the manuscript. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кириллов Д.С., Барчукова Т.А. Цифровые двойники как основа цифровой трансформации промышленных предприятий. В кн.: Актуальные вопросы экономики и управления, Смоленск, 21–22 октября 2021. Смоленск: Маджента, 2021. С. 161–164. EDN: QCNKPE
2. Лычкина Н.Н., Павлов В.В. Концепция цифрового двойника и роль имитационных моделей в архитектуре цифрового двойника. В кн.: Имитационное моделирование. Теория и практика (IMMOD-2023): Сборник трудов одиннадцатой всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности, Казань, 18–20 октября 2023. Казань: АН РТ, 2023. С. 139–149. EDN: ZAOYZG
3. Saaksvuori A., Immonen A. *Product lifecycle management*. Cham: Springer Science & Business Media, 2008.
4. Grieves M. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication // *White paper*. 2014. Vol. 1, N. 2014. P. 1–7.
5. Grieves M., Vickers J. Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems // *Transdisciplinary perspectives on complex systems: New findings and approaches*. 2017. P. 85–113.
6. Glaessgen E.H., Stargel D.S. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles. In: *53rd Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2012. P. 1–14.
7. Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge (SEBoK). Дата обращения: 22.04.2024. Режим доступа: <https://sebokwiki.org/wiki/>
8. The International Academy for Production Engineering. *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2019.
9. Semeraro C., Lezoche M., Panetto H., et al. Digital twin paradigm: A systematic literature review // *Computers in Industry*. 2021. Vol. 130. doi: 10.1016/j.compind.2021.103469
10. VanDerHorn E., Mahadevan S. Digital Twin: Generalization, characterization and implementation // *Decision support systems*. 2021. Vol. 145.
11. Juarez M.G., Botti V.J., Giret A.S. Digital twins: Review and challenges // *Journal of Computing and Information Science in Engineering*. 2021. Vol. 21, N. 3.
12. Haag S., Anderl R. Digital twin—Proof of concept // *Manufacturing letters*. 2018. Vol. 15. P. 64–66.
13. Пузанов А.В. Элементы концепции цифрового двойника гидропривода. В кн.: Математическое моделирование: Тезисы II Международной конференции, Москва, 21–22 июля 2021. М.: Перо, 2021. С. 72–73. EDN: MBWDLR
14. Крук А.Р., Егоров А.Л., Костырченко В.А., и др. Обзор методов контроля состояния элементов гидропривода // *Фундаментальные исследования*. 2016. № 2–2. С. 267–270. EDN: VORLTH
15. Пиманов Д.А., Гальчак И.П. Децентрализованные гидроприводы со встроенными системами управления. В кн.: Обзор тенденций в агропромышленном комплексе : сборник статей конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Тенденции в АПК», Екатеринбург, 24 октября 2022. Екатеринбург: Уральский государственный аграрный университет, 2022. С. 16–17. EDN: UZAXDZ
16. Боровков А.И., Рождественский О.И., Кукушкин К.В., и др. Дорожная карта по развитию сквозной цифровой технологии «Новые производственные технологии». Результаты и перспективы // *Инновации*. 2019. № 11(253). С. 89–104. doi: 10.26310/2071-3010.2019.253.11.011 EDN: SXVHQW
17. Alcácer V., Cruz-Machado V. Scanning the Industry 4.0: A Literature Review on Technologies for Manufacturing Systems // *Engineering Science and Technology an International Journal*. 2019. Vol. 22, N. 3. P. 899–919. doi: 10.1016/j.jestch.2019.01.006

REFERENCES

1. Kirillov DS, Barchukova TA. Digital twins as the basis for digital transformation of industrial enterprises. In: *Current issues of economics and management, Smolensk, October 21–22, 2021*. Smolensk: Magenta; 2021:161–164. (In Russ.) EDN: QCNKPE
2. Lychkina NN, Pavlov VV. The concept of a digital twin and the role of simulation models in the architecture of a digital twin. In: *Simulation modeling. Theory and practice (IMMOD-2023): Collection of papers of the eleventh all-Russian scientific and practical conference on simulation modeling and its application in science and industry, Kazan, October 18–20, 2023*. Kazan: AN RT; 2023:139–149. (In Russ.) EDN: ZAOYZG
3. Saaksvuori A, Immonen A. *Product lifecycle management*. Cham: Springer Science & Business Media, 2008.
4. Grieves M. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication. *White paper*. 2014;1(2014):1–7.
5. Grieves M., Vickers J. Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. *Transdisciplinary perspectives on complex systems: New findings and approaches*. 2017;85–113.
6. Glaessgen E.H., Stargel D.S. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles. In: *53rd Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics; 2012;1–14.
7. Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge (SEBoK). Accessed: 22.04.2024. Available from: <https://sebokwiki.org/wiki/>
8. The International Academy for Production Engineering. *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2019.
9. Semeraro C, Lezoche M, Panetto H, et al. Digital twin paradigm: A systematic literature review. *Computers in Industry*. 2021;130. doi: 10.1016/j.compind.2021.103469
10. VanDerHorn E, Mahadevan S. Digital Twin: Generalization, characterization and implementation. *Decision support systems*. 2021;145.
11. Juarez MG, Botti VJ, Giret AS. Digital twins: Review and challenges. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*. 2021;21(3).
12. Haag S, Anderl R. Digital twin—Proof of concept. *Manufacturing letters*. 2018;15:64–66.

13. Puzanov AV. Elements of the concept of a digital twin of a hydraulic drive. In: *Mathematical modeling: Abstracts of the II International Conference, Moscow, July 21–22, 2021*. Moscow: Pero; 2021:72–73. (In Russ.) EDN: MBWDLR

14. Kruk AR, Egorov AL, Kostyrchenko VA, Madyarov TM. Review of methods for monitoring the condition of hydraulic drive elements. *Fundamental research*. 2016;2–2:267–270. (In Russ.) EDN: VORLTH

15. Pimanov DA, Galchak IP. Decentralized hydraulic drives with built-in control systems. In: *Review of trends in the agro-industrial complex: collection of articles from the conference of students, graduate students and young scientists "Trends in the agro-industrial complex"*,

Yekaterinburg, October 24, 2022. Yekaterinburg: Uralskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet; 2022:16–17. (In Russ.) EDN: UZAXDZ

16. Borovkov A.I., Rozhdestvensky O.I., Kukushkin K.V. et al. Roadmap for the development of end-to-end digital technology "New production technologies". Results and prospects. *Innovations*. 2019;11(253):89–104. doi: 10.26310/2071-3010.2019.253.11.011 (In Russ.) EDN: SXVHQW

17. Alcácer V, Cruz-Machado V. Scanning the Industry 4.0: A Literature Review on Technologies for Manufacturing Systems. *Engineering Science and Technology an International Journal*. 2019;22(3):899–919. doi: 10.1016/j.jestch.2019.01.006

ОБ АВТОРАХ

*** Кривошеев Никита Сергеевич,**

аспирант Высшей школы энергетического машиностроения;
адрес: Российская Федерация, 195251, Санкт-Петербург,
ул. Политехническая, д. 29;
ORCID: 0009-0009-1754-4315;
eLibrary SPIN: 3147-5597;
e-mail: ax@hydraulicunit.ru

Жарковский Александр Аркадьевич,

д-р техн. наук, профессор,
профессор Высшей школы энергетического машиностроения;
ORCID: 0000-0002-3044-8768;
eLibrary SPIN: 3637-7853;
e-mail: azharkovsky@gmail.com

Коткас Любовь Александровна,

канд. техн. наук,
преподаватель Высшей школы энергетического
машиностроения;
ORCID: 0000-0002-5485-2183;
eLibrary SPIN: 7620-2811;
e-mail: kotkas_la@spbstu.ru

AUTHORS' INFO

*** Nikita S. Krivosheev,**

Postgraduate of the Higher School of Power Engineering;
address: 29 Polytechnicheskaya street, 195251 Saint Petersburg,
Russian Federation;
ORCID: 0009-0009-1754-4315;
eLibrary SPIN: 3147-5597;
e-mail: ax@hydraulicunit.ru

Alexander A. Zharkovsky,

Dr. Sci. (Engineering), Professor,
Professor of the Higher School of Power Engineering;
ORCID: 0000-0002-3044-8768;
eLibrary SPIN: 3637-7853;
e-mail: azharkovsky@gmail.com

Lyubov A. Kotkas,

Cand. Sci. (Engineering),
Senior Lecturer of the Higher School of Power Engineering;
ORCID: 0000-0002-5485-2183;
eLibrary SPIN: 7620-2811;
e-mail: kotkas_la@spbstu.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author