



## Цифровые технологии в пневмогидравлических приводах технологического оборудования: проблемы и перспективы

**Н. С. Кривошеев**

директор по производству и научной деятельности;  
ООО «ГС Юнит», г. Санкт-Петербург;  
ax@hydraulicunit.ru

**А. А. Жарковский**

доктор технических наук, профессор, профессор;  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра  
Великого, г. Санкт-Петербург;  
azharkovsky@gmail.com

*Цифровые технологии открывают новые горизонты в области пневмогидравлических приводов технологического оборудования. В статье рассматриваются ключевые проблемы и перспективы в данной сфере. Внедрение цифровых технологий позволяет значительно повысить эффективность и точность работы пневмогидравлических систем. Использование датчиков, микроконтроллеров и программного обеспечения обеспечивает более точный контроль над процессами, оптимизацию энергопотребления и предиктивное обслуживание. Для успешного внедрения цифровых технологий в работу пневмогидравлических систем используются современные методы анализа данных, математическое моделирование и алгоритмы машинного обучения. При этом особое внимание уделено анализу применения цифровых технологий в пневмогидравлических приводах современного технологического оборудования, а также выявлению ключевых технических проблем, с которыми сталкивается отрасль, и определению перспективных направлений развития. В работе были рассмотрены новые направления в проектировании пневмогидравлических приводов с акцентом на растущую потребность в интегрированных датчиках и других приборах контроля. Недавние достижения в проектировании и реализации пневмогидравлических приводов связаны с комбинированным управлением, подачей и возвратом потока жидкости для улучшения динамики и точности системы, а также чувствительности к нагрузке, при которой усилие нагрузки согласуется с давлением в приводе для повышения эффективности. Данный обзор детально описывает развивающиеся тенденции в исследованиях пневмогидравлических систем и даёт общее представление о прогрессе, связанном с цифровизацией этих систем. Обсуждаются основы соответствующих сенсорных технологий и инновационные подходы к интеграции датчиков в гидравлические и пневматические системы.*

**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

**Цитирование:** Кривошеев, Н. С. Цифровые технологии в пневмогидравлических приводах технологического оборудования: проблемы и перспективы / Н. С. Кривошеев, А. А. Жарковский // Динамика и виброакустика. – 2024. – Т. 10, №4. – С. 78-91. DOI: 10.18287/2409-4579-2024-10-4-78-91

## **Введение**

В эпоху стремительного развития технологий всё больше внимания уделяется внедрению цифровых решений в традиционные механизмы, такие как пневмогидравлические приводы технологического оборудования. Однако многие специалисты сталкиваются с рядом проблем, связанных с недостатком информации и понимания особенностей этих инновационных систем. Данная статья призвана разъяснить эти аспекты и предложить новые пути решения. Одной из ключевых проблем является нехватка обобщённых данных о «цифровых» приводах. Большинство существующих исследований сосредоточено на отдельных аспектах, но не предоставляет полного обзора интеграции цифровых технологий в пневмогидравлические системы. Особенно интересным аспектом является концепция цифрового двойника – виртуальной модели, которая точно отражает физическое состояние и поведение оборудования. Хотя эта технология уже доказала свою эффективность в ряде отраслей, её потенциал в области пневмогидравлических приводов остаётся недостаточно исследованным. В данной статье рассматривается возможность использования цифровых двойников для повышения эффективности работы и диагностики систем, что открывает новые перспективы для оптимизации производственных процессов.

Обязательными элементами пневмогидравлического привода являются преобразователь энергии сжатого газа в гидравлическую энергию капельной рабочей жидкости и исполнительный гидродвигатель. Источник пневматической энергии может входить в состав привода (например, компрессор, баллон со сжатым газом). Однако, чаще используется магистральный вариант данного привода, при котором используется сжатый газ, чаще всего воздух, забираемый из общей для нескольких потребителей сети.

Пневматические приводы имеют ряд несомненных достоинств, среди которых доступность и экологическая безопасность рабочего тела, а также использование в качестве источника энергии промышленных сетей сжатого воздуха. К существенным недостаткам чисто пневматических приводов относят относительно небольшие развиваемые их двигателями усилия и практически полную невозможность точного позиционирования выходного звена. Кроме того, они имеют низкую жёсткость нагрузочных характеристик, так называемую «податливость», возникающую вследствие сжимаемости воздуха и особенно заметно проявляющуюся при быстрых изменениях нагрузок. Эти недостатки накладывают некоторые ограничения на возможность применения пневматических приводов.

Гидравлические приводы способны развивать большие усилия и обеспечивать высокую точность позиционирования своих выходных звеньев, однако также имеют ряд недостатков. В некоторых случаях к их числу относят необходимость использования в составе привода гидравлической насосной станции, имеющей первичный двигатель, бак с запасом рабочей жидкости, а также системы кондиционирования рабочей жидкости.

Идея создания пневмогидравлического привода как одной системы, включающей элементы обоих этих видов привода, заключается в использовании гидравлического исполнительного механизма со всеми его достоинствами, который обеспечивается рабочей жидкостью от пневмогидравлического преобразователя энергии, использующего для работы сеть сжатого воздуха. Исходной энергией в пневмогидравлических приводах является потенциальная энергия сжатого воздуха, получаемого из компрессорных установок. Пневмогидравлические приводы являются весьма эффективным средством получения больших усилий выходного звена при использовании сжатого воздуха низкого давления цеховых магистралей (0,4...0,6 МПа) [1].

Несмотря на множество преимуществ пневмогидравлических систем, у них есть и определённые недостатки. Например, пневмогидравлические системы подвержены утечкам жидкости и чувствительны к изменениям температуры, которые могут повлиять на вязкость

гидравлической жидкости и работу системы в целом. Загрязнение может негативно сказаться на гидравлической жидкости и компонентах системы, что приводит к снижению эффективности, повышенному износу и повреждению критически важных элементов систем. Кроме того, во время работы пневмогидравлические системы могут создавать шум и вибрацию. Однако с помощью передовых технологий, таких как интеллектуальные датчики, интеграция с Интернетом вещей, электрогидравлические гибридные системы и системы рекуперации энергии, пневмогидравлические системы могут стать более надёжными, энергоэффективными и экологичными, устраняя некоторые традиционные недостатки, связанные с гидравлической энергией. Сенсорные технологии играют решающую роль в мониторинге гидравлических клапанов и общей производительности системы. Интеграция датчиков обеспечивает данные в реальном времени, позволяя операторам контролировать, анализировать и оптимизировать работу гидравлических клапанов и систем. Эти технологии могут повысить надёжность системы, обеспечить прогнозное обслуживание, улучшить энергоэффективность и способствовать общей безопасности и эффективности работы. Внедрение этих инновационных решений позволяет значительно улучшить характеристики пневмогидравлических систем, делая их более привлекательными для широкого спектра промышленных применений.

Недавний прогресс в миниатюризации компонентов гидравлических и пневматических систем в сочетании с передовыми электронными технологиями привёл к использованию гидравлических систем в новых и развивающихся областях, таких как биомедицинская инженерия, робототехника для хирургии, а также вспомогательные и реабилитационные устройства. Сейчас наблюдается тенденция к цифровизации гидравлических систем, при которой традиционные подходы к управлению через механическую конструкцию могут быть заменены подходами на основе цифрового управления, позволяющими осуществлять более точное, эффективное и надёжное управление системой, тем самым значительно повышая эффективность и надёжность этих систем. Для достижения этой трансформации потребуются инновационные подходы в проектировании гидравлических систем и интеграция инновационных датчиков для обеспечения обратной связи в реальном времени для улучшения управления гидравлическими клапанами. Кроме того, цифровизация предоставит более подробную оперативную информацию, связанную с производительностью и состоянием системы, что открывает возможности для снижения затрат на техническое обслуживание, ограничения простоев оборудования и повышения энергоэффективности.

Эта статья даёт представление о состоянии текущих исследований и промышленных усилий в области цифровизации гидравлических систем с особым акцентом на применение сенсорных технологий к этим системам для использования улучшений в производительности. Поиск эффективных и инновационных стратегий использования цифровых датчиков увеличит объём информации, доступной операторам систем, что, в свою очередь, может быть использовано для более полного понимания рабочих процессов, улучшения конструкции и, в конечном итоге, повышения эффективности машин в больших масштабах.

### **История применение цифровых технологий в гидроприводах**

Типовой гидравлический привод технологического оборудования состоит из электродвигателя, выступающего в качестве первичного двигателя, гидравлического насоса, пропорционального гидрораспределителя, гидравлического цилиндра, предохранительного клапана и бака. Электродвигатель приводит в действие гидравлический насос для подачи жидкости под давлением из бака, предохранительный клапан используется для ограничения максимального давления. Рабочая жидкость под давлением подаётся через пропорциональный гидрораспределитель в поршневую камеру гидравлического цилиндра. Расход жидкости определяется пропорциональным гидрораспределителем. Благодаря своей простоте, надёж-

ности и низкой стоимости системы с таким типом управления широко используются в гидравлических приводах. В последние десятилетия гидравлические распределители были усовершенствованы от ручного или механического управления с обратной связью до цифрового электронного управления. Общие тенденции в развитии компонентов гидравлических систем сводятся к минимизации и компактности отдельных элементов, а также развитию интеллектуальных компонентов с возможностью самодиагностики и мониторинга состояния. Эти два процесса связаны, так как эти требования предъявляются и к элементам диагностики в пневмогидравлических приводах.

Развитие этих тенденций начинается с появлением в 1960-х годах первых модульных компонентов гидравлических систем, когда инженерные решения стали требовать большей гибкости и эффективности. С развитием технологий и увеличением спроса на более сложные промышленные и строительные машины стало очевидно, что традиционные гидравлические системы не всегда могут удовлетворить эти требования. Модульные компоненты стали ответом на эту потребность, предлагая возможность лёгкой замены и модификации элементов без необходимости полной переделки системы. Это не только ускорило процесс проектирования и сборки, но и значительно снизило затраты на обслуживание и ремонт. Кроме того, модульные гидравлические системы позволили инженерам экспериментировать с новыми конфигурациями и адаптировать оборудование под специфические задачи, что в итоге повысило производительность и надёжность техники. С появлением интегрированной электроники и цифровых технологий электрогидравлические клапаны могут управляться дистанционно централизованным контроллером. Так в 1970-х годах стали появляться гидравлические клапаны для управления потоком и давлением в гидравлических системах с электронными переключателями и аналоговым электронным управлением. Распределительные клапаны, предохранительные клапаны и клапаны регулирования потока стали стандартными компонентами. В 1980 году вышла первая редакция стандарта ISO4401, определяющего стандартные присоединительные размеры для модульных компонентов гидросистем, что можно считать прорывом в области унификации компонентов гидравлических и пневматических приводов. Передовые материалы и производственные технологии привели к разработке более эффективных и долговечных гидравлических клапанов в 1990-х годах. Гидравлические системы были усовершенствованы благодаря интеграции цифровых электронных систем управления и датчиков, что привело к повышению точности их работы. Это развитие ознаменовало начало эры электрогидравлических систем. Пропорциональные и сервоклапаны стали более широко использоваться, что привело к повышению точности управления расходом и давлением рабочей жидкости [2]. Как и пропорциональный клапан, сервоклапан выполняет задачу обеспечения непрерывного изменения расхода в зависимости от входного сигнала. Эта характеристика достигается благодаря наличию у серво-клапана подвижного золотника, который перемещается внутри втулки с прямоугольными отверстиями (щелями) или кольцевыми канавками на её поверхности, что позволяет добиться точного изменения расхода в зависимости от положения золотника [3]. Одно из различий между серво-клапаном и пропорциональным клапаном заключается в перекрытии золотника в центральном положении. Перекрытие золотника в серво-клапанах обычно очень мало, часто составляет 1% хода золотника или меньше [4], тогда как в пропорциональных клапанах обычно присутствуют большие перекрытия (более 5% хода золотника). Большое перекрытие приводит к значительной нелинейности, снижая точность управления, но позволяет производить пропорциональные клапаны с большими допусками. В 2010-х годах на разработку гидравлических клапанов повлияли интеллектуальные технологии и тенденции Индустрии 4.0. Появление Индустрии 4.0 революционизировало производственный сектор, позволив интегрировать передовые технологии для повышения производительности, эффективности и автоматизации. Одной из таких технологий, привлёкших значительное внимание, являются интеллектуальные

гидравлические системы [5]. Эти системы сочетают мощность гидравлики с интеллектуальными механизмами управления, прокладывая путь новой эре промышленной автоматизации. Интеграция интеллектуальных гидравлических систем является ключевой движущей тенденцией в Индустрии 4.0, предлагая множество преимуществ для производственного сектора, а именно:

- **Повышенная эффективность и производительность:** интеграция интеллектуальных гидравлических систем в производственные процессы может значительно повысить эффективность и производительность. Эти системы предлагают точный контроль над исполнительными механизмами, позволяя точно управлять позиционированием, скоростью и регулировкой силы. Такой уровень контроля обеспечивает выполнение производственных операций с высокой точностью, снижая количество ошибок и минимизируя отходы [6]. Кроме того, интеллектуальные гидравлические системы могут оптимизировать потребление энергии путём настройки параметров на основе данных в реальном времени, что приводит к экономии затрат и повышению общей эффективности.

- **Мониторинг в реальном времени:** интеллектуальные гидравлические системы позволяют осуществлять мониторинг компонентов в реальном времени, предоставляя ценные данные об их производительности и состоянии [7]. Интегрируя датчики и системы сбора данных, эти системы могут собирать и анализировать данные о давлении, температуре, расходе и других важных параметрах. Эти данные могут использоваться для обнаружения аномалий, прогнозирования потенциальных отказов и планирования мероприятий по техническому обслуживанию.

- **Гибкость и адаптивность:** одним из ключевых преимуществ интеллектуальных гидравлических систем является их гибкость и адаптивность. Эти системы легко интегрируются в существующие производственные установки, позволяя осуществить бесшовную автоматизацию без необходимости в значительных модификациях [8]. Более того, интеллектуальные гидравлические системы могут адаптироваться к изменяющимся требованиям производства путём настройки таких параметров, как скорость, сила и положение.

Термин «цифровая гидравлическая технология» был введён Матти Линьямой более десяти лет назад. Тем не менее, определение Линьямы лишь частично охватывало ее характеристики. Оно выделяло две особенности: дискретное управление и активное управление. Дискретное управление является неотъемлемой частью цифровой гидравлической технологии, так как оно использует дискретные цифровые сигналы для управления гидравлическими компонентами. С другой стороны, концепция активного управления лишь частично отражала суть цифровой гидравлической технологии, поскольку она не охватывала интеллектуальное управление. Только в 2020 году появилась стандартизированная формулировка, описывающая цифровую гидравлическую технологию как систему, использующую модулированные, дискретные, цифровые сигналы для достижения как активного, так и интеллектуального управления выходом системы. Согласно этому определению, гидравлические компоненты, способные к дискретизации потока жидкости или управляющих сигналов, называют цифровыми гидравлическими компонентами, а гидравлические системы, состоящие из таких компонентов, известны как цифровые гидравлические системы. Цифровые технологии в гидроприводах рассматриваются в работах [9-11].

В настоящее время растущее внимание к устойчивости и энергоэффективности ведёт к разработке новых инновационных решений для гидравлических и пневматических клапанов. Интеграция искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения в гидравлические системы может повысить надёжность и улучшить производительность. Более того, достижения в материаловедении и трёхмерной (3D) печати могут привести к созданию более лёгких и долговечных гидравлических клапанов. Кроме того, использование баз данных и мониторинг

га в реальном времени, наряду с передовыми сенсорными технологиями, улучшает диагностику системы и возможность оперативного устранения неполадок.

Наряду с разработкой новых технологий изготовления гидравлических и пневматических клапанов, производственные процессы продолжают развиваться на основе новых возможностей умного производства, слияния физического и виртуального миров, а также сбора и использования данных в рамках всё более взаимосвязанных и автоматизированных систем для интеллектуального производства. Для реализации данного подхода в гидравлических и пневматических системах ожидается, что в будущем клапаны и системы будут обладать функциями самообнаружения и диагностики неисправностей, таких как утечки рабочей жидкости через уплотнения в местах соединения трубопроводов, внутренние и внешние утечки рабочей жидкости в гидроцилиндрах, пробой электрических подключений клапанно-распределительной аппаратуры и датчиков и их комбинации. Для внедрения этих функций необходимо использовать датчики для получения информации о состоянии клапана и системы, такой как расход, давление, перемещение/положение и температура. Измерение давления в гидравлических системах обычно включает механические и электрические датчики давления.

Электрические датчики давления преобразуют давление в электрические сигналы с помощью пьезоэлектрических материалов, пьезорезистивных материалов, конденсаторов и индуктивных катушек. Для гидравлических систем также недавно были разработаны волоконно-оптические датчики давления благодаря их компактным размерам, высокой чувствительности, хорошей защите от электромагнитных помех и коррозии, а также простоте распределения. Расходомер измеряет объём жидкости, проходящей через фиксированную точку трубы. Распространённые механизмы измерения расхода в гидравлических и пневматических системах включают электромагнитный, турбинный, кориолисовый, тепловой, дифференциального давления (диафрагменный), вихревой и ультразвуковой. Также для измерения расхода используются пьезоэлектрические датчики, многоэлектродные датчики проводимости, трибоэлектрические плёнки, а также роторные и датчики Холла [12]. Однако эти устройства измерения расхода чувствительны к электромагнитным помехам и сложно адаптируются к суровым условиям. Для решения этих проблем волоконно-оптические датчики также используются для измерения расхода в экстремальных условиях, таких как низкая температура и сильные электромагнитные помехи. Датчик перемещения измеряет расстояние между объектом и опорным положением линейного перемещения, угла поворота или 3D-пространства [13]. Распространённые типы датчиков перемещения включают ёмкостные датчики перемещения, датчики на основе вихревых токов, датчики Холла, индуктивные датчики, линейные дифференциальные трансформаторы, оптические датчики перемещения и ультразвуковые датчики перемещения. Для достижения компактных размеров, низкой стоимости и высокого разрешения были разработаны микроэлектромеханические акселерометры для измерения линейного положения и угла в гидравлических и пневматических системах.

Датчики для гидравлических клапанов и систем обычно устанавливаются снаружи и требуют использования специальных соединителей или кронштейнов, что приводит к дополнительным затратам и увеличению размера устройства. Имеется тенденция к проведению работ по минимизации и интеграции датчиков в гидравлические клапаны для достижения минимальных размеров. Некоторые переменные состояния, такие как расход и перемещение, трудно измерить с помощью интегрированных датчиков из-за механизмов измерения, используемых в обычных гидравлических расходомерах и датчиках перемещения, так что их нелегко напрямую интегрировать в гидравлические клапаны. Однако состояния клапанов можно косвенно оценить, используя информацию от других, более доступных к отслеживанию переменных состояния. Например, перемещение золотника клапана можно рассчитать по току, напряжению или индуктивности катушки. Такой метод может уменьшить количе-

ство необходимых датчиков и пространство для установки. Это может дополнительно использоваться для получения всесторонней информации о состоянии системы. Сочетая технологии измерения с косвенным подходом оценки для мониторинга производительности и анализа неисправностей, можно реализовать точное и интеллектуальное управление гидравлическими и пневматическими клапанами и системами. Цифровые технологии в пневмогидравлических приводах технологического оборудования представляют собой не только вызов, но и огромные перспективы для развития. Современные цифровые системы управления позволяют значительно повысить точность и эффективность работы приводов, что критически важно для высокотехнологичных производственных процессов. Однако внедрение цифровых технологий сопряжено с рядом проблем, среди которых можно выделить необходимость в значительных инвестициях в оборудование и обучение персонала, а также вопросы кибербезопасности. Тем не менее, преимущества, такие как возможность дистанционного мониторинга и управления, предиктивная аналитика для предупреждения сбоев, а также интеграция с другими системами предприятия, делают цифровизацию неизбежным шагом вперед. Перспективы использования цифровых технологий в данной области включают в себя развитие более интеллектуальных систем управления, которые смогут адаптироваться к изменяющимся условиям работы и самостоятельно оптимизировать процессы.

### **Концепция цифрового двойника пневмогидравлического привода**

Цифровой двойник (ЦД) пневмогидравлического привода – это виртуальная модель или дубликат реального пневмогидравлического привода, созданный с использованием цифровых технологий и данных. Он представляет собой точное или приближенное отображение физических характеристик и поведения гидросистемы в цифровой форме. На текущий момент из-за большого разнообразия определений в научных работах и стандартах видно, что в отрасли ещё не сложилось единое понятие для цифрового двойника, не определены базовые свойства и компоненты ЦД. В силу исторического происхождения большинство приведённых понятий ЦД рассматривает в качестве реальной системы жизненный цикл продукта, однако ряд исследователей [14, 15] подчеркивают необходимость рассматривать и определять свойства, состояние и поведение реального объекта.

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 её работы до физической реализации. Это позволяет сократить время и затраты на разработку и испытания гидравлического привода, а также улучшить её производительность и надёжность. Кроме того, цифровой двойник гидравлического привода может использоваться для мониторинга и диагностики реального гидравлического привода в режиме реального времени [16-18]. 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 [19-22]. Таким образом, цифровой двойник гидравлического привода позволяет создать виртуальное представление реального гидравлического привода, обеспечивая возможность оптимизации её работы и предотвращения проблем до физической реализации [23–25].

Из-за герметичности и конструктивных особенностей гидравлического и пневматического оборудования проверить и спрогнозировать его неисправности, как правило, сложно.

Распространённые 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. Рассмотрим модель цифрового двойника пневмогидравлического привода на основе математической модели.

### Составление модели цифрового двойника пневмогидравлического привода

Предлагаемая схема физической модели системы, представленная на рисунке 1, включает в себя пневмогидравлический мультипликатор давления, электро-пневматический 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.

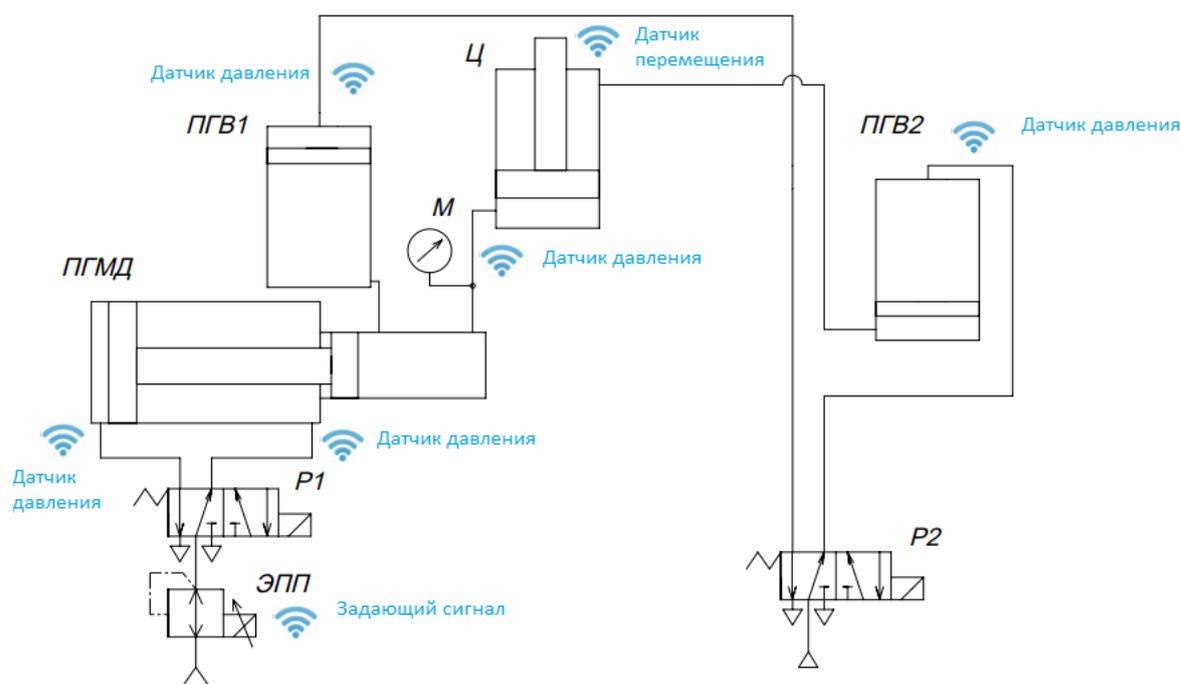


Рисунок 1 – Схема пневмогидравлического привода с возможностью удалённой диспетчеризации:  
 ЭПП – электропневматический преобразователь давления; P1, P2 – пневматические распределители;  
 ПГМД – пневмогидравлический мультипликатор давления; ПГВ1, ПГВ2 – пневмогидравлические вытеснители;  
 Ц – гидроцилиндр; М – манометр.

Задающий сигнал подается 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 моде-

лирование масштабированной физической модели с помощью симуляции, определяющей её функционирование с помощью коэффициента вероятности.

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 ( $C_v$ ) 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);
- 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. Так, в [26] рассматривается методика создания цифрового двойника кривошипного пресса для кузнечно-штамповочного производства. Эле-

менты концепции цифрового двойника гидравлического привода рассматриваются в [27]. Обзор методов контроля состояния гидравлических приводов приведён в [28-30]. Однако данные работы не учитывают особенности рабочих процессов пневмогидравлических приводов. Актуальность развития цифровых технологий подтверждается формированием государственной политики по поддержке развития новых производственных технологий [31]. Развитие цифровых технологий в гидравлических и пневматических приводах предоставляет значительное преимущество для промышленной автоматизации в производственном секторе. Точное управление, высокая мощность и интеллектуальные алгоритмы способствуют улучшению производительности, повышению продуктивности и эффективности. Эти системы обеспечивают точное управление и высокую мощность, что делает их подходящими для широкого спектра применений. Интеграция интеллектуальных алгоритмов управления позволяет проводить мониторинг и регулирование в реальном времени, что ведёт к повышению эффективности и сокращению простоев. Кроме того, интеллектуальные гидравлические системы предлагают улучшенные функции безопасности, такие как обнаружение неисправностей и механизмы аварийного отключения, что обеспечивает безопасность работников и предотвращает несчастные случаи. Для оптимизации работы системы также рекомендуется постоянный мониторинг и анализ данных. Применяя интеллектуальные гидравлические системы, производственные секторы могут достичь более высокой эффективности, продуктивности и конкурентоспособности в сегодняшнем динамичном рынке.

### **Заключение**

В статье рассматриваются новые направления в проектировании гидравлических и пневматических систем. Улучшенные характеристики, управление и энергоэффективность всё чаще обеспечиваются цифровыми гидравлическими технологиями, использующими клапаны, насосы, гидроаккумуляторы и гидроцилиндры для активного управления выходными параметрами системы. Цифровые блоки управления потоком повышают устойчивость и отказоустойчивость системы, но приводят к небольшому снижению производительности при возникновении ошибки. Эти технологии могут быть реализованы с помощью концепции цифрового двойника пневматического или гидравлического привода, предоставляющего информацию о состоянии системы в режиме реального времени. Кроме того, они позволяют улучшить обнаружение и диагностику неисправностей и общий мониторинг производительности. В настоящий момент ведутся работы по созданию и практическому применению модели цифрового двойника пневмогидравлического привода. Результаты работы планируются в последующих публикациях.

### **Список использованных источников**

1. Маслов, М. М. Применение пневмогидравлического привода для ремонтных работ на примере универсального съемника / М. М. Маслов // Вестник НГИЭИ. – 2013. – № 8(27). – С. 54-62. – EDN RBNMZB.
2. Surucu, O. Condition Monitoring using Machine Learning: A Review of Theory, Applications, and Recent Advances / O. Surucu, S. A. Gadsden, J. Yawney // Expert Systems with Applications. – 2023. – vol. 221. – pp. 119738.
3. Parr, A. Hydraulics and Pneumatics (Third edition) : A technician's and engineer's guide. (Elsevier, Ed.) / A. Parr. – Butterworth-Heinemann, The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford OX5 1GB, UK, 2011.
4. Amirante, R. The importance of a full 3D fluid dynamic analysis to evaluate the flow forces in a hydraulic directional proportional valve / R. Amirante, L. A. Catalano, P. Tamburrano // Engineering Computations. – 2014a. – 31(5). – pp. 898-922.
5. Alhammadi, A. The role of industry 4.0 in advancing sustainability development: A focus review in the United Arab Emirates / A. Alhammadi, I. Alsyouf, C. Semeraro, K. Obaideen, // Cleaner Engineering and Technology, – 2024. – vol. 18. – pp. 100708.

6. Zhong, R. Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review / R. Y. Zhong, X. Xu, E. Klotz, S. T. Newman // *Engineering*. – 2017. – 3(5). – pp. 616-630.
7. Pech, M. Predictive Maintenance and Intelligent Sensors in Smart Factory: Review / M. Pech, J. Vrchota, J. Bednář // *Sensors*. – 2021. – 21. – 1470.
8. Lalegani, D. M. (2023) A Review of Recent Manufacturing Technologies for Sustainable Soft Actuators / D. M. Lalegani, M. Bodaghi // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing Green Technology*. – 2023. – 10. – pp. 1661-1710.
9. Linjama, M. Digital fluid power: State of the art / M. Linjama // *The Twelfth Scandinavian International Conference on Fluid Power*. Tampere University of Technology. – Tampere, Finland, 2011, 18–20 May. – pp. 18–20.
10. Donkov, V. H. Digital hydraulic technology for linear actuation: a state of the art review / V. H. Donkov, T. Andersen, M. Linjama, M. K. Ebbesen // *International Journal of Fluid Power*. – 2020. – 21(2). – 263-304.
11. Laamanen, A. On the pressure peak minimization in digital hydraulics / A. Laamanen, M. Linjama, M. Vilenius // *The tenth Scandinavian international conference on fluid power*. – Tampere, Finland, 2007, 21–23 May.
12. Yusop, H. M. Pipe leak diagnostic using high frequency piezoelectric pressure sensor and automatic selection of intrinsic mode function / H. M. Yusop, M. F. Ghazali, M. F. M. Yusof, M. A. Pi Remli, M. H. Kamarulzaman // *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. – 2017. – 257. – 012091.
13. Xu, J. Epoxy-free high-temperature fiber optic pressure sensors for gas turbine engine applications / J. Xu, G. Pickrell, B. Yu, M. Han, Y. Zhu, X. Wang, K. L. Cooper, A. Wang // *Proceedings of Sensors for Harsh Environments*. – 2004. – vol. 5590. – pp. 1-10.
14. Кириллов, Д. С. Цифровые двойники как основа цифровой трансформации промышленных предприятий / Д. С. Кириллов, Т. А. Барчукова // *Актуальные вопросы экономики и управления*, Смоленск, 21–22 октября 2021 года. – Смоленск : Издательство «Маджента», 2021. – С. 161-164. – EDN QCNKPE.
15. Лычкина, Н. Н. Концепция цифрового двойника и роль имитационных моделей в архитектуре цифрового двойника / Н. Н. Лычкина, В. В. Павлов // *Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2023)* : Сборник трудов одиннадцатой всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности, Казань, 18–20 октября 2023 года. – Казань : Издательство АН РТ, 2023. – С. 139-149. – EDN ZAOYZG.
16. Saaksvuori, A. Product lifecycle management / A. Saaksvuori, A. Immonen // *Springer Science & Business Media*. – 2008.
17. Grieves, M. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication / M. Grieves // *White paper*. – 2014. – vol. 1, №2014. – pp. 1-7.
18. Grieves, M. Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems / M. Grieves, J. Vickers // *Transdisciplinary perspectives on complex systems: New findings and approaches*. – 2017. – pp. 85–113.
19. Glaessgen, E. H. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U. S. Air Force Vehicles / E. H. Glaessgen, D. S. Stargel // *53rd Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*. – 2012. – pp. 1-14.
20. Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge (SEBoK). URL: <https://sebokwiki.org/wiki/> (дата обращения 22.04.2024).
21. Stark, R., et al. CIRP Encyclopedia of Production Engineering / R. Stark, et al. – The International Academy for Production Engineering, 2019. – pp. 1-8.
22. Semeraro, C. Digital twin paradigm: A systematic literature review / C. Semeraro, M. Lezoche, H. Panetto, M. Dassisti // *Computers in Industry*. – 2021. – Vol. 130. – pp. 103469.
23. VanDerHorn, E. Digital Twin: Generalization, characterization and implementation / E. VanDerHorn, S. Mahadevan // *Decision support systems*. – 2021. – Vol. 145. – pp. 113524.
24. Juarez, M. G. Digital twins: Review and challenges / M. G. Juarez, V. J. Botti, A. S. Giret // *Journal of Computing and Information Science in Engineering*. – 2021. – Vol. 21. – №3.
25. Haag, S. Digital twin–Proof of concept / S. Haag, R. Anderl // *Manufacturing letters*. – 2018. – Vol. 15. – pp. 64–66.
26. Пузанов, А. В. Элементы концепции цифрового двойника гидропривода / А. В. Пузанов // *Математическое моделирование : Тезисы II Международной конференции*, Москва, 21–22 июля 2021 года. – Москва : Издательство «Перо», 2021. – С. 72-73. – EDN MBWDLR.
27. Обзор методов контроля состояния элементов гидропривода / А. Р. Крук, А. Л. Егоров, В. А. Костырченко, Т. М. Мадьяров // *Фундаментальные исследования*. – 2016. – № 2-2. – С. 267-270. – EDN VORLTH.
28. Пиманов, Д. А. Децентрализованные гидроприводы со встроенными системами управления / Д. А. Пиманов, И. П. Гальчак // *Обзор тенденций в агропромышленном комплексе : сборник статей конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Тенденции в АПК»*, Екатеринбург, 24 октября 2022 года. – Екатеринбург : Уральский государственный аграрный университет, 2022. – С. 16-17. – EDN UZAXDZ.

29. Воробьев, Д. И. Разработка цифрового двойника прессы для кузнечно-штамповочного производства / Д. И. Воробьев, А. О. Кузин, Я. А. Ерисов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – №4. – С. 365-371. DOI 10.24412/2071-6168-2023-4-365-372. – EDN WMKYUP.

30. Крук, А. Р. Обзор методов контроля состояния элементов гидропривода / А. Р. Крук, А. Л. Егоров, В. А. Костырченко, Т. М. Мадьяров // Фундаментальные исследования. – 2016. – №2-2. – С. 267-270. EDN VORLTH.

31. Боровков, А. И. Дорожная карта по развитию сквозной цифровой технологии «Новые производственные технологии». Результаты и перспективы / А. И. Боровков, О. И. Рождественский, К. В. Кукушкин [и др.] // Инновации. – 2019. – №11(253). – С. 89-104. DOI: 10.26310/2071-3010.2019.253.11.011. – EDN SXVHQW.

## Digital technologies in pneumohydraulic drives of technological equipment: problems and prospects

**N. S. Krivosheev**

Director of Production and Science;  
GS Unit LLC, St. Petersburg, Russian Federation;  
ax@hydraulicunit.ru

**A. A. Zharkovskiy**

Doctor of Science (Engineering), Professor, Professor;  
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,  
St. Petersburg, Russian Federation;  
azharkovsky@gmail.com

*Digital technologies are opening new horizons in the field of pneumohydraulic drives for technological equipment. This article examines the key issues and prospects in this area. The implementation of digital technologies significantly enhances the efficiency and accuracy of pneumohydraulic systems. The use of sensors, microcontrollers, and software provides more precise control over processes, energy consumption optimisation, and predictive maintenance. Digitalisation of pneumohydraulic drives is an inevitable step in the development of technological equipment, offering new opportunities for industry and innovation. Modern methods of data analysis, mathematical modelling, and machine learning algorithms are used for a successful implementation of this approach. Particular attention is paid to analyzing the application of digital technologies in pneumohydraulic drives of modern technological equipment, identifying key challenges faced by the industry, and determining promising development directions. The study considers new directions in the design of pneumohydraulic drives with a focus on the growing need for integrated sensors and other control devices. Recent advances in the design and implementation of pneumohydraulic drives relate to combined control of fluid flow supply and return to improve system dynamics, accuracy, and load sensitivity, where load effort is matched with drive pressure to increase efficiency. This review provides a detailed description of emerging trends in pneumohydraulic system research and gives an overall view of progress related to the digitalization of these systems. The basics of relevant sensor technologies and innovative approaches to integrating sensors into hydraulic and pneumatic systems are discussed.*

**Keywords:** digital twin; pneumo-hydraulic actuator; pressure intensifier; digital control; automated actuator; hydraulic intensifier; pneumo-hydraulic system; digital technology; innovative actuator; automated mechanism; modern hydraulics; high-precision pressure control

**Citation:** Krivosheev, N. S. and Zharkovskiy, A. A. (2024), "Digital technologies in pneumohydraulic drives of technological equipment: problems and prospects", *Journal of Dynamics and Vibroacoustics*, vol. 10, no. 4, pp. 78-91. DOI: 10.18287/2409-4579-2024-10-4-78-91. (In Russian; abstract in English).

---

### References

1. Maslov, M. M. (2013), "Application of a Pneumohydraulic Drive for Repair Work Using a Universal Puller", *Vestnik NGIEI*, 8(27), pp. 54-62. EDN RBNMZB. (In Russian).
2. Surucu, O., Gadsden, S. A. and Yawney, J. (2023), "Condition Monitoring using Machine Learning: A Review of Theory, Applications, and Recent Advances", *Expert Systems with Applications*, 221, 119738.
3. Parr, A. (2011), *Hydraulics and Pneumatics (Third edition): A Technician's and Engineer's Guide*. Butterworth-Heinemann: The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford OX5 1GB, UK.
4. Amirante, R., Catalano, L. A. and Tamburrano, P. (2014a), "The Importance of a Full 3D Fluid Dynamic Analysis to Evaluate the Flow Forces in a Hydraulic Directional Proportional Valve", *Engineering Computations*, 31(5), pp. 898-922.
5. Alhammedi, A., Alsyof, I., Semeraro, C. and Obaideen, K. (2024), "The Role of Industry 4.0 in Advancing Sustainability Development: A Focus Review in the United Arab Emirates", *Cleaner Engineering and Technology*, 18, p. 100708.
6. Zhong, R. Y., Xu, X., Klotz, E. and Newman, S. T. (2017), "Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review", *Engineering*, 3(5), pp. 616-630.
7. Pech, M., Vrchota, J. and Bednář, J. (2021), "Predictive Maintenance and Intelligent Sensors in Smart Factory: Review", *Sensors*, 21(1470).

8. Lalegani, D. M. and Bodaghi, M. (2023), “A Review of Recent Manufacturing Technologies for Sustainable Soft Actuators”, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 10, pp. 1661-1710.
9. Linjama, M. (2011), “Digital fluid power: State of the art”, *Presented at the the Twelfth Scandinavian International Conference on Fluid Power, Tampere, Finland, 18–20 May 2011*, pp. 18–20. Tampere University of Technology.
10. Donkov, V. H., Andersen, T., Linjama, M. and Ebbesen, M. K. (2020), “Digitallyhydraulic technology for linear actuation: a state of theart review”, *International Journal of Fluid Power*, 21(2), 263–304.
11. Laamanen, A., Linjama, M and Vilenius, M. (2007), “On the pressure peak minimization in digital hydraulics”, *The tenth Scandinavian international conference on fluid power, Tampere, Finland, 21–23 May 2007*.
12. Yusop, H. M., Ghazali, M. F., Yusof, M. F. M., Pi Remli, M. A. and Kamarulzaman, M. H. (2017), “Pipe leak diagnostic using high frequency piezoelectric pressure sensor and automatic selection of intrinsic mode function”, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 257(012091).
13. Xu, J., Pickrell, G., Yu, B., Han, M., Zhu, Y., Wang, X., Cooper, K. L. and Wang, A. (2004), “Epoxy-free high-temperature fiber optic pressure sensors for gas turbine engine applications”, *Proceedings of Sensors for Harsh Environments*, vol. 5590: pp. 1–10.
14. Kirillov, D. S. and Barchukova, T. A. (2021), “Digital Twins as the Basis for Digital Transformation of Industrial Enterprises”, *Aktual'nye voprosy ekonomiki i upravleniya [Actual Issues of Economics and Management]*, Izdatel'stvo “Madzhenta” [Magenta Publishing House], Smolensk, pp. 161-164. EDN QCNKPE. (In Russian).
15. Lychkina, N. N. and Pavlov, V. V. (2023), “The concept of digital twin and the role of simulation models in the architecture of the digital twin”, *Simulation Modeling. Theory and Practice (IMMOD-2023) : Proceedings of the Eleventh All-Russian Scientific and Practical Conference on Simulation Modeling and its Application in Science and Industry*, AN RT Publishing House, Kazan, 18-20 October 2023, pp. 139-149. EDN ZAOYZG. (In Russian).
16. Saaksvuori, A. and Immonen, A. (2008), “Product lifecycle management”, *Springer Science & Business Media*.
17. Grieves, M. (2014), “Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication”, *White paper*, vol. 1, no. 2014, pp. 1-7.
18. Grieves, M. and Vickers, J. (2017), “Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems”, *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches*, pp. 85–113.
19. Glaessgen, E. H. and Stargel, D. S. (2012), “The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U. S. Air Force Vehicles”, *53rd Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, pp. 1-14.
20. Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge (SEBoK). Available at: <https://sebokwiki.org/wiki/> [Accessed 22 Apr 2024].
21. Stark, R., et al. (2019), *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*, The International Academy for Production Engineering, pp. 1-8.
22. Semeraro, C., Lezoche, M., Panetto, H. and Dassisti, M. (2021), “Digital twin paradigm: A systematic literature review”, *Computers in Industry*, vol. 130, p. 103469.
23. VanDerHorn, E. and Mahadevan, S. (2021), “Digital Twin: Generalization, characterization and implementation”, *Decision Support Systems*, vol. 145, p. 113524.
24. Juarez, M. G., Botti, V. J. and Giret, A. S. (2021), “Digital twins: Review and challenges”, *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, vol. 21(3).
25. Haag, S. and Anderl, R. (2018), “Digital twin–Proof of concept”, *Manufacturing Letters*, vol. 15, pp. 64–66.
26. Puzanov, A. V. (2021), “Elements of the concept of a digital twin for a hydraulic drive system”, *Mathematical Modeling Abstracts II International Conference*, July 21-22, Pere Publishing House, Moscow, pp. 72-73 EDN MBWDLR. (In Russian).
27. Kruk, A. R., Egorov, A. L., Kostyrchenko, V. A. and Madyarov, T. M. (2016), “Overview of Methods for Monitoring Hydraulic Drive Components”, *Fundamental Research*, 2-2, pp. 267-270. EDN VORLTH. (In Russian).
28. Pimanov, D. A. and Galchak, I. P. (2022), “Decentralised Hydraulic Drives with Built-in Control Systems”, in *Trends in the Agro-Industrial Complex: Proceedings of the Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists “Trends in the Agro-Industrial Complex”*, Yekaterinburg, 24 October 2022, Yekaterinburg: Ural State Agrarian University, pp. 16-17. EDN UZAXDZ. (In Russian).
29. Vorobyev, D. I., Kuzin, A. O. and Erisov, Y. A. (2023), “Development of a Digital Twin for a Forging and Stamping Press”, *Izvestiya of Tula State University. Technical Sciences*, no. 4, pp. 365-371. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-4-365-372. EDN WMKYUP. (In Russian).
30. Kruk, A. R., Egorov, A. L., Kostyrchenko, V. A. and Madyarov, T. M. (2016), “Overview of Methods for Monitoring Hydraulic Drive Components”, *Fundamental Research*, (2-2), pp. 267-270. EDN VORLTH. (In Russian).
31. Borovkov, A. I., Rozhdstvensky, O. I., Kukushkin, K. V., et al. (2019), “Roadmap for the Development of End-to-End Digital Technology “New Production Technologies”. Results and Prospects”, *Innovations*, no. 11(253), pp. 89-104. DOI: 10.26310/2071-3010.2019.253.11.011. EDN SXVHQW. (In Russian).