Инновационное развитие машиностроения на основе цифровых двойников и предиктивного мониторинга состояния технологического оборудования

Куровский Станислав Валерьевич
Руководитель научно-исследовательского подразделения ООО «Высшая Школа Образования», 8917564@gmail.com,

Мишин Денис Александрович
Руководитель редакционно-издательского отдела ООО «Высшая Школа Образования», 9651530@gmail.com,

Ласкин Евгений Петрович
аспирант, кафедра обработки металлов давлением, Институт авиационной и ракетно-космической техники, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, laskin.eva@yandex.ru

Возрастание сложности технологического оборудования и требований к выполнению производственных процессов обусловливают необходимость интеграции элементов предиктивного мониторинга и применения цифровых двойников в машиностроении. **Цель исследования** состоит в разработке организационно-технологического подхода к построению цифрового двойника оборудования. **Методология** включает анализ диагностических параметров станочного оборудования, систематизацию данных о вибрации, температуре, нагрузке приводов, а также формирование многоуровневой архитектуры цифрового двойника и алгоритма его внедрения. **Результаты** представлены архитектурой, объединяющей физическое оборудование, средства сбора данных, цифровую модель, предложенная авторами последовательность внедрения предусматривает технический аудит, построение базовой модели состояния и интеграцию с системами ТОиР и MES. **Практическая значимость** заключается в возможности использования предложенного подхода для сокращения внеплановых простоев и совершенствования планирования технического обслуживания на машиностроительных предприятиях.

Ключевые слова: машиностроение, цифровой двойник, технологическое оборудование, металлорежущий станок, ЧПУ, предиктивный мониторинг, техническое состояние, диагностика, остаточный ресурс.

Введение

Современное машиностроительное производство предъявляет к технологическому оборудованию одновременно несколько требований, согласно которым станок должен сохранять устойчивость при изменении режимов резания деталей, работать с минимальным числом незапланированных остановок и предоставлять данные, необходимые для технического обслуживания. Чем выше степень автоматизации производственного участка, тем больше влияние технического состояния отдельной единицы оборудования на функционирование технологической цепочки [1]. При остановке обрабатывающего центра в серийном производстве возникает нарушение производственного ритма, увеличивается вероятность отклонения от календарного графика выпуска продукции.

Для станков с числовым программным управлением (ЧПУ), роботизированных ячеек и автоматизированных линий становится актуальным постоянное наблюдение за изменением параметров, связанных с работой шпиндельных узлов, приводов подачи, гидравлических и охлаждающих систем [2]. Целесообразно связать измеряемые параметры с конкретным физическим объектом, допустимыми изменениями характеристик.

В российской нормативной базе данный подход получил развитие в ГОСТ Р 71240-2024, который распространяется на организацию технического обслуживания и ремонта металлообрабатывающего оборудования по техническому состоянию [3]. Стандарт ориентирован как на отдельные единицы оборудования, так и на цеха, производственные участки, станочный парк предприятия в целом. Введённый в действие с 01.02.2026 года ГОСТ Р 72424-2025 развивает эти положения в рамках цифрового двойника станочного парка, чтобы объединить сведения о состоянии оборудования, результаты мониторинга, эксплуатационные и ремонтные данные, в дальнейшем использовать их при планировании технического обслуживания [4].

Международные исследования рассматривают цифровой двойник в качестве средства синхронизации станка и его виртуального представления, контроля динамических процессов, так, С. Лиу, Дж. Бао, П. Женг показывают, что развитие цифровых двойников в механической обработке связано с переходом к моделям, которые могут сопровождать процесс резания и поддерживать интеллектуальные функции управления [7]. Вместе с тем в исследованиях по предиктивному обслуживанию цифровой двойник часто объединяется с методами оценки текущего состояния и прогнозирования остаточного ресурса [8], [9].

В контексте российского машиностроения обновленная Стратегия развития обрабатывающей промышленности предусматривает увеличение технологических инноваций и производительности в обрабатывающих производствах [1]. Стратегическое направление цифровой трансформации обрабатывающих отраслей включает проекты «Умное производство» и «Цифровой инжиниринг» и ориентирует промышленность на применение управления на основе данных [2]. При этом в условиях новой экономической реальности цифровизация машиностроительного производства начинается с конкретного оборудования, параметров его работы.

Цель исследования – разработка организационно-технологического подхода к применению цифрового двойника и предиктивного мониторинга для управления техническим состоянием оборудования машиностроительного предприятия.

Научная новизна работы состоит в представлении цифрового двойника как звена, связующего измеряемые параметры технического состояния, средства прогнозирования отказов и производственные решения. В концептуальной модели, предлагаемой авторами, цифровой двойник объединяет сведения о фактическом состоянии оборудования, технологической точности, истории обслуживания.

Современные направления цифровой трансформации машиностроения

Техническая база машиностроительного предприятия неоднородна, поскольку в пределах одного цеха одновременно могут эксплуатироваться металлорежущие станки, станки с ЧПУ разных поколений, роботизированные комплексы. Различаются пользовательские интерфейсы, возраст оборудования и возможности установки дополнительных датчиков.

Значимым объектом цифрового контроля выступает металлорежущий станок, на котором формируются геометрия и значительная часть качественных характеристик детали. Изменение состояния шпиндельного узла, направляющих, приводов подачи или инструмента может проявляться повышением вибрации, нагревом, постепенным ухудшением точности. Некоторые из указанных изменений развиваются медленно, станок продолжает выполнять заданную программу, несмотря на то, что его запас его нормального технического состояния сокращается.

В системе планово-предупредительного ремонта момент обслуживания оборудования взаимосвязан с календарным сроком или наработкой, что объяснимо для определенных операций, но не всегда отражает фактический характер деградации оборудования. Так, две однотипные единицы станочного

парка могут иметь одинаковый срок эксплуатации, при этом работать с различной нагрузкой, обрабатывать разные материалы и отличаться по фактическому состоянию.

ГОСТ Р 71240-2024 закрепляет возможность использовать результаты мониторинга технического состояния станочного парка, контроля технологической точности и безразборной диагностики при формировании ремонтных решений [3], тем самым, данные становятся составляющей системы технического обслуживания.

Цифровой двойник усиливает данный подход, по ГОСТ Р 72424-2025 включающий модели отдельных единиц оборудования, производственные информационные связи, архивы ремонтных и эксплуатационных данных. Кроме того, предусматривается постоянное обновление цифрового представления по мере изменения состояния физических объектов, указано среди возможных функций прогнозирование отказов, предиктивное обслуживание и мониторинг [4].

В международной практике базовые требования к архитектуре цифрового двойника производства закрепления серия ISO 23247, анализ которой показывает, что стандарт задаёт структуру, которую можно адаптировать к дискретным и непрерывным типам производства [6]. В 2026 году был принят ISO 23247-6, где выделены варианты объединения виртуальных моделей, а также определены подходы к взаимодействию цифровых двойников, созданных разными разработчиками [5].

Методы предиктивного мониторинга технического состояния оборудования

Для станочного оборудования исходными данными служат параметры, физически связанные с работой контролируемых узлов. При контроле шпиндельного узла информативны вибрационные и температурные характеристики. Изменение спектрального состава вибрации может указывать на нарушение состояния подшипников, дисбаланс или изменение жёсткости соединений, при этом температурный сигнал развивается медленнее, чтобы фиксировать динамику условий трения и охлаждения.

Режущий инструмент – расходуемый элемент, однако его износ влияет на качество обработки и нагрузку станка, для оценки которого применяются акустические, вибрационные, электрические сигналы. Для цифрового двойника состояния инструмента CNC З. Сао в соавт. использовали температуру, вибрацию и ток шпинделя. Объединение этих каналов было связано с решением задач распознавания состояния и прогноза остаточного ресурса инструмента [13].

В условиях машиностроительного производства диагностические сигналы редко бывают стационарными, потому что один станок выполняет несколько операций, меняются глубина резания, режущий инструмент, частота вращения [14], [15]. Резюмируя, авторы предлагают разделить данные цифрового двойника на четыре группы:

1) паспортные характеристики;

2) история эксплуатации;

3) текущие сигналы;

4) производственные данные, в частности, выполняемая операция, инструмент, производственное задание.

Чтобы осуществить первичную оценку состояния, целесообразно использовать нормированную величину отклонения диагностического параметра в контексте формулы (1):

$$d_i = \min[1; \frac{x_i - x_{i0}}{\Delta x_{i\text{доп}}}] \quad (1)$$

где

x_i – текущее значение диагностического признака;

x_{i0} – опорное значение для сопоставимого режима;

$\Delta x_{i\text{доп}}$ – установленный допустимый диапазон отклонения.

На этой основе может рассчитываться обобщённый индекс состояния по формуле (2):

$$H = 1 - \sum_{i=1}^{n} w_i d_i \quad (2)$$

где

w_i – диагностическая значимость соответствующего параметра.

Модели прогноза остаточного ресурса (RUL) строятся сложнее, исходя из объекта, применяются физические модели деградации, статистические методы, алгоритмы машинного обучения. Так, машинное обучение в системах цифрового двойника может быть использовано для прогнозирования отказов и распознавания состояния, но качество результата зависит от корректного соединения модели с физическим объектом [9], [16].

В рамках вращающегося оборудования перспективным считается гибридный подход, когда алгоритм обработки данных обусловливает решение актуальных задач интеграции физических и управляемых моделей, повышение точности виртуального представления объектов [11]. Аналогичные ограничения отмечаются в работе Дж. Вея, где сложность представляет получение высокой точности модели, её перенос на другие режимы и оборудование [12].

Архитектура цифрового двойника технологического оборудования

Архитектура цифрового двойника соответствует структуре производственного объекта (рисунок 1).

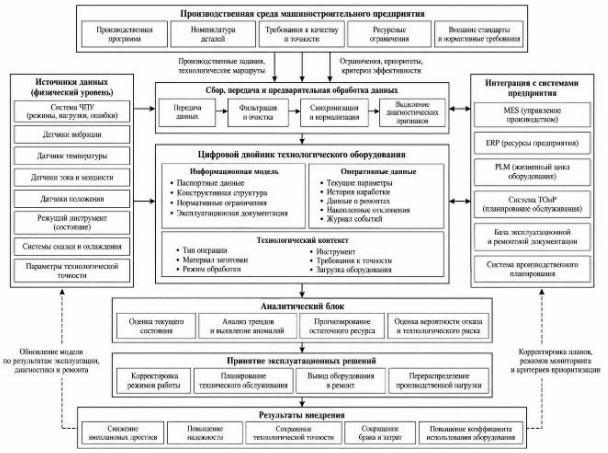


Рисунок 1 – Архитектура цифрового двойника технологического оборудования машиностроительного предприятия (источник: разработано авторами)

Для диагностики актуальна временная синхронизация, если вибрационный сигнал записан отдельно, а параметры режима резания с другим временным шагом, то некоторые зависимости будут потеряны.

Целесообразно разделять техническую и технологическую точность. Станок может оставаться работоспособным с механической точки зрения, но не иметь возможности обеспечить нормативную точность обработки.

В условиях цеха состояние оборудования взаимозависимо с производственным маршрутом. В контексте ISO 23247-6:2026 [5] формализуются варианты композиции нескольких цифровых двойников, чтобы интегрировать взаимообусловленные производственные представления в модели.

Алгоритм внедрения цифровых двойников на машиностроительном предприятии (таблица 1).

Таблица 1
Последовательность внедрения цифрового двойника технологического оборудования

Этап	Содержание	Исходные данные	Практический результат
Технический аудит	Выбор объектов и характерных отказов	Состав парка	Определение пилотной группы
		Ремонты	
		Простои	
		Технологические маршруты	
Цифровой паспорт	Объединение технических сведений	Паспорт	Идентифицированная модель оборудования
		Документация	
		История ТОиР	
Сенсоризация	Подключение недостающих каналов	Данные ЧПУ и внешних датчиков	Наблюдение технических параметров
Базовая модель	Описание нормальных режимов	Вибрация	База для выявления отклонений
		Температура	
		Ток	
		Режимы обработки	
Предиктивный мониторинг	Оценка трендов и прогноз состояния	Текущие и исторические данные	Раннее выявление ухудшения
Интеграция с ТОиР и MES	Передача результата в рабочие процессы	Диагностическое событие	Планирование обслуживания
		Производственный план	
Масшта-бирование	Расширение на участок и цех	Проверенные модели и регламенты	Управление состоянием станочного парка

Источник: разработано авторами.

Концептуальный подход согласуется с отечественной моделью технического обслуживания по состоянию оборудования, в частности, ГОСТ Р 71240-2024 исходит из необходимости получать информационные сведения о состоянии оборудования и использовать их при планировании ремонта [3], а в документе ГОСТ Р 72424-2025 обозначено цифровое представление станочного парка, в котором могут объединяться технологическая плотность, мониторинг состояния, данные о затратах [4].

Оценка результатов применения цифровых двойников в машиностроении

Результат внедрения цифрового двойника следует оценивать, начиная с технических показателей:

1) количество и продолжительность внеплановых остановок оборудования;

2) среднее время между отказами;

3) среднее время восстановления работы оборудования;

4) уровень качества;

5) коэффициент эффективности оборудования.

Задача предиктивного мониторинга заключается в том, чтобы обнаружить развитие проблемы раньше и перенести ремонтные работы из аварийного режима в плановый. Увеличение среднего значения времени между отказами может свидетельствовать о своевременном техническом вмешательстве, тем не менее, показатель нужно оценивать на сопоставимом временном горизонте и с учётом фактической загрузки оборудования.

Цифровой двойник может косвенно влиять на промежуток времени восстановления работы оборудования. Наличие истории состояния, информационных сведений о предшествующих ремонтах и локализации вероятного физического дефекта сокращает время диагностического поиска [17], [18].

Для станочного оборудования целесообразно контролировать число отклонений, обусловленных техническим состоянием оборудования или режущего инструмента. Если модель цифрового двойника помогает раньше обнаружить ухудшение технологической точности, результат проявляется в снижении риска выпуска несоответствующей стандартам качества продукции [19].

Коэффициент эффективности оборудования объединяет степень качества, доступности, а также производительность, при этом его использование в системе показателей предусматривает, что изменение может быть обусловлено графиком машиностроительного производства, организацией смены.

В академических исследованиях [11-13] обозначено, что цифровые двойники в диагностике вращающегося оборудования развиваются в сторону сочетания мониторинга, классификации состояния и прогноза RUL. Экономическая оценка результативности должна строиться на изменениях, которые предприятие зафиксировало после внедрения, в контексте формулы (3):

$$E = \Delta L_{\text{пр}} + \Delta C_{\text{бр}} + \Delta C_{\text{рем}} + C_{\text{цд}} \qquad (3)$$

где

E – результирующий эффект;

$\Delta L_{\text{пр}}$ – снижение потерь по причине внеплановых производственных простоев;

$\Delta C_{\text{бр}}$ – снижение затрат, связанных с браком из-за технического состояния оборудования;

$\Delta C_{\text{рем}}$ – изменение затрат на аварийные и плановые ремонты;

$C_{\text{цд}}$ – затраты на эксплуатацию цифрового двойника в рассматриваемом периоде.

В функционировании машиностроительных предприятий целесообразно учитывать стоимость нарушения производственного маршрута, если отказ произошёл на станке, имеющем свободный резерв, последствия будут ограниченными [20], [21]. Другими словами, цифровой двойник должен содержать признак производственной критичности единицы оборудования, что также предусмотрено действующим российским стандартом ГОСТ [4].

Отечественная промышленная политика связывает цифровую трансформацию обрабатывающих отраслей с развитием умного производства и управления на основе данных [2]. На уровне машиностроительного предприятия нужно решить задачу достоверного представления состояния оборудования и использования его при эксплуатации.

Для эмпирической оценки предложенного подхода авторами выполнен расчёт параметров для производственной машиностроительной группы, включающей 10 обрабатывающих центров с ЧПУ. Временной горизонт – 1 год. Оборудование эксплуатируется в двухсменном режиме по 8 часов в течение 250 рабочих дней, плановый фонд времени составляет 40 тыс. станко-часов. До внедрения системы объём внеплановых простоев принят на уровне 3,2 тыс. станко-часов в год, что соответствует 8% планового фонда времени (таблица 2).

Таблица 2

Технические и производственные результаты внедрения цифрового двойника

Показатель	До внедрения	После внедрения	Изменение	Относительное изменение, %
Количество обрабатывающих центров с ЧПУ, ед.	10	10	–	–
Режим эксплуатации	2 смены по 8 ч	2 смены по 8 ч	–	–
Количество рабочих дней в год	250	250	–	–
Плановый фонд времени, станко-ч/год	40 000	40 000	–	–
Внеплановые простои, станко-ч/год	3 200	1 950	-1 250	-39,1
Доля внеплановых простоев в плановом фонде времени, %	8,0	4,9	-3,1 п.п.	-38,8
Средняя наработка между отказами MTBF, ч	118	164	+46	+39,0
Среднее время восстановления MTTR, ч	5,6	3,9	-1,7	-30,4
Годовой объем выпуска, деталей	50 000	50 000	–	–
Доля брака, %	2,7	1,6	-1,1 п.п.	-40,7
Количество дефектных деталей, ед./год	1 350	800	-550	-40,7
Коэффициент доступности оборудования A	0,890	0,935	+0,045	+5,1
Коэффициент производительности P	0,820	0,840	+0,020	+2,4
Коэффициент качества Q	0,973	0,984	+0,011	+1,1
OEE, %	71,0	77,3	+6,3 п.п.	+8,8

Источник: разработано авторами.

Влияние мониторинга технического состояния проявляется в надежности и качестве обработки. При исходной доле брака 2,7% количество несоответствующих изделий составляет 1 350 единиц. После внедрения контроля состояния инструмента, технологической точности и параметров станка доля брака равна 1,6%, что соответствует 800 деталям. В абсолютном выражении предотвращается выпуск 550 дефектных изделий в год, а относительное снижение уровня брака составляет 40,7%.

Отношение совокупного валового эффекта к затратам на внедрение составляет 1,92, при условии равномерного получения эффекта расчетный срок возмещения первоначальных затрат находится на уровне 6,3 месяца.

Перспективы развития цифровых двойников в машиностроении

Развитие цифровых двойников в краткосрочной перспективе обусловлено расширением состава используемых данных, в диагностике одного узла часто применяются один или два типа сигналов. В ходе изучения развитой системы состояние будет оцениваться одновременно по вибрации, нагрузке приводов, температуре. На промышленном предприятии датчик может быть неправильно установлен, а сигнал – временно отсутствовать.

Физическая модель помогает ограничить область возможных состояний и делает результат интерпретируемым. В исследованиях [11], [12] объединение физических и основанных на данных моделей – одно из основных направлений дальнейшего развития диагностики с использованием цифровых двойников.

Для сигналов с высокой частотой дискретизации передача массива данных в централизованное хранилище не всегда рациональна, Edge-устройство может рассчитывать спектральные признаки или первично выявлять аномалии в производственной системе. В центральную систему передаются подготовленные показатели и фрагменты сигнала, необходимые для последующего анализа.

Специалисту нужно понимать, какие параметры изменились, а практика технической диагностики подразумевает получение объяснимого результата, когда на основе вывода цифровой модели предполагается остановить производственные участки с оборудованием.

В машиностроительном производстве перспективна композиция из цифровых двойников станка, технологической операции и производственной площадки. Например, ухудшение состояния одного станка можно оценивать с учётом производственного задания, если прогноз показывает необходимость обслуживания через определенный интервал, система может проверить производственный план и выбрать момент, когда остановка минимально влияет на выпуск продукции.

Заключение

Согласно проведенному исследованию можно прийти к выводу, что цифровой двойник технологического оборудования целесообразно формулировать как развитие системы технического обслуживания по состоянию. В функционировании машиностроительного предприятия его практическая значимость определяется качеством связи между физическим станком, конкретным техническим решением, диагностическими данными.

Авторами предложена архитектура, в которой цифровой двойник включает пять взаимосвязанных уровней, чтобы разграничить предиктивный подход и систему мониторинга результатов. Цифровой двойник сочетает процессы фиксирования состояния и оценки направлений его изменения с физическим объектом и историей его эксплуатации.

Результативность цифрового двойника должна оцениваться по наблюдаемым изменениям, в том числе внеплановым производственным простоям, количеству физических дефектов, качеству предиктивных предупреждений. Экономический результат формируется на фоне технических изменений на производственном участке.

Дальнейшее развитие технологии связано с совместным использованием физических и основанных на данных моделей, обработкой информации в производственной системе, прогнозированием сохранения технологической точности, объединением цифровых двойников отдельных станков на уровне цеха.

Литература

1. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 09.09.2023 № 2436-р «О внесении изменений в распоряжение Правительства Российской Федерации от 06.06.2020 № 1512-р» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/407545698/ (дата обращения: 18.09.2026).

2. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 07.11.2023 № 3113-р «Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации обрабатывающих отраслей промышленности, относящейся к

сфере деятельности Министерства промышленности и торговли Российской Федерации и о внесении изменений в распоряжение Правительства Российской Федерации от 6 июня 2020 г. № 1512-р» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.law.ru/npd/doc/docid/1303633315/modid/99 (дата обращения: 18.09.2026).
3. ГОСТ Р 71240-2024. Станки металлорежущие. Организация технического обслуживания и ремонта станочного парка в формате «по техническому состоянию». Общие положения. – М.: Российский институт стандартизации, 2024.
4. ГОСТ Р 72424-2025. Станки металлорежущие. Принципы построения цифрового двойника станочного парка предприятия. Основные положения. – М.: Институт стандартизации, 2026.
5. ISO 23247-6:2026 Automation system and integration – Digital twin framework for manufacturing – Part 6: Digital twin composition. – ISO, 2026.
6. Shao G., Frechette S., Srinivasan V. An analysis of the new ISO 23247 series of standards on digital twin framework for manufacturing // International manufacturing science and engineering conference. – American Society of Mechanical Engineers, 2023. – Т. 87240. – С. V002T07A001.
7. Liu S., Zheng P., Bao J. Digital Twin-based manufacturing system: a survey based on a novel reference model // Journal of Intelligent Manufacturing. – 2024. – Т. 35. – №. 6. – С. 2517-2546.
8. Zhong D., Xia Z., Zhu Y., Duan J. Overview of predictive maintenance based on digital twin technology // Heliyon. - 2023. - Vol. 9. - No. 4. - e14534.
9. Chen C., Fu H., Zheng Y., Tao F., Liu Y. The advance of digital twin for predictive maintenance: The role and function of machine learning // Journal of Manufacturing Systems. - 2023. - Vol. 71. - P. 581-594.
10. Куровский С.В., Тазтдинов Д.И. Концепция использования инновационной технологии цифрового двойника в нефтегазовых корпорациях // Инновации и инвестиции. - 2024. - № 12. - С. 31-35.
11. Ma H., Fan C., Zhang Y., Wang Q., Yu K., Ma Z. Digital twin-inspired methods for rotating machinery intelligent fault diagnosis and remaining useful life prediction: A state-of-the-art review and future challenges // Mechanical Systems and Signal Processing. - 2025. - Vol. 232. - Art. 112770.
12. Wei J., Yan C., Liu Y., Liu B., Wu L. Digital twins assisted for fault diagnosis of rotating machinery: a review // Measurement. - 2025. - Art. 118843.
13. Cao Z., Chen L., Li C., Zhu L., Deng Z. Tool-Health Digital Twin for CNC Predictive Maintenance via Innovation-Adaptive Sensor Fusion and Uncertainty-Aware Prognostics // Machines. - 2026. - Vol. 14. - No. 3. - Art. 335.
14. Харисов Р. А., Исаев Ш. З., Латыпов А. М. Расчетная оценка кривых малоцикловой трещиностойкости металла труб // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. - 2012. - № 2. - С. 349-353. - EDN RPEQQB.
15. Харисов Р. А. Совершенствование технологии изоляции трубопроводов полимерными ленточными покрытиями с двусторонним липким слоем : специальность 25.00.19 "Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. - Уфа, 2011. - 246 с. - EDN QFIFNH.
16. Харисов Р. А. Совершенствование технологии изоляции трубопроводов полимерными ленточными покрытиями с двусторонним липким слоем : специальность 25.00.19 "Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. - Уфа, 2011. - 23 с. - EDN ORDYVX.
17. Зайнуллин Р. С., Харисов Р. А., Мухаметзянов А. Н. Оценка влияния низких температур на трещиностойкость сталей, применяемых в нефтегазовой отрасли // Нефтяное хозяйство. - 2017. - № 10. - С. 116-119. - DOI 10.24887/0028-2448-2017-10-116-119. - EDN ZPDYNJ.
18. Харисов Р. А., Хабирова А. Р., Мустафин Ф. М., Хабиров Р. А. Основные причины возникновения дефектов изоляционных покрытий // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. - 2005. - № 1. - С. 16. - EDN TWWMEP.
19. Харисов Р. А., Гаскаров А. И. Анализ причин возникновения дефектов защитных покрытий трубопроводов // Нефтегазовое дело. - 2009. - Т. 7. - № 2. - С. 106-111. - EDN PCFWHN.
20. Патент № 2205324 C1 Российская Федерация, МПК F16L 58/10. Конструкция изоляционной ленты трубопроводов : № 2002114022/06 : заявл. 30.05.2002 : опубл. 27.05.2003 / Ф. М. Мустафин, О. П. Квятковский, И. Ш. Гамбург, Р. А. Харисов, М. С. Квицинская, И. Р. Фархетдинов ; заявитель Уфимский государственный нефтяной технический университет. - EDN VBTIQJ.
21. Харисов Р. А., Кантемиров И. Ф. Оценка фактической степени напряженности элементов трубопроводных систем при эксплуатации // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. - 2011. - № 3(85). - С. 84-90. - EDN OEEBXD.

Innovative development of mechanical engineering based on digital twins and predictive monitoring of the condition of process equipment

Kurovsky S.V., Mishin D.A., Laskin E.P.
LLC "Higher School of Education", Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev

JEL classification: D20, E22, E44, L10, L13, L16, L19, M20, O11, O12, Q10, Q16, R10, R38, R40, Z21, Z32

The increasing complexity of process equipment and the demands placed on manufacturing processes necessitate the integration of predictive monitoring elements and the use of digital twins in mechanical engineering. The objective of this study is to develop an organizational and technological approach to creating a digital twin of equipment. The methodology includes analyzing machine tool diagnostic parameters, systematizing data on vibration, temperature, and drive loads, as well as developing a multi-level digital twin architecture and an implementation algorithm. The results are presented as an architecture that integrates physical equipment, data collection tools, and a digital model. The authors' proposed implementation sequence includes a technical audit, the creation of a basic condition model, and integration with maintenance and repair systems and MES. The practical significance of this approach lies in the potential for reducing unscheduled downtime and improving maintenance planning at mechanical engineering enterprises.

Keywords: mechanical engineering, digital twin, technological equipment, metal-cutting machine, CNC, predictive monitoring, technical condition, diagnostics; residual resource.

References

1. Order of the Government of the Russian Federation dated 09.09.2023 No. 2436-r "On Amending the Order of the Government of the Russian Federation dated 06.06.2020 No. 1512-r" [Electronic resource]. – Access mode: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/407545698/ (date of access: 18.09.2026).
2. Order of the Government of the Russian Federation dated 07.11.2023 No. 3113-r "On Approval of the Strategic Direction in the Field of Digital Transformation of the Manufacturing Industries Related to the Sphere of Activity of the Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation and on Amending the Order of the Government of the Russian Federation dated June 6, 2020 No. 1512-r" [Electronic resource]. – Available at: https://www.law.ru/npd/doc/docid/1303633315/modid/99 (accessed: September 18, 2026).
3. GOST R 71240-2024. Metal-cutting machines. Organization of technical maintenance and repair of the machine tool fleet in the "based on technical condition" format. General provisions. – Moscow: Russian Institute of Standardization, 2024.
4. GOST R 72424-2025. Metal-cutting machines. Principles of constructing a digital twin of an enterprise's machine tool fleet. Basic provisions. – Moscow: Institute of Standardization, 2026.
5. ISO 23247-6:2026 Automation system and integration – Digital twin framework for manufacturing – Part 6: Digital twin composition. – ISO, 2026.
6. Shao G., Frechette S., Srinivasan V. An analysis of the new ISO 23247 series of standards on digital twin framework for manufacturing // International manufacturing science and engineering conference. – American Society of Mechanical Engineers, 2023. – T. 87240. – P. V002T07A001.
7. Liu S., Zheng P., Bao J. Digital Twin-based manufacturing system: a survey based on a novel reference model // Journal of Intelligent Manufacturing. – 2024. – T. 35. – No. 6. – pp. 2517-2546.
8. Zhong D., Xia Z., Zhu Y., Duan J. Overview of predictive maintenance based on digital twin technology // Heliyon. - 2023. - Vol. 9. - No. 4. - e14534.
9. Chen C., Fu H., Zheng Y., Tao F., Liu Y. The advance of digital twin for predictive maintenance: The role and function of machine learning // Journal of Manufacturing Systems. - 2023. - Vol. 71. - P. 581-594.
10. Kurovsky S.V., Taztdinov D.I. The concept of using innovative digital twin technology in oil and gas corporations // Innovations and Investments. - 2024. - No. 12. - P. 31-35.
11. Ma H., Fan C., Zhang Y., Wang Q., Yu K., Ma Z. Digital twin-inspired methods for rotating machinery intelligent fault diagnosis and remaining useful life prediction: A state-of-the-art review and future challenges // Mechanical Systems and Signal Processing. - 2025. - Vol. 232. - Art. 112770.
12. Wei J., Yan C., Liu Y., Liu B., Wu L. Digital twins assisted for fault diagnosis of rotating machinery: a review // Measurement. - 2025. - Art. 118843.
13. Cao Z., Chen L., Li C., Zhu L., Deng Z. Tool-Health Digital Twin for CNC Predictive Maintenance via Innovation-Adaptive Sensor Fusion and Uncertainty-Aware Prognostics // Machines. - 2026. - Vol. 14. - No. 3. - Art. 335.
14. Kharisov R. A., Isaev Sh. Z., Latypov A. M. Calculation of low-cycle crack resistance curves of pipe metal // Electronic scientific journal Neftegazovoe Delo. - 2012. - No. 2. - P. 349-353. - EDN RPEQQB.