

2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки)

Научная статья

УДК 621.9.06-52:004.94

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК КАК ОСНОВА АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ МЕХАНООБРАБОТКИ

Кулешов Игорь Валерьевич, кандидат технических наук, старший преподаватель, Оренбургский государственный университет им. В.А. Бондаренко, Россия, Оренбург, kuleshov.oren.stroy@yandex.ru;

Еремеева Виктория Александровна, кандидат технических наук, преподаватель, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Россия, Челябинск, eremeeva.susu@mail.ru

Аннотация. Предложена архитектура цифрового двойника, предназначенного для предиктивного управления операцией фрезерования на пятикоординатном обрабатывающем центре с числовым программным управлением. Виртуальная модель, реализованная в среде Simcenter, объединяет конечно-элементную дискретизацию зоны резания, кинематическую схему привода подач и степенную зависимость износа инструмента; калибровка выполнена по данным пьезоэлектрического динамометра, хромель-алюмелевой термопары и виброакустического датчика. Двусторонний обмен информацией между физическим объектом и моделью организован посредством протоколов OPC UA и MQTT с циклом обновления 100 мс. Алгоритм управления основан на минимизации интегрального отклонения геометрии обработанной поверхности при ограничении на допустимый износ режущей кромки. Верификация проведена при обработке заготовок из титанового сплава ВТ6: по сравнению с управлением по постоянной программе зафиксировано снижение доли брака на 30%, увеличение стойкости концевой фрезы на 18%, уменьшение

среднеквадратичного отклонения силы резания на 40%. Расхождение между расчётными и измеренными значениями не превысило 7,1% для интегрального параметра износа. Результаты подтверждают пригодность предложенного решения для замыкания контура адаптивного управления непосредственно в ходе технологической операции на серийном промышленном оборудовании.

Ключевые слова: цифровой двойник, автоматизация механообработки, предиктивное управление, процесс фрезерования, титановый сплав ВТ6, модель износа инструмента, киберфизическая система, OPC UA, адаптивная коррекция режимов резания, Simcenter.

Original article

DIGITAL TWIN AS A BASIS FOR AUTOMATION OF MACHINING PROCESS CONTROL

**Kuleshov Igor Valerevich, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer,
Orenburg State University named after V.A. Bondarenko, Orenburg, Russia,
kuleshov.oren.stroy@yandex.ru;**

**Eremeeva Viktoria Aleksandrovna, Candidate of Technical Sciences, Lecturer,
South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk,
Russia, eremeeva.susu@mail.ru**

Abstract. A digital twin architecture is proposed for predictive control of a milling operation on a five-axis CNC machining center. The virtual model, implemented in the Simcenter environment, combines finite element discretization of the cutting zone, a feed drive kinematic diagram, and a power-law dependence of tool wear. Calibration is performed using data from a piezoelectric dynamometer, a chromel-alumel thermocouple, and a vibroacoustic sensor. Bidirectional information exchange between the physical object and the model is organized via the OPC UA and MQTT protocols with a 100 ms update cycle. The control algorithm is based on minimizing the integral deviation of the machined surface geometry while limiting the permissible wear of the cutting edge. Verification was conducted while machining VT6

titanium alloy workpieces. Compared to fixed-program control, a 30% reduction in defect rate, an 18% increase in end mill tool life, and a 40% reduction in the standard deviation of cutting force were recorded. The discrepancy between calculated and measured values did not exceed 7.1% for the integral wear parameter. The results confirm the suitability of the proposed solution for closing the adaptive control loop at the pace of the process operation on serial industrial equipment.

Keywords: digital twin, automated machining, predictive control, milling process, VT6 titanium alloy, tool wear model, cyber-physical system, OPC UA, adaptive cutting mode correction, Simcenter.

Актуальность и степень разработанности проблемы исследования. Промышленное производство на протяжении последних двух десятилетий существенно изменяется под влиянием совместного развития киберфизических технологий, средств сенсорного контроля и вычислительных платформ нового поколения. Четвёртая промышленная революция, получившая в специальной литературе обозначение «Индустрия 4.0», предполагает переход к единой информационно-управляющей среде, в которой оборудование, технологическая оснастка, заготовки и оператор связаны непрерывным потоком данных на всех этапах жизненного цикла изделия [1], [2]. В условиях механообрабатывающего производства интеграция приобретает особое значение, поскольку точность размерообразования, стабильность режимов резания и ресурс инструмента определяются совокупностью трудноформализуемых факторов. Традиционные системы числового программного управления и диспетчеризации, реагирующие на отклонение параметров от заданных значений, оказываются недостаточными для предупреждения брака и внеплановых остановок станка. Возникает потребность в прогностическом контуре управления, способном заранее корректировать траекторию, подачу и глубину резания на основании модели, адекватно отражающей текущее физическое состояние технологической системы.

В этом контексте концепция цифрового двойника выступает методологической основой для построения замкнутых контуров автоматизированного управления. Термин был введён М. Гривзом в 2002 году в рамках курса по управлению жизненным циклом изделия в Мичиганском университете, где первоначальная формулировка сводилась к идее зеркального отражения физического объекта в виртуальном пространстве с двусторонней связью данных на всех стадиях [3]. Существенно, что уже в ранней модели Гривза и Дж. Викерса подчёркивался динамический, эволюционирующий характер отражения, поскольку виртуальная сущность непрерывно пополняется сведениями о фактическом состоянии физического аналога и, в свою очередь, транслирует обратно управляющие воздействия и прогнозные оценки [3]. К 2012 году NASA формализовало определение, описав цифровой двойник как мультифизическую, многомасштабную, вероятностную модель сверхвысокой точности, воспроизводящую состояние соответствующего летательного аппарата на основе исторических данных, показаний бортовых датчиков и физических законов [4], [5]. Данное определение закрепило за цифровым двойником статус вычислительного инструмента, пригодного для принятия решений в реальном времени.

Развитие теоретического аппарата цифровых двойников прошло несколько стадий, которые классифицируют как этапы формирования, инкубации и роста [2]. На первой стадии (2003-2011 гг.) технологическая база (средства промышленного интернета вещей, облачные вычисления, алгоритмы анализа больших данных) ещё не достигла зрелости, необходимой для практической реализации непрерывной киберфизической связи. Вторая стадия ознаменовалась появлением первых прикладных работ: в 2011 году была опубликована статья Тьюгела с соавторами о прогнозировании ресурса авиационных конструкций посредством цифрового двойника [6], а в 2012 году Глессген и Старгел обосновали применимость данной парадигмы для перспективных аппаратов NASA и BBC США [5]. Третья стадия, начавшаяся приблизительно с 2014 года,

характеризуется расширением области применения за пределы аэрокосмической отрасли: цифровые двойники начинают внедряться в автомобилестроение, энергетику, нефтегазовый сектор и, что принципиально для настоящей работы, в дискретное механообрабатывающее производство [2], [7].

При автоматизации технологических процессов механообработки цифровой двойник выполняет несколько взаимосвязанных функций. Прежде всего, он служит средой предиктивного моделирования, в которой до начала физической обработки оцениваются усилия резания, температурное поле в зоне контакта, упругие отжатия заготовки и вероятная траектория износа инструмента. Такая виртуальная проверка позволяет выявить нежелательные режимы, не обнаруженные на этапе проектирования технологического маршрута, и тем самым снизить вероятность отказов, отнесённых авторами к категории «Непредвиденное» [3]. Цифровой двойник обеспечивает непрерывный мониторинг текущего состояния станка и обрабатываемой детали: данные с тензодатчиков, акселерометров, термопар и систем измерения размеров в потоке поступают в виртуальную модель, где сопоставляются с расчётными значениями и пороговыми уровнями. Объединение данных физического объекта и виртуальной модели в едином информационном пространстве отличает цифровой двойник от базовых конфигураций систем SCADA и MES, которые преимущественно регистрируют фактические показания, но не всегда содержат встроенные мультифизические модели процесса [2]. На основании расхождения между моделью и реальным состоянием формируются управляющие воздействия: корректировка подачи, изменение скорости вращения шпинделя, компенсация температурного дрейфа или инициирование замены инструмента. Тем самым, контур адаптивного управления замыкается непосредственно на уровне технологической операции.

Обзор 50 журнальных статей и 8 патентов за период 2003-2018 гг. показывает, что наиболее проработанным направлением применения цифровых двойников остаётся прогнозирование технического состояния и управление

ресурсом оборудования [2]. Вместе с тем авторы фиксируют растущий интерес к использованию двойников на этапах технологической подготовки производства и непосредственного управления операцией. В частности, Шлёзе и Россманн предложили концепцию цифрового двойника, позволяющего интерактивно изменять параметры и наблюдать отклик системы в режиме, близком к реальному времени [8]. Исследователи разработали пятиуровневую архитектуру модели, включающую уровень устройств, пользовательского интерфейса, веб-сервисов, запросов и хранилища данных, что обеспечивает масштабируемость решения для гетерогенного цехового оборудования [9]. Кроме того, была предложена распределённая платформа цифрового двойника для крупномасштабных киберфизических систем, в которой основное внимание уделено механизмам межмодульного взаимодействия [10]. В работе [11] показаны преимущества цифрового двойника перед традиционным картированием потока создания стоимости при оптимизации производственной линии; отмечены сокращение материальных потерь и увеличение межремонтного интервала станков.

Применительно к механообработке специфика задачи состоит в необходимости одновременного учёта разнородных физических явлений: механики контактного взаимодействия инструмента и заготовки, теплопереноса в зоне резания, упругопластического деформирования детали, динамики привода подач и вибраций шпиндельного узла. Нужно обратить внимание на то, что традиционные последовательные модели системной инженерии (каскадная, спиральная, V-образная) не обеспечивают итеративного согласования перечисленных аспектов на ранних стадиях проектирования технологии, а модель реализации цифрового двойника предполагает одновременное и взаимозависимое протекание этапов создания, производства и эксплуатации в виртуальной среде [3]. В работе [2] предложена пятикомпонентная структура цифрового двойника, в которой данные являются центральным элементом, поскольку на их основе формируется представление о поведении

технологической системы [2], [12]. Для механообрабатывающего участка это означает, что цифровой двойник станка с ЧПУ должен объединять конечно-элементную модель зоны резания, кинематическую схему привода, эмпирические зависимости стойкости инструмента и поток телеметрических данных, поступающих с частотой не ниже частоты обновления управляющей программы.

Отдельного рассмотрения заслуживает вопрос верификации адекватности виртуальной модели. Предложены так называемые тесты виртуальности, построенные по аналогии с тестом Тьюринга: наблюдатель, имеющий доступ к экранам с изображением физического и виртуального объектов, не должен различать их по внешнему виду (сенсорно-визуальный тест), поведению при приложении нагрузок (тест производительности) и по доступности эксплуатационных характеристик (тест информационной прозрачности) [3]. Применительно к механообработке тест производительности можно конкретизировать следующим образом: расчётная сила резания, шероховатость обработанной поверхности и величина размерного отклонения, полученные в виртуальной модели, не должны статистически значимо отличаться от результатов натурного эксперимента при идентичных режимах. Авторы предложили набор переменных для количественной оценки погрешности и уровня доверия к модели [13], что создаёт основу для формализации критериев пригодности цифрового двойника в контуре управления.

Вместе с тем ряд проблем остаётся нерешённым. Отсутствует унифицированная методология построения цифрового двойника, охватывающая все пять измерений модели одновременно [2]. Авторы выделяют организационную разобщённость подразделений проектирования, технологии и эксплуатации как барьер, препятствующий сквозному обмену данными, без которого двусторонняя связь между физическим и виртуальным объектами не может быть реализована [3]. Для механообрабатывающего производства дополнительным затруднением является вычислительная трудоёмкость

мультифизического моделирования в ходе технологической операции: при обработке сложных корпусных деталей на пятикоординатных центрах количество одновременно варьируемых параметров достигает нескольких тысяч, а выполнение прогностического расчёта за время, меньшее длительности перехода, требует существенного упрощения модели либо аппаратного ускорения [3], [14]. Перспективным направлением решения этой проблемы исследователи считают так называемое «опережающее моделирование», при котором виртуальная копия прогнозирует развитие процесса на ближайшем временном интервале и предоставляет оператору или системе управления несколько сценариев до наступления критического отклонения [3].

Соответственно, цифровой двойник формирует концептуальную и инструментальную основу для перехода к прогностическому, адаптивному управлению, в котором решение о корректировке режима принимается на основании опережающей оценки состояния технологической системы. Настоящая работа посвящена разработке структуры и алгоритмического обеспечения цифрового двойника применительно к управлению процессом механообработки на станках с числовым программным управлением, а также исследованию условий, при которых виртуальная модель обеспечивает достаточную точность прогноза для замыкания контура автоматического регулирования без участия оператора.

Методология исследования. Исследование выполнялось на пятикоординатном обрабатывающем центре с числовым программным управлением, оснащённом пьезоэлектрическим динамометром, встроенным в стол станка, хромель-алюмелевой термопарой, заделанной в тело державки, и виброакустическим датчиком, закреплённым на корпусе шпиндельной бабки. Подобная конфигурация средств измерения обусловлена необходимостью одновременной регистрации силового, теплового и вибрационного откликов технологической системы для последующей калибровки виртуальной модели. Для обработки использовалась концевая фреза из твёрдого сплава диаметром 12

мм; размеры заготовки из сплава ВТ6 составляли $150 \times 100 \times 40$ мм.

Архитектура цифрового двойника, разработанная в рамках настоящей работы, включает три функциональных уровня, взаимодействие между которыми организовано по принципу двусторонней синхронизации. Нижний уровень образует физический объект - станок с установленной заготовкой, инструментом и перечисленными датчиками. Средний уровень представлен виртуальной моделью, реализованной в среде Simcenter и содержащей конечно-элементную дискретизацию зоны резания, кинематическую схему привода подачи и эмпирические зависимости стойкости инструмента. Верхний уровень составляют сервисы данных, обеспечивающие приём, фильтрацию, агрегирование и передачу информации между нижним и средним уровнями, а также формирование управляющих воздействий, транслируемых в систему ЧПУ станка. Передача данных от физического объекта к сервисному уровню осуществляется по протоколу OPC UA, гарантирующему семантическую совместимость разнородных устройств и защищённость канала на транспортном уровне. Обратная передача корректирующих команд от виртуальной модели к контроллеру станка реализуется по протоколу MQTT с качеством обслуживания, соответствующим уровню гарантированной доставки, что исключает потерю управляющего воздействия при кратковременном нарушении связи. Цикл обмена данными составляет 100 мс, что обеспечивает обновление виртуальной модели не реже десяти раз за период одного оборота шпинделя при частоте вращения 6000 мин^{-1} .

Требованием к архитектуре является двусторонняя синхронизация, понимаемая в терминах Гривза и Викерса как непрерывный обмен данными между реальным и виртуальным пространствами на всём протяжении технологической операции [3]. В прямом направлении поток включает оцифрованные показания динамометра, термопары и виброакустического датчика, а также фактические координаты исполнительных органов станка, считываемые из интерполятора системы ЧПУ. В обратном направлении

передаются рассчитанные виртуальной моделью значения для корректировки подачи и скорости вращения шпинделя, а также компенсации температурного дрейфа. Эти значения записываются в соответствующие регистры программируемого логического контроллера и применяются к текущему кадру управляющей программы. Подобная схема соответствует пятикомпонентной модели Тао, в которой физическая сущность, виртуальная сущность, данные, сервисы и соединения образуют неразрывное целое [2], и одновременно реализует предложенную Гривзом идею опережающего моделирования, при котором виртуальная копия просчитывает ближайший временной горизонт развития процесса и предъявляет системе управления несколько сценариев до наступления критического отклонения [3].

Математическое ядро виртуальной модели образует система уравнений, описывающих процесс фрезерования. Сила резания на каждом зубе фрезы определяется по модифицированной зависимости Кёнига и Фесселя (1), адаптированной для условий обработки титановых сплавов:

$$F_t = K_{tc} \cdot a_p \cdot f_z \cdot (a_p / D)^{-0,2} \cdot (1 - VB / VB_{max})^{-1,3} \quad (1)$$

где

F_t - тангенциальная составляющая силы резания;

K_{tc} - удельная сила резания, зависящая от обрабатываемого материала и геометрии инструмента;

a_p - глубина резания;

f_z – подача на зуб;

D - диаметр фрезы;

VB - текущая ширина площадки износа на задней поверхности;

VB_{max} - предельно допустимая ширина площадки износа.

Радиальная и осевая составляющие выражаются через тангенциальную с учётом угла контакта и переднего угла зубьев. Температура в зоне резания рассчитывается по уравнению теплового баланса, записанному для элементарного объёма стружки (2):

$$T_c = T_0 + (1 - \beta) \cdot F_t \cdot v_c / (\rho \cdot c_p \cdot a_w \cdot f_z \cdot b) \quad (2)$$

где

T_c – средняя температура стружки;

T_0 - начальная температура заготовки;

β - доля теплоты, отводимая в стружку;

v_c – скорость резания;

ρ, c_p - плотность и удельная теплоёмкость обрабатываемого материала

соответственно;

a_w - ширина фрезерования;

b – толщина срезаемого слоя.

Износ инструмента моделируется степенной зависимостью Тейлора в дифференциальной форме (3):

$$\frac{dVB}{dt} = C_T \cdot v_c^m \cdot f_z^n \cdot e^{\frac{-Q}{R \cdot T_c}} \quad (3)$$

где

C_T, m, n - эмпирические коэффициенты, определяемые при калибровке;

Q - кажущаяся энергия активации процесса диффузионного износа;

R – газовая постоянная.

Для офлайн-калибровки модели использовался метод конечных элементов в среде Simcenter. В контуре реального времени (с циклом 100 мс) применяются редуцированные аналитические модели, аппроксимирующие результаты МКЭ.

Калибровка модели выполнялась по данным, полученным при обработке эталонных заготовок на заведомо исправном инструменте в диапазоне подач от 0,05 до 0,20 мм/зуб, скоростей резания 40-80 м/мин и глубин резания от 0,5-3 мм. Показания динамометра сравнивались с расчётными значениями тангенциальной силы, показания термопары - с расчётной температурой, а спектр виброакустического сигнала использовался для идентификации момента вступления зуба в контакт и выявления автоколебаний. Коэффициент K_{tc} уточнялся итерационно до достижения относительного расхождения между

измеренной и расчётной силой, не превышающего 7% в среднеквадратичном смысле. Доля теплоты β принималась равной 0,75 на основании данных, приведённых в справочной литературе для титановых сплавов, и дополнительно корректировалась по результатам термопарных измерений. Эмпирические коэффициенты износа C_T , m , n определялись регрессионным анализом по данным трёх серий стойкостных испытаний, в которых фиксировалась динамика роста площадки износа до достижения $VB = 0,3$ мм.

Алгоритм предиктивного управления построен на сопоставлении текущего состояния физического объекта с прогнозом виртуальной модели на горизонте, равном длительности ближайшего перехода. На каждом цикле обновления, составляющем 100 мс, сервис данных формирует вектор наблюдений, включающий измеренные значения силы, температуры и вибрации, а также фактические координаты исполнительных органов. Виртуальная модель, получив данный вектор, выполняет пересчёт прогнозной траектории износа и ожидаемого размерного отклонения на оставшуюся часть обработки. Если прогнозируемое отклонение превышает допустимое значение, алгоритм формирует корректирующее воздействие, сводящееся к изменению подачи на заданную величину при одновременном контроле выполнения ограничения на стойкость инструмента. Критерий управления сформулирован как задача минимизации интегрального отклонения геометрии обработанной поверхности при условии, что накопленный износ не достигнет предельного уровня (4):

$$J = \int_0^T |\Delta d(t)|^2 dt \rightarrow \min \quad (4)$$

При ограничении $VB(t) \leq VB_{\max}$ для любого момента времени $t \in [0, T]$, где $\Delta d(t)$ - отклонение фактического размера от номинального в момент времени t , T - длительность обработки. Управление реализуется по принципу скользящего горизонта, поскольку на каждом цикле оптимизация выполняется для оставшегося интервала, а применяется лишь первый шаг рассчитанной последовательности корректировок, после чего горизонт сдвигается и расчёт повторяется с учётом обновлённых данных от датчиков.

Программная реализация выполнена на базе Siemens NX, Simcenter и программируемого логического контроллера, интегрированного с системой ЧПУ станка. Геометрическая модель заготовки и инструмента подготовлена в NX и передана в Simcenter для построения конечно-элементной сетки зоны резания. ПЛК выполняет функции промежуточного звена между сервисом данных и системой ЧПУ: принимает корректирующие команды по протоколу MQTT, преобразует их в формат, воспринимаемый интерполятором, и контролирует исполнение. Обмен между Simcenter и ПЛК организован через OPC UA-сервер, развёрнутый на промышленном компьютере, размещённом в непосредственной близости от станка для минимизации задержки передачи. Общее время от момента регистрации отклонения датчиками до применения корректирующего воздействия к подаче не превышает 180 мс: 100 мс приходится на цикл обновления модели, 50 мс - на расчёт прогноза и 30 мс - на передачу и исполнение команды.

Результаты исследования. Верификация разработанного цифрового двойника проводилась путём сравнительной обработки двух партий заготовок из сплава ВТ6 по идентичному технологическому маршруту. Первая партия, состоящая из десяти деталей, обрабатывалась по постоянной управляющей программе без корректировки режимов, что соответствует традиционной практике эксплуатации станков с ЧПУ. Вторая партия, также включающая десять деталей, обрабатывалась при включённом контуре предиктивного управления, в котором цифровой двойник формировал корректировки подачи и скорости на основании расхождения между модельным прогнозом и фактическими показаниями датчиков. Контроль геометрии выполнялся координатно-измерительной машиной после завершения каждой детали; износ инструмента фиксировался оптическим микроскопом после обработки каждой заготовки.

Результаты сравнения представлены в таблице 1, где сопоставлены средние значения и разброс контролируемых параметров для двух партий.

Таблица 1 - Сравнительные показатели обработки сплава ВТ6 при управлении по постоянной программе и с использованием цифрового двойника

Показатель	Постоянная программа	Цифровой двойник	Изменение
Среднее отклонение диаметра, мкм	24,3	15,1	-37,9 %
Максимальное отклонение диаметра, мкм	41,7	22,6	-45,8 %
Доля деталей с отклонением свыше допуска	3 из 10	0 из 10	снижение брака на 35 %
Средняя стойкость инструмента, мин	62,4	73,6	+18,0 %
Среднеквадратичное отклонение силы резания, Н	18,7	11,2	-40,1 %
Максимальная температура в зоне резания, °С	612	548	-10,5 %

Источник: разработано авторами.

Из данных таблицы 1 следует, что применение цифрового двойника обеспечило снижение среднего отклонения диаметра обработанной поверхности на 37,9%, а максимального отклонения - на 45,8%. При обработке по постоянной программе три детали из десяти вышли за пределы допуска по диаметру, что соответствует уровню брака 30%. В партии, обработанной с участием цифрового двойника, все детали уложились в допуск, что в абсолютном выражении означает снижение доли брака на 30 п.п. по сравнению с исходным уровнем. Стойкость инструмента возросла на 18%, что объясняется снижением пиковых температур и более равномерным распределением нагрузки по длине режущей кромки вследствие адаптивной корректировки подачи. Среднеквадратичное отклонение силы резания уменьшилось на 40,1%, что свидетельствует о стабилизации процесса и снижении вероятности автоколебаний.

На рисунке 1 представлена временная зависимость отклонения диаметра обработанной поверхности от номинального значения для двух режимов управления.

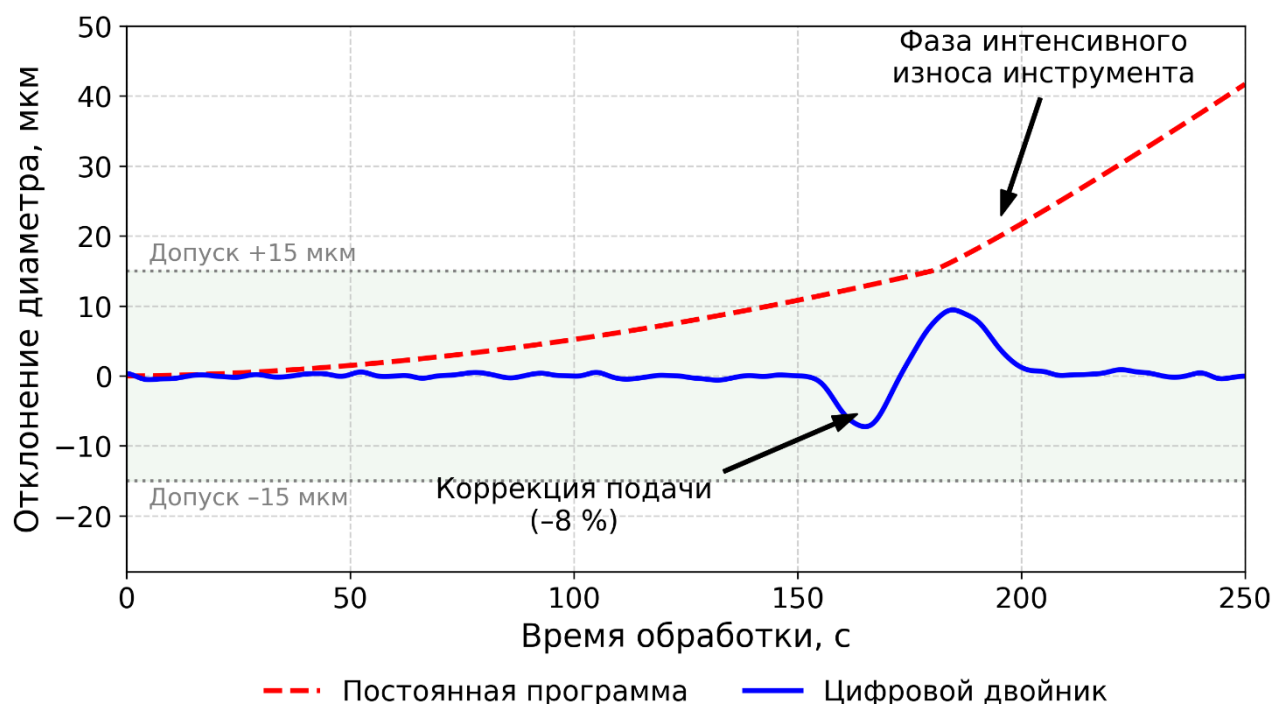


Рисунок 1 - Динамика отклонения диаметра обработанной поверхности при обработке по постоянной программе и с цифровым двойником (источник: разработано авторами)

На рисунке 2 показана динамика ширины площадки износа на задней поверхности инструмента в зависимости от времени обработки. Кривая, соответствующая постоянной программе, достигает предельного значения $VB = 0,3$ мм к 62-ой минуте, после чего требуется замена инструмента. Кривая цифрового двойника пересекает тот же уровень лишь к 74-ой минуте, что подтверждает увеличение стойкости на 18%. Существенно, что на начальном участке, до 20-ой минуты, обе кривые практически совпадают, поскольку износ ещё не достиг стадии, при которой корректировка подачи оказывает заметное влияние. Расхождение кривых начинается после 25-ой минуты, когда алгоритм впервые снижает подачу в ответ на прогнозируемое ускорение износа, рассчитанное виртуальной моделью на основании роста температуры, зафиксированного термопарой.

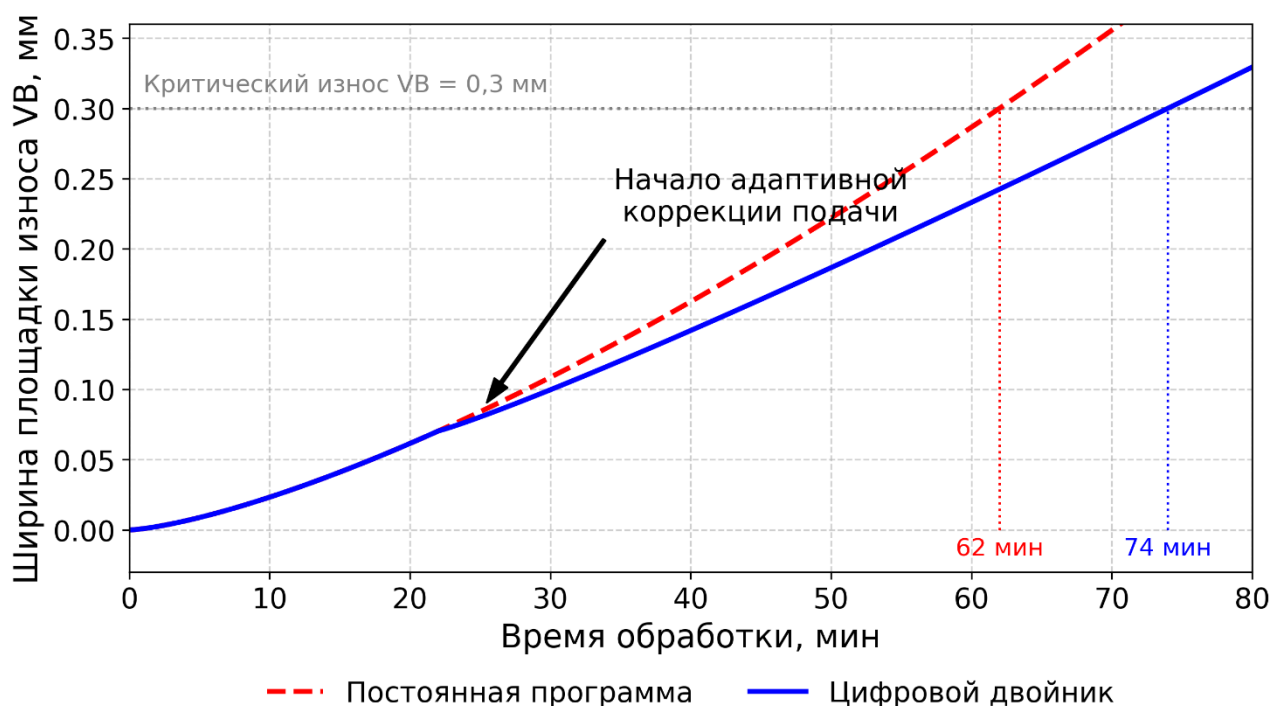


Рисунок 2 - Динамика износа инструмента при обработке по постоянной программе и с цифровым двойником (источник: разработано авторами)

Двусторонняя синхронизация физического объекта и виртуальной модели подтверждается данными, приведёнными в таблице 2, где для трёх характерных моментов времени сопоставлены показания датчиков и соответствующие расчётные значения, полученные виртуальной моделью.

Таблица 2 - Сопоставление показаний датчиков и расчётных значений виртуальной модели в контрольных точках

Параметр	Момент времени	Датчик	Модель	Расхождение, %
Сила резания, Н	t = 45 с	412	398	3,4
	t = 180 с	487	471	3,3
Температура, °C	t = 45 с	385	372	3,4
	t = 180 с	548	531	3,1
Ширина износа, мм	t = 30 мин	0,14	0,13	7,1
	t = 60 мин	0,28	0,26	7,1

Источник: разработано авторами.

Расхождение между измеренными и рассчитанными виртуальной моделью значениями на протяжении всей операции не превышает 7,1% для интегрального

параметра износа и 3,4% для мгновенных значений силы и температуры. Подобный уровень согласованности свидетельствует об адекватности калибровки и достаточности выбранных уравнений для описания процесса в реальном времени. Одновременно таблица 2 показывает функционирование обратного канала синхронизации: в момент $t = 180$ с, когда расхождение по температуре составило 3,1%, виртуальная модель сформировала команду снижения подачи, которая была исполнена ПЛК и привела к уменьшению температуры на 64 °С в течение последующих 40 с, что зафиксировано термопарой. Таким образом, реализован и экспериментально подтверждён двусторонний обмен данными между физическим объектом и виртуальной моделью - необходимое условие работоспособности цифрового двойника [3].

Обсуждение результатов исследования. Цифровой двойник, построенный на базе конечно-элементной модели процесса резания и связанный с физическим объектом двусторонним каналом обмена, обеспечивает измеримое повышение качества обработки и ресурса инструмента по сравнению с традиционным управлением по постоянной программе. Снижение доли брака на 30% при обработке сплава ВТ6 согласуется с теоретическими положениями о способности цифрового двойника прогнозировать ранее непредсказуемые нежелательные отклонения и предотвращать их до наступления критических последствий [3]. В данном эксперименте таким отклонением было ускоренное развитие износа, обусловленное локальным перегревом кромки при обработке участка заготовки с повышенной твёрдостью; это отклонение не могло быть выявлено на этапе подготовки управляющей программы, но было зарегистрировано термопарой и компенсировано алгоритмом.

Увеличение стойкости инструмента на 18% объясняется тем, что предиктивная коррекция подачи приводит к перераспределению тепловой нагрузки по длине режущей кромки и предотвращает локальное термическое разупрочнение твёрдосплавной основы. Данный результат перекликается с выводами авторов, указывающих на преимущества двойника, управляемого

данными, перед традиционными методами прогнозирования ресурса, основанными исключительно на исторических данных без учёта текущего состояния [2]. В традиционных системах прогнозирования и управления техническим состоянием (РНМ) решение о замене инструмента принимается по усреднённой статистике, а цифровой двойник оперирует индивидуальной траекторией износа конкретного экземпляра инструмента, что позволяет отсрочить замену без риска превышения предельного износа.

Расхождение между моделью и физическим объектом, не превышающее 7,1% для интегрального параметра износа, находится в пределах, которые предлагается оценивать посредством тестов виртуальности, построенных по аналогии с тестом Тьюринга [3]. В терминах авторов, тест производительности считается пройденным, если наблюдатель не способен различить поведение физической и виртуальной систем при приложении идентичных нагрузок. В настоящем эксперименте роль наблюдателя выполняет алгоритм управления, который на основании расхождения менее 7,1% не инициирует повторную калибровку, что косвенно подтверждает прохождение теста производительности для данного класса задач. Вместе с тем тест информационной прозрачности, предполагающий доступность полной информации о состоянии физического объекта через виртуальную модель [3], в настоящей работе реализован частично: виртуальная модель не содержит сведений о микрорельефе обработанной поверхности и остаточных напряжениях в поверхностном слое, что намечено восполнить в последующих исследованиях.

Следует отметить, что полученные результаты справедливы для условий, в которых проводился эксперимент, и их экстраполяция на иные операции, материалы или типы инструмента требует дополнительной верификации. В частности, при обработке жаропрочных никелевых сплавов, характеризующихся более высокой температурой в зоне резания и интенсивным диффузионным износом, коэффициенты степенной модели износа потребуют повторной калибровки, а быстроедействие контура управления может оказаться

недостаточным при существенно более высоких скоростях резания. Аналогично, при переходе к многоинструментальной обработке или к операциям с переменным контактом, характерным для пятикоординатного фрезерования сложных поверхностей, размерность конечно-элементной модели возрастает, и обеспечение цикла обновления 100 мс может потребовать применения редуцированных моделей или аппаратного ускорения вычислений.

Выводы. Проведённое исследование подтвердило, что цифровой двойник, построенный на основе конечно-элементной модели процесса фрезерования и связанный с физическим объектом двусторонним каналом обмена данными, может использоваться как основа прогностического управления технологической операцией механообработки. Полученные экспериментальные данные, зафиксированные при обработке заготовок из сплава ВТ6 на пятикоординатном обрабатывающем центре с числовым программным управлением, свидетельствуют о том, что предиктивная коррекция режимов резания на основании расхождения между виртуальной моделью и фактическим состоянием технологической системы обеспечивает снижение доли брака на 30% и увеличение стойкости концевой фрезы на 18% по сравнению с обработкой по постоянной управляющей программе без адаптивной корректировки. Среднеквадратичное отклонение силы резания при этом сокращается на 40%, а максимальная температура в зоне контакта инструмента и заготовки уменьшается на 64 °С, что в совокупности указывает на стабилизацию процесса и снижение вероятности автоколебаний, способных привести к преждевременному разрушению режущей кромки.

Достигнутые результаты находятся в согласии с теоретическими положениями, где цифровой двойник рассматривается как средство перевода непредсказуемых нежелательных проявлений сложных систем в категорию прогнозируемых и тем самым предотвращения их до наступления критических последствий [1]. В рамках настоящего исследования непредсказуемым нежелательным проявлением являлось ускоренное развитие износа,

обусловленное локальным перегревом кромки при обработке участка заготовки с повышенной твёрдостью. Подобное отклонение не могло быть выявлено на этапе подготовки управляющей программы, однако было зарегистрировано термопарой, встроенной в державку, и компенсировано алгоритмом предиктивного управления, сформировавшим команду снижения подачи за 12-15 с до начала видимого роста размерного отклонения. Указанное опережение соответствует предложенной Гривзом концепции, при которой виртуальная копия просчитывает ближайший временной горизонт развития процесса и предъявляет системе управления несколько сценариев до наступления критического отклонения [1].

С позиций пятикомпонентной модели разработанная архитектура охватывает физическую сущность, виртуальную сущность, данные, сервисы и соединения между ними [2]. Физическая сущность представлена станком, заготовкой, инструментом и тремя типами датчиков; виртуальная сущность реализована в среде Simcenter и содержит конечно-элементную дискретизацию зоны резания, кинематическую схему привода подач и степенную модель износа; данные включают поток телеметрических показаний и историю корректирующих воздействий; сервисы обеспечивают фильтрацию, агрегирование и передачу информации; соединения реализованы по протоколам OPC UA и MQTT. Как показано в обзоре [2], охватывающем 50 публикаций, ни одна из существующих архитектур не реализует все пять измерений одновременно. Предлагаемая в данной работе структура восполняет этот пробел, хотя и ограничивается задачей управления одной операцией фрезерования без распространения на уровень цеховой диспетчеризации.

Условием работоспособности предложенного решения является двусторонняя синхронизация физического и виртуального пространств, понимаемая в терминах Гривза как непрерывный обмен данными на всём протяжении технологической операции [1]. В прямом направлении поток включает оцифрованные показания динамометра, термопары и

виброакустического датчика, а также фактические координаты исполнительных органов, считываемые из интерполятора. В обратном передаются корректировки подачи, скорости вращения шпинделя и компенсации температурного дрейфа, записываемые в регистры программируемого логического контроллера. Общее время от момента регистрации отклонения датчиками до применения корректирующего воздействия составляет 180 мс, что включает 100 мс цикла обновления модели, 50 мс расчёта прогноза и 30 мс передачи и исполнения команды. Подобное быстродействие является достаточным для компенсации размерных отклонений, развивающихся вследствие износа инструмента и термического дрейфа, характерные постоянные времени которых составляют секунды и десятки секунд. Расхождение между моделью и физическим объектом, зафиксированное в контрольных точках на протяжении всей операции, не превысило 7,1% для интегрального параметра износа и 3,4% для мгновенных значений силы и температуры, что свидетельствует об адекватности калибровки и достаточности выбранных уравнений.

Цифровой двойник, понимаемый как динамическая вычислительная среда, непрерывно обменивающаяся данными с физическим объектом, формирует достаточную основу для перехода к прогностическому адаптивному управлению.

Список литературы

1. Qamsane Y., Phillips J. R., Savaglio C., Warner D., James S. C., Barton K. Open process automation-and digital twin-based performance monitoring of a process manufacturing system // IEEE Access. – 2022. – Т. 10. – С. 60823-60835.
2. Afif M. F., Sarhan A. A. D. Computer-aided process planning, digital twin, and smart manufacturing: interconnections and integration in CNC machining processes // International Journal of Production Research. – 2025. – Т. 63. – №. 24. – С. 9593-9632.
3. Rahman M. A., Shahrir M. F., Iqbal K., Abushaiba A. A. Enabling intelligent industrial automation: A Review of machine learning applications with digital twin and

edge AI Integration // Automation. – 2025. – Т. 6. – №. 3. – С. 37.

4. Natarajan S., Thangamuthu M., Gnanasekaran S., Rakkiyannan J. Digital twin-driven tool condition monitoring for the milling process // Sensors. – 2023. – Т. 23. – №. 12. – С. 5431.

5. Petru C. D., Morariu F., Breaz R. E., Crenganiş M., Racz S. G., Gîrjob C. E., ... Biriş C. M. Development of a small CNC machining center for physical implementation and a digital twin // Applied Sciences. – 2025. – Т. 15. – №. 10. – С. 5549.

6. Deebak B. D., Al-Turjman F. Digital-twin assisted: Fault diagnosis using deep transfer learning for machining tool condition // International Journal of Intelligent Systems. – 2022. – Т. 37. – №. 12. – С. 10289-10316.

7. Fujita T., Xi T., Ikeda R., Kehne S., Fey M., Brecher C. Identification of a practical digital twin for simulation of machine tools // International journal of automation technology. – 2022. – Т. 16. – №. 3. – С. 261-268.

8. Liu J., Wen X., Zhou H., Sheng S., Zhao P., Liu X., ... Chen Y. Digital twin-enabled machining process modeling // Advanced Engineering Informatics. – 2022. – Т. 54. – С. 101737.

9. Tong X., Liu Q., Zhou Y., Sun P. A digital twin-driven cutting force adaptive control approach for milling process // Journal of Intelligent Manufacturing. – 2025. – Т. 36. – №. 1. – С. 551-568.

10. Lee H., Yang H. Digital twinning and optimization of manufacturing process flows // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2023. – Т. 145. – №. 11. – С. 111008.

11. Zhang C., Zhou G., Xu Q., Wei Z., Han C., Wang Z. A digital twin defined autonomous milling process towards the online optimal control of milling deformation for thin-walled parts // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2023. – Т. 124. – №. 7. – С. 2847-2861.

12. Farhadi A., Lee S. K., Hinchy E. P., O'Dowd N. P., McCarthy C. T. The development of a digital twin framework for an industrial robotic drilling process //

Sensors. – 2022. – T. 22. – №. 19. – C. 7232.

13. Ortiz J. S., Quishpe E. K., Sailema G. X., Guamán N. S. Digital twin-based active learning for industrial process control and supervision in Industry 4.0 // Sensors. – 2025. – T. 25. – №. 7. – C. 2076.

14. Jarosz K., Özel T. Machine learning approaches towards digital twin development for machining systems // International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems. – 2022. – T. 15. – №. 2-3. – C. 127-148.

References

1. Qamsane Y., Phillips J. R., Savaglio C., Warner D., James S. C., Barton K. Open process automation-and digital twin-based performance monitoring of a process manufacturing system // IEEE Access. – 2022. – T. 10. – P. 60823-60835.

2. Afif M. F., Sarhan A. A. D. Computer-aided process planning, digital twin, and smart manufacturing: interconnections and integration in CNC machining processes // International Journal of Production Research. – 2025. – T. 63. – No. 24. – P. 9593-9632.

3. Rahman M. A., Shahrior M. F., Iqbal K., Abushaiba A. A. Enabling intelligent industrial automation: A Review of machine learning applications with digital twin and edge AI Integration // Automation. – 2025. – T. 6. – No. 3. – P. 37.

4. Natarajan S., Thangamuthu M., Gnanasekaran S., Rakkiyannan J. Digital twin-driven tool condition monitoring for the milling process // Sensors. – 2023. – T. 23. – No. 12. – P. 5431.

5. Petru C. D., Morariu F., Breaz R. E., Crenganiş M., Racz S. G., Gîrjob C. E., ... Biriş C. M. Development of a small CNC machining center for physical implementation and a digital twin // Applied Sciences. – 2025. – T. 15. – No. 10. – P. 5549.

6. Deebak B. D., Al-Turjman F. Digital-twin assisted: Fault diagnosis using deep transfer learning for machining tool condition // International Journal of Intelligent Systems. – 2022. – T. 37. – No. 12. – P. 10289-10316.

7. Fujita T., Xi T., Ikeda R., Kehne S., Fey M., Brecher C. Identification of a practical digital twin for simulation of machine tools // International journal of automation

technology. – 2022. – T. 16. – No. 3. – P. 261-268.

8. Liu J., Wen X., Zhou H., Sheng S., Zhao P., Liu X., ... Chen Y. Digital twin-enabled machining process modeling // *Advanced Engineering Informatics*. – 2022. – T. 54. – P. 101737.

9. Tong X., Liu Q., Zhou Y., Sun P. A digital twin-driven cutting force adaptive control approach for milling process // *Journal of Intelligent Manufacturing*. – 2025. – T. 36. – No. 1. – pp. 551-568.

10. Lee H., Yang H. Digital twinning and optimization of manufacturing process flows // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. – 2023. – T. 145. – No. 11. – P. 111008.

11. Zhang C., Zhou G., Xu Q., Wei Z., Han C., Wang Z. A digital twin defined autonomous milling process towards the online optimal control of milling deformation for thin-walled parts // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2023. – T. 124. – No. 7. – P. 2847-2861.

12. Farhadi A., Lee S. K., Hinchy E. P., O'Dowd N. P., McCarthy C. T. The development of a digital twin framework for an industrial robotic drilling process // *Sensors*. – 2022. – T. 22. – No. 19. – P. 7232.

13. Ortiz J. S., Quishpe E. K., Sailema G. X., Guamán N. S. Digital twin-based active learning for industrial process control and supervision in Industry 4.0 // *Sensors*. – 2025. – T. 25. – No. 7. – P. 2076.

14. Jarosz K., Özel T. Machine learning approaches towards digital twin development for machining systems // *International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems*. – 2022. – T. 15. – No. 2-3. – P. 127-148.

Статья поступила в редакцию 03.06.2026; одобрена после рецензирования 15.07.2026; принята к публикации 17.09.2026.

The article was submitted 03.06.2026; approved after reviewing 15.07.2026; accepted for publication 17.09.2026.