



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Жизненный цикл изделия: мониторинг процессов механической обработки и фильтрация виброакустических сигналов

Михаил Гимадеев^a, Вадим Стельмаков^{b, *}, Евгений Шеленок^c

Тихоокеанский государственный университет, ул. Тихоокеанская, 136, г. Хабаровск, 680035, Россия

^a <https://orcid.org/0000-0001-6685-519X>, 009063@pnu.edu.ru; ^b <https://orcid.org/0000-0003-2763-1956>, 009062@pnu.edu.ru;
^c <https://orcid.org/0000-0003-4495-9558>, 007141@pnu.edu.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.91:681.5

История статьи:

Поступила: 29 мая 2024
 Рецензирование: 23 июня 2024
 Принята к печати: 12 июля 2024
 Доступно онлайн: 15 сентября 2024

Ключевые слова:

Жизненный цикл
 Датчики измерения оборудования
 Акустическая диагностика
 Вибрация
 Контроль состояния инструмента
 Онлайн-мониторинг
 Механическая обработка

Финансирование

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FEME–2024–0010).

АННОТАЦИЯ

Введение. В современном производстве жизненный цикл изделия включает в себя множество этапов, начиная от проектирования и заканчивая утилизацией. Одним из ключевых этапов является механическая обработка, качество и эффективность которой непосредственно влияют на долговечность и функциональность конечного продукта. В условиях высокой конкуренции и стремления к снижению себестоимости продукции актуальной задачей становится оптимизация процессов механической обработки. Одним из перспективных подходов является использование виброакустических сигналов для непрерывного мониторинга состояния оборудования и изделий. **Предмет.** В статье рассматриваются основные этапы жизненного цикла изделия с акцентом на мониторинг процессов механической обработки. Анализируются современные подходы к фильтрации виброакустических сигналов, включая применение быстрого преобразования Фурье и различных оконных функций, для улучшения точности анализа и выявления дефектов. **Цель работы.** Разработка алгоритма работы системы онлайн-мониторинга по контролю состояния режущего инструмента на основе создания цифровой тени с применением виброакустического комплекса. Основные решаемые задачи заключаются в установлении диапазонов применимости АЧХ акустических сигналов, оптимальных оконных функций и в установлении взаимосвязей степени износа режущего инструмента с результатами вибродиагностики и измерения шероховатости. **Метод и методология.** Рассматриваются методы фильтрации виброакустических сигналов и их применение в реальных производственных условиях. Особое внимание уделяется роли цифровых двойников в интеграции данных мониторинга и фильтрации, что позволяет создать виртуальную модель изделия для прогнозирования его поведения и оптимизации процессов на этапах жизненного цикла. Выполнено сравнение различных методов и технологий, проведен анализ практических примеров внедрения цифровых двойников в производственные процессы. **Результаты и их обсуждение.** Обобщены текущие исследования и практические наработки, выявлены существующие проблемы и предложены перспективные направления для дальнейших исследований в области мониторинга, фильтрации сигналов и применения цифровых двойников в механической обработке.

Для цитирования: Гимадеев М.Р., Стельмаков В.А., Шеленок Е.А. Жизненный цикл изделия: мониторинг процессов механической обработки и фильтрация виброакустических сигналов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2024. – Т. 26, № 3. – С. 94–113. – DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.3-94-113.

Введение

Трансформация промышленности в ходе реализации концепции «Индустрия 4.0» открывает перспективы применения новых высокопроизводительных подходов в управлении на всех стадиях жизненного цикла (ЖЦ) изделия (Life Cycle Stage) [1], в том числе за счет применения

цифровых двойников (DT – Digital Twin) [2, 3]. Технология DT – это основной компонент киберфизической системы (CPS – Cyber Physical Systems) [4], которая позволяет собирать большие объемы данных (Big Data) и управлять ими [5], определять поведение и отражать состояние производственной системы в реальном времени [6], а также анализировать, моделировать, прогнозировать и оптимизировать различные производственные процессы [7–9].

В настоящее время инициативность, проявляемая предприятиями, нацелена на синтез науки, технологий и инноваций с применением

*Адрес для переписки

Стельмаков Вадим Александрович, к.т.н., доцент
 Тихоокеанский государственный университет,
 ул. Тихоокеанская, 136,
 680035, г. Хабаровск, Россия
 Тел.: +7 962 221-74-60, e-mail: 009062@pnu.edu.ru

цифровизации и автоматизации процессов проектирования, производства [10, 11] и т. п. При этом акцент делается на совершенствование системы функционирования информационной поддержки процессов ЖЦ – CALS (Continuous Acquisition and Life Cycle Support), в частности на совершенствование электронной технической документации (ЭТД), технологии цифровых двойников [12, 13] и систем менеджмента качества (СМК) [14, 15]. Для управления ЭТД, обеспечения интегрированной логистической поддержки (ИЛП) [16] данных и доступа к ним

на любом этапе применяются системы управления ЖЦ изделий – PLM (Product Lifecycle Management) (рис. 1).

На этапе проектирования используются системы автоматизированного проектирования (САПР) и системы управления поставками комплектующих – SCM (Component Supplier Management). Для решения проблем совместного функционирования компонентов САПР (CAD – Computer Aided Design / CAE – Computer Aided Engineering) применяются системы управления проектными данными – PDM (Product Data Management) [17].

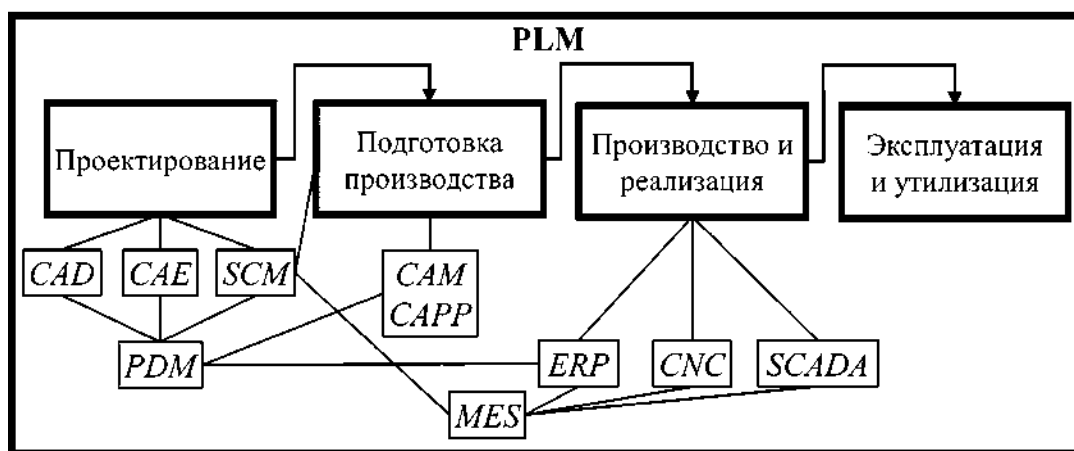


Рис. 1. Информационная поддержка этапов ЖЦ изделия

Fig. 1. Information support for the PLC stages

В цифровых производственных системах технологическая подготовка производства (ТПП) осуществляется в системе САПР ТПП, включающей в себя автоматизированную ТПП – CAPP (Computer Aided Process Planning) и разработку управляющих программ для технологического оборудования (ТО) с ЧПУ (CNC) – CAM (Computer Aided Manufacturing).

Программное управление выполняется посредством системы ЧПУ на базе специализированных компьютеров, интегрированных в ТО. Информация, полученная во время производства, может направляться в систему планирования и управления предприятием – ERP (Enterprise Resource Planning). Для выполнения функций сбора и обработки данных о состоянии ТО и технологических процессов (ТП) в состав автоматизированной системы управления (АСУ) вводят систему программно-аппаратного комплекса сбора данных и диспетчерского контроля [18] – SCADA (Supervisory Control and

Data Acquisition), взаимодействующую с производственной исполнительной системой – MES (Manufacturing Execution System).

Согласно ГОСТ 57700.37–202 цифровой двойник (DT) – это система, состоящая из цифровой модели изделия и двусторонних связей с изделием и (или) его составными частями.

В работе авторов Lu и др. [7] рассмотрена концептуальная модель DT, состоящая из трех элементов – физического пространства, цифрового пространства и двусторонней динамической связи между ними; информационной модели, которая собирает и объединяет выбранную информацию из существующих баз данных; методологии, описывающей поддержку принятия решений в рамках ЖЦ.

Для обеспечения стабильности ТП и других элементов производства, непосредственно влияющих на качество изделия [19–21], при внедрении DT в этапы ЖЦ необходимо обратить внимание на совершенствование комплексной

обработки и передачи накопленных потоковых данных, полученных от реального изделия и описывающих его поведение, – цифровой тени (DS – Digital Shadow) [22, 23]. DS помогает сконцентрировать массивы данных из разных подсистем с целью их обработки и фильтрации для использования в DT. Например, при механической обработке резанием в цифровое пространство от изделия поступает избыточно большой массив данных разного характера о параметрах процесса, часть которых не имеет прямого отношения к DT.

Избыточные данные возникают в основном из-за отсутствия диапазонов измеряемых параметров изделия. Вместе с этим в повторяющихся или несильно отличающихся процессах на этапе производства актуальной задачей при применении DS является генерирование содержательных (эффективных) данных.

Riesener M., Schuh G. и др. предложили структуру DS, которая позволяет собирать и объединять информацию на основе разнородных источников данных [24, 25]. В работе авторов Федонина О.Н. и др. предложена структура автоматизированной системы, которая обеспечивает сбор и анализ данных металлорежущих станков с ЧПУ в рамках системы управления производством MES [26]. Интеграция имитационной модели DS с MES была предложена Negri S. и др. [27] путем создания DT, используемого для принятия решений, включая интеллектуальную систему, которая содержит правила и знания для выбора между альтернативами.

Таким образом, можно заключить, что в настоящий момент различными научными группами исследуется DT различных уровней (иерархий), начиная от DT режущего инструмента (РИ) [5] и заканчивая DT процесса эксплуатации. Этот факт говорит нам о том, что PLM-системы могут интегрироваться с DT для обеспечения более эффективного управления всем ЖЦ [7, 22, 28], а также могут использоваться для моделирования и анализа различных процессов [29]. К примеру, за счет мониторинга в режиме реального времени (ОМ – онлайн-мониторинга) [30, 31] можно уточнять представление о техническом состоянии ТО, проводить его диагностику, прогнозировать оставшейся срок службы и др. [32–34].

Поскольку одним из основных элементов технологической системы является металлоре-

жущий инструмент, то со стороны создания DT и DS он заслуживает наибольшего внимания как в части обеспечения стабильности процесса механической обработки, так и в части качества получаемых поверхностей. Однако, учитывая многофакторность процесса механической обработки, для формирования DT и DS необходимо постоянно получать данные о процессе механической обработки в реальном времени. В работах [35–39] описываются системы мониторинга контроля состояния инструмента (КСИ) в реальном времени на ТО. Анализ научных работ [40–42] позволил сформулировать цель мониторинга КСИ: оценка состояния РИ, обнаружение сколов и поломки инструмента. Учитывая сложность прогнозирования состояния инструмента, используют несколько датчиков [43–45]. Однако наличие большого количества датчиков приводит к повторяющимся (избыточным) данным, что в конечном итоге снижает эффективность применения систем КСИ. Таким образом, выбор подходящих датчиков и соответственно методов мониторинга очень важен [46–49].

В исследованиях многих авторов описывается применение мониторинга на основе сигналов силы [40], акустической эмиссии (АЭ) [42, 50], мощности, тока [51, 52], температуры и др. [33, 45]. Динамометры и приборы АЭ являются дорогостоящим оборудованием, и для измерения сигналов, в том числе значений сил резания, требуются высококвалифицированные специалисты. Система АЭ также достаточно сложна и включает в себя комплект преусилителей, кабельные линии, блоки предварительной обработки и преобразования сигналов АЭ, ЭВМ с необходимым математическим обеспечением [53], средства отображения информации, а также блоки калибровки системы [54]. Результаты, полученные при помощи термодатчиков, часто ненадежны, потому что инфракрасные лучи не позволяют измерить реальную температуру в зоне резания [33]. Точно так же использование термопары [53] имеет свои минусы для операций фрезерования из-за сложности процесса.

Вместе с этим анализ научных работ последних лет показывает, что тематика КСИ с использованием виброакустических (ВА) сигналов изучается фрагментарно. В основном исследования сосредоточены на двух областях: онлайн-анализе износа режущего инструмента на основе вибра-

ции [55] и анализе шероховатости поверхности с использованием звукового сигнала во время механообработки [51, 56]. Несмотря на то что указанные области имеют свои особенности и методы, интеграция их результатов может привести к созданию более комплексной и эффективной системы ОМ КСИ. Такая система при должном методическом описании, настройке, записи и фильтрации ВА-сигналов позволит получить легко перенастраиваемый и надежный комплекс мониторинга с низкой себестоимостью, а также позволит обеспечить требуемое качество продукции, повысить производительность и снизить затраты за счет более точного КСИ и процесса обработки.

Для реализации концепции мониторинга механической обработки на ТО с ЧПУ (Technological Equipment with CNC) предлагается формировать DS с использованием ВА-комплекса, который передает сигнал в программное обеспечение (ПО – Software). В то же время прикладное ПО должно обладать интуитивно понятным дружелюбным интерфейсом (Friendly User Interface) для пользователя (оператора), данные – иметь структурную упорядоченность, а программная реализация прикладных функций – осуществляться с использованием клиент-серверного построения [57–62].

Бизнес-целью использования предлагаемой DS является уменьшение количества брака при отработке программ и повышение экономической эффективности процесса механической обработки. Информация о механической обработке представляется различными входными данными, такими как название управляющей программы, идентификационный номер инструмента [63, 64], скорость подачи [65], частота вращения шпинделя и др. [66–68]. Хотя метод мониторинга, основанный на измерениях ВА-сигнала, не требует точной информации об абсолютном взаимодействии РИ и детали, но для формирования эффективных выходных данных необходимо задаться ограничениями.

Для выделения узкой полосы звуковой волны применялся FFT-фильтр [69–71]. Этот фильтр использует метод быстрого преобразования Фурье (БПФ), который позволяет эффективно анализировать частотный состав сигнала. Размер FFT-блока определяет частотное разрешение анализа. Чем больше блок, тем выше частот-

ное разрешение [72]. Например, для блока размером 65 536 точек и частоты дискретизации 44,1 кГц частотное разрешение составляет примерно 0,67 Гц. Это позволяет точно определить наличие определенных частот в сигнале. Однако при большом размере блока временное разрешение ухудшается. Для улучшения временного разрешения можно использовать меньший блок FFT – это позволит лучше отслеживать быстрые изменения частот, но при этом значительно ухудшится частотное разрешение. При размере FFT, равном 1024, шаг частотной сетки составит примерно 43 Гц. Это значит, что частоты 43, 86, 129 Гц и так далее будут определяться с высокой точностью, но промежуточные частоты, например 50 Гц, могут быть не видны.

Фильтрация используется для выделения полезных частотных компонентов сигнала и удаления шума [73]. В механической обработке резанием это может помочь изолировать интересные частоты вибраций и устранить ненужные шумы. Типы фильтров: низкочастотные фильтры (low-pass) пропускают низкочастотные компоненты и подавляют высокочастотные; высокочастотные фильтры (high-pass) пропускают высокочастотные компоненты и подавляют низкочастотные; полосовые фильтры (band-pass) пропускают частоты в определенном диапазоне и подавляют частоты вне этого диапазона.

Использование оконных функций в FFT-анализе необходимо для минимизации побочных эффектов, связанных с оконными разрывами временного сигнала. Когда сигнал обрывается для анализа, на концах блока могут возникнуть резкие изменения, что приводит к появлению искажений в спектре (утечка спектра).

Оконная функция Ханна имеет низкий уровень боковых лепестков в сравнении с прямоугольной функцией, а также низкий уровень спектральных утечек. Из недостатков можно выделить низкую частотную разрешающую способность.

Оконная функция Хэмминга имеет низкий уровень боковых лепестков в сравнении с функцией Ханна и низкий уровень спектральных утечек. Из недостатков можно выделить низкую частотную разрешающую способность в сравнении с оконной функцией Ханна.

Оконная функция Блэкмана имеет очень низкий уровень боковых лепестков, что позволяет

максимально уменьшить уровень спектральных утечек, однако ее частотная разрешающая способность существенно снижена.

Таким образом, **цель настоящей работы** – разработка алгоритма работы системы онлайн-мониторинга по контролю состояния режущего инструмента на основе создания цифровой тени с применением виброакустического комплекса.

Для достижения поставленной цели планируется решить следующие задачи.

1. Определить диапазоны частот АЧХ акустического сигнала, полученной при механической обработке, которые используются для анализа уровня износа режущего инструмента.

2. Определить оптимальную оконную функцию при фильтрации акустического сигнала механической обработки для выделения полезного сигнала.

3. Установить экспериментальные взаимосвязи между степенью износа инструмента, параметрами микрорельефа поверхности и АЧХ виброакустического сигнала.

Методика исследований

Онлайн-мониторинг контроля состояния инструмента (ОМ КСИ) при механической обработке играет ключевую роль в повышении эффективности производства [74]. Он позволяет оперативно реагировать на износ и другие изменения активной зоны контакта инструмента [35, 75] и обрабатываемой детали, тем самым обеспечивая оптимальное использование оборудования и предотвращение необходимости преждевременной или отложенной замены инструмента, что в свою очередь может привести к ненужным простоям, как плановым, так и внеплановым. В рассматриваемом случае оптимизация процесса фрезерования базировалась на минимизации целевой функции затрат:

$$F(\bar{x}) = \sum_{i=1}^n C(\bar{x})_i \rightarrow \min, \text{ где } \sum C \text{ состоит из}$$

C_1 – затрат на эксплуатацию оборудования; C_2 – затрат на смену инструмента; C_3 – стоимости нормо-часа; C_4 – стоимости инструмента. Тогда система ограничения по производительности будет иметь вид $Q = \{V, n, fz, a_p, t\} \rightarrow \max$. Здесь V – скорость резания, м/мин; n – частота вращения, мин^{-1} ; fz – подача на зуб, мм/зуб; a_p – глубина резания, мм; t – припуск, мм.

В данной работе рассматривалась DS со стороны передачи информации от физического (PW – Physical World) к DT. Предлагаемая система ОМ, состоящая из ТО, SCADA и ВА-датчиков (Sensors – акселерометры пьезоэлектрические «BC 110»), за счет диагностической функции позволяет своевременно выявлять износ инструмента и принимать решение о замене РИ, коррекции или изменении управляющей программы (рис. 2).

Система ОМ анализирует различные параметры, такие как вибрация, акустические сигналы и качество обработки поверхности. Это позволяет не только определить момент, когда инструмент достиг критического уровня износа и требует замены [76], но и отслеживать менее очевидные изменения, которые могут сигнализировать о возможных проблемах.

Для анализа полученных ВА-сигналов использовались методы цифровой обработки сигналов, включая FFT (быстрое преобразование Фурье), оконные функции и фильтрацию. Данные, полученные в виде акустического сигнала, передаются в ПО, где в VST-плагине (VST plugin) проводится удаление шума (De-Noising) и фильтрация (Filtering) [35] посредством преобразования Фурье (БПФ/ОПФ). Один из ключевых элементов системы для передачи сигнала в режиме реального времени – виртуальный кабель (Virtual cable), который позволяет выводить информацию на графический интерфейс оператора (рис. 3).

В экспериментальных исследованиях механообработка проводилась в попутном направлении с применением смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) на заготовках, имеющих свойства 12X18H10T, цилиндрическими концевыми фрезами диаметром $D = 8$ мм, $z = 2$. В качестве материала инструмента использовался твердый сплав BC20HT с покрытием CVD, область применения по ISO K10–K20. Соотношение вылета инструмента принято $l / D = 4$. Подача на зуб составляла $fz = 0,2$ мм/зуб, $a_p = 10$ мм, $t = 0,4$ мм. Частота вращения шпинделя $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$. При фрезеровании режущие инструменты измерялись по длине и радиусу с помощью контактного датчика TT140 фирмы Heidenhain для контроля степени износа инструмента.

Виброакустическая диагностика выполнялась с применением анализатора спектра ZetLab 017-U2 на базе фрезерного обрабатывающего

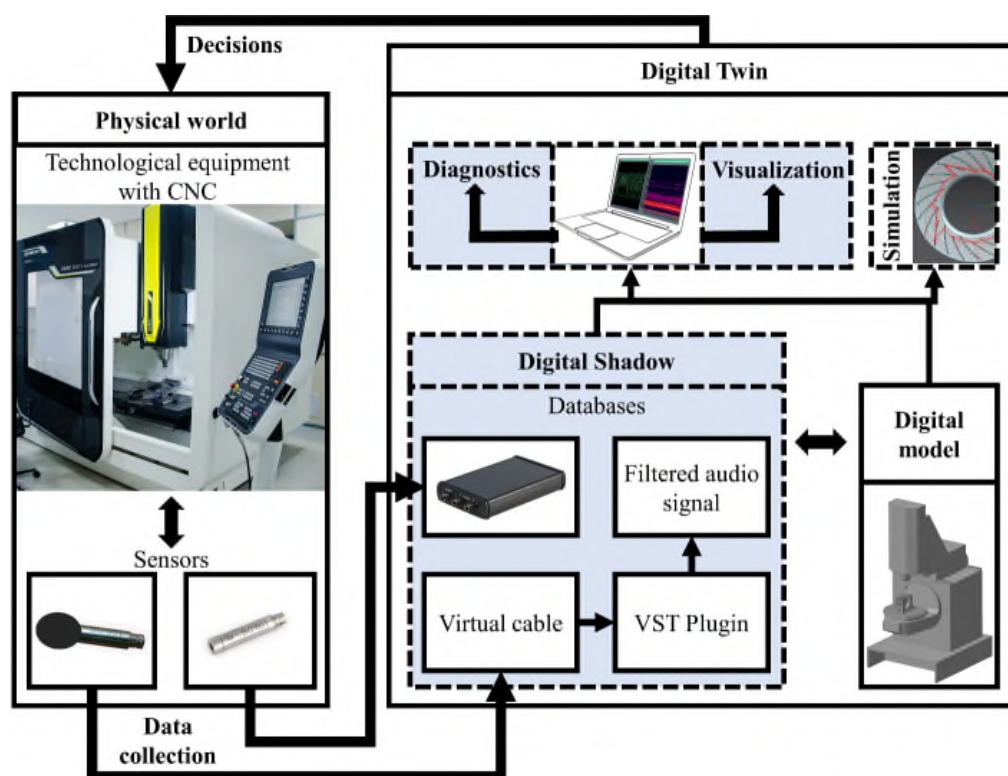


Рис. 2. Схема работы мониторинга и цифрового двойника

Fig. 2. The scheme of monitoring and the digital twin

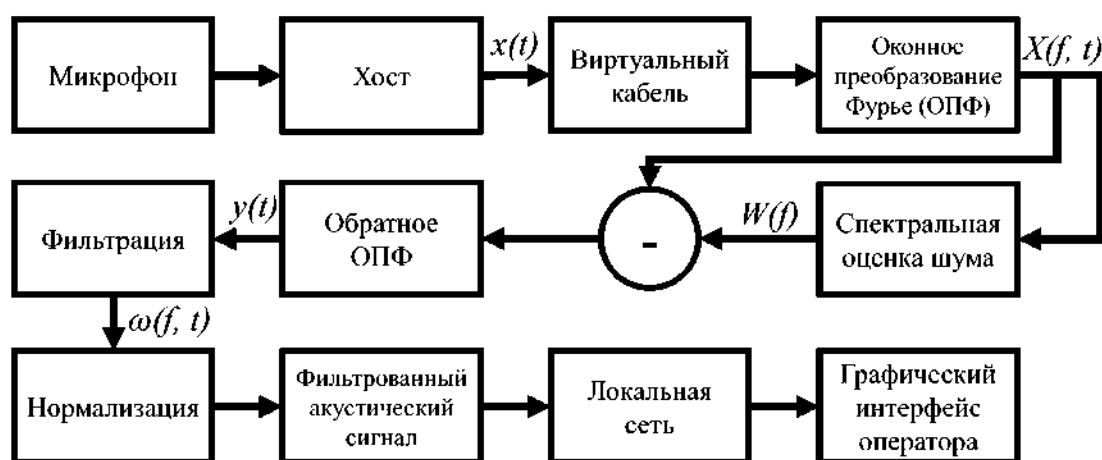


Рис. 3. Процесс программной обработки акустического сигнала

Fig. 3. The process of software processing of an acoustic signal

центра DMG DMU (Германия) 50 Ecoline. В качестве выходных показателей эффективности механообработки использовались амплитуда акустического сигнала A (дБ), изменяющаяся с течением времени t (с), виброускорение a (м/с^2), частота сигнала ω (Гц) и параметр микрорельефа – шероховатость R_z , мкм. Диапазон воспринимаемых частот микрофона – от 20 Гц до 20 кГц, разрешение – 16 бит, частота дискретизации – 44,1/48 кГц. Для оптимального соот-

ношения между временным и частотным разрешением размер БПФ был выбран равным 16 384, что обеспечивает достаточную детализацию и точность анализа. Измерения шероховатости после фрезерования поверхности проводились при помощи профилометра TIME TR 200, для этого прибора погрешность по эталону составляет 3 %. Процесс фильтрации первичного профиля проводился при использовании 50%-го гауссова фильтра.

Результаты и их обсуждение

При механической обработке резанием важную роль играют вибрации и шумы, возникающие в процессе работы. Для анализа этих сигналов использовался метод цифровой обработки сигналов, включая FFT (быстрое преобразование Фурье) [77], оконные функции и фильтрацию.

Из рис. 4 очевидно, что микрофон записывает несколько источников звука, включая звуки вокруг ТО, систему привода ТО, шпиндель, инструмент и процесс резания. Поэтому для более точного анализа рассмотрен акустический сигнал в пределах частотного диапазона, характерного для процесса резания. Это позволяет лучше выявить специфические характеристики и особенности, которые могут быть неочевидны в более широком частотном спектре.

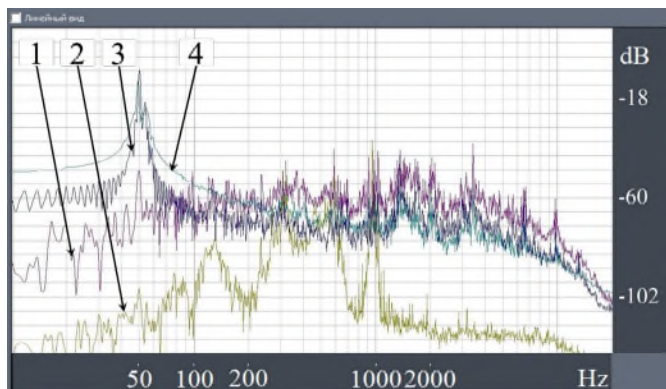


Рис. 4. АЧХ акустического сигнала:

1 – исходного; 2 – после удаления шума; 3 – фильтрованного; 4 – фильтрованного и нормализованного

Fig. 4. Frequency response of the acoustic signal:

1 – initial; 2 – after noise removal; 3 – filtered; 4 – filtered and normalized

Из рис. 4 также видно, что фоновый шум может быть идентифицирован в диапазоне $0...2$ кГц, эта часть сигнала может быть легко отфильтрована без потери основного сигнала. Анализ спектра позволяет выявить доминирующие частоты и амплитуды, которые могут указывать на наличие резонансов, дефектов и износа инструмента. После спектрального вычитания шума и фильтрации акустического сигнала АЧХ колебаний характеризуется тремя основными частотами (см. рис. 4) в диапазоне $20...200$ Гц: $\omega_0 = 25$ Гц – гармоника, кратная частоте прохождения режущих кромок; $\omega_1 = 50$ Гц, которая соответствует частоте резания, модулируемая оборотами двух-

зубой фрезы; резонансная частота $\omega_2 = 100$ Гц, ее стоит интерпретировать как биение инструмента.

Таким образом, результаты обработки акустического сигнала позволили установить выраженную низкочастотную область $20...200$ Гц, использование которой способствует более точному выявлению и анализу акустических характеристик, связанных с процессом резания. Это особенно важно для ВА-диагностики, где точность и детальность анализа могут существенно повлиять на выявление и диагностику потенциальных проблем.

В данном исследовании также рассмотрены разные окна для фильтрации аудиосигнала. Применение различных оконных функций при фильтрации позволяет оптимизировать процесс выделения полезного сигнала из общей массы данных. Результаты применения оконных функций, которые были использованы в этом исследовании, представлены на рис. 5. Прямоугольное окно из-за высокого уровня боковых лепестков, который может приводить к значительным спектральным утечкам, и окно Кайзера из-за сложности настройки параметров для достижения оптимального результата в данной работе не использовались.

Как видно из рис. 5, оконная функция Хэмминга эффективно уменьшает спектральные утечки, которые возникают при применении преобразования Фурье. Вместе с тем оконная функция Хэмминга обеспечивает хороший компромисс между шириной главного лепестка и уровнем боковых лепестков в спектральном представлении, она проста в реализации и не требует значительных вычислительных ресурсов. Это делает ее предпочтительной для многих приложений в области цифровой обработки сигналов, поскольку она обеспечивает высокое качество и точность анализа, необходимые для реализации системы онлайн-мониторинга.

Для определения влияния степени износа инструмента на параметры микрорельефа и АЧХ акустического сигнала проведены эксперименты, результаты которых представлены на рис. 6 и 7.

Как видно из рис. 6, шероховатость поверхности обрабатываемого материала напрямую зависит от степени износа инструмента, при этом установлена следующая корреляционная зависимость: $r = -0,9678$ (сильная, отрицательная).

Отклонения между диаметром инструмента при увеличении количества обрабатываемых

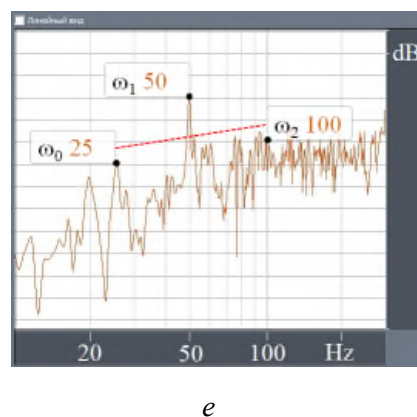
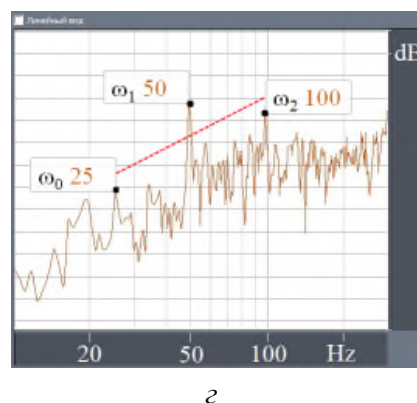
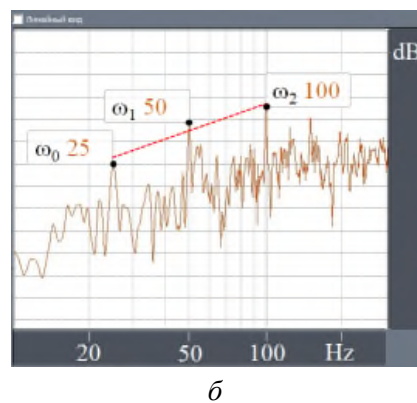
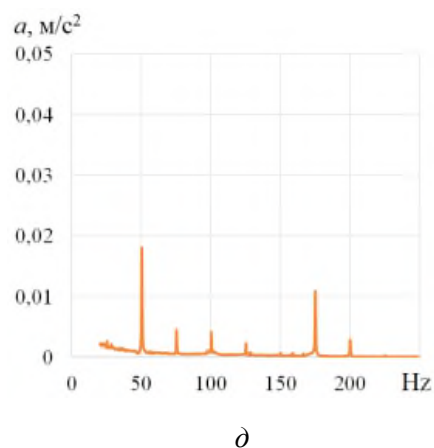
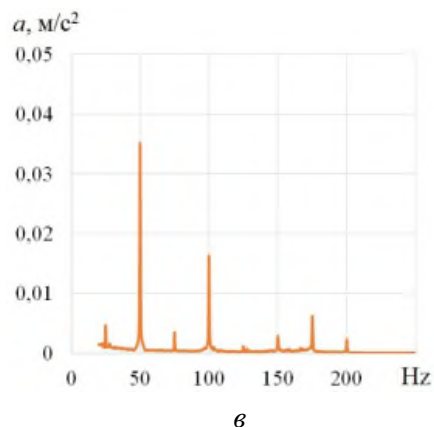
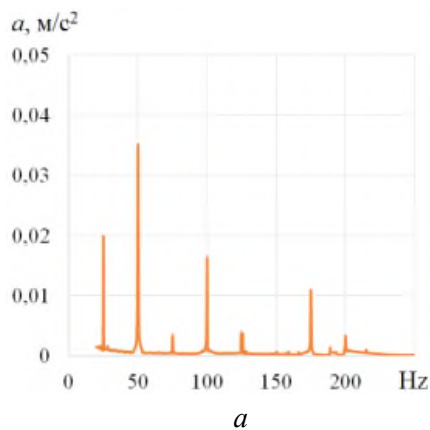


Рис. 5. Спектр сигналов прохождения режущих кромок фрезы через зону обработки после применения оконных функций, зафиксированный в виде:

$a, в, д$ – виброускорения; $б, з, е$ – акустического сигнала; $a, б$ – окно Хеннинга; $в, з$ – окно Хэмминга; $д, е$ – окно Блэкмана

Fig. 5. The spectrum of signals of the passage of the milling cutter cutting edges through the processing zone after the application of window functions, recorded in the form of:

$a, в, д$ – vibration acceleration; $б, з, е$ – acoustic signal; $a, б$ – Hanning window; $в, з$ – Hamming window; $д, е$ – Blackman window

поверхностей различны. Вначале происходит небольшой размерный износ 2...4 мкм, который увеличивает Rz на 20 %. Дальше в пределах 6 мкм шероховатость увеличивается на 50 % от минимальных полученных значений. Вместе

с этим увеличивается отгиб инструмента (рис. 7), о чем свидетельствует увеличение резонансной частоты $\omega_2 = 100$ Гц. Важно регулярно контролировать состояние инструмента и проводить его своевременную замену.

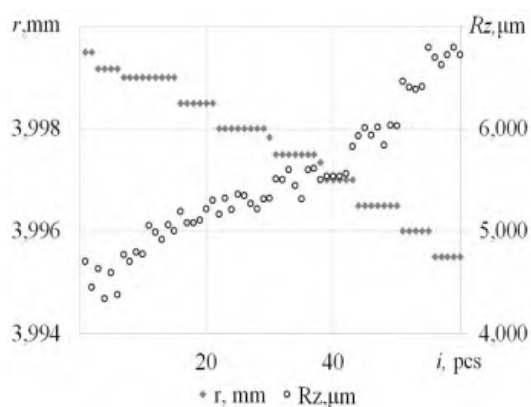
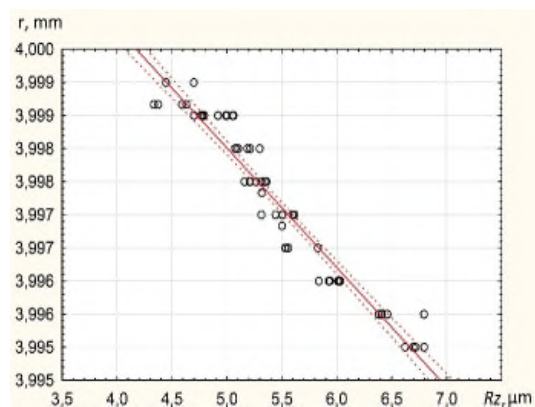

a

б

Рис. 6. Зависимость параметра шероховатости Rz от износа инструмента:

a – распределение; *б* – корреляция

Fig. 6. Dependence of the roughness parameter Rz on tool wear:

a – distribution; *б* – correlation

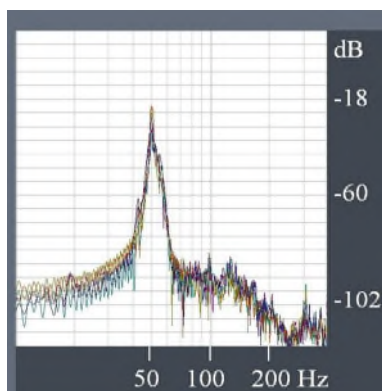
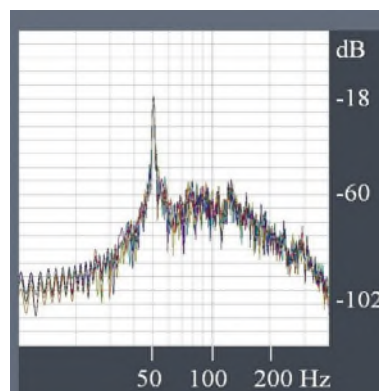
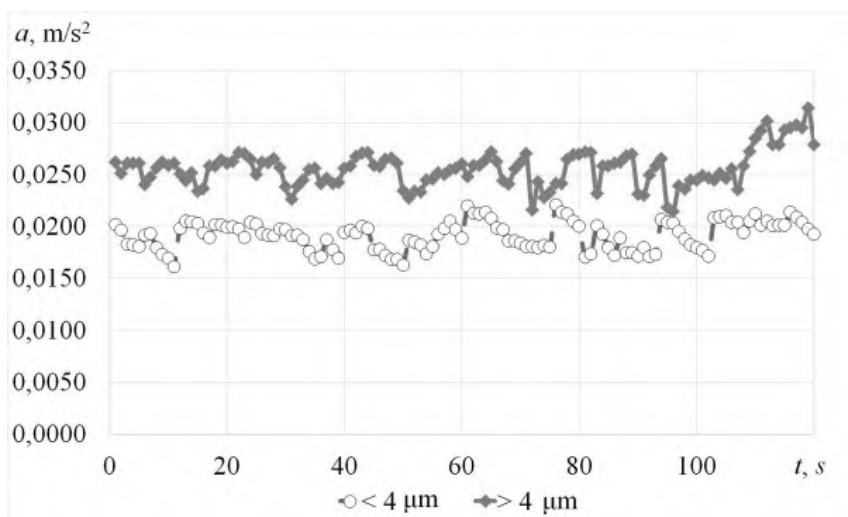

a

б

в

Рис. 7. Результаты ВА-диагностики:

a – АЧХ при износе менее 4 мкм; *б* – АЧХ при износе более 4 мкм;

в – виброускорения

Fig. 7. The results of VA diagnostics:

a – frequency response with wear less than 4 μm; *б* – frequency response with wear more than 4 μm; *в* – vibration acceleration

Как видно из рис. 7, спектрограммы звука изношенного инструмента содержат большие значения, чем звук нового инструмента, при идентичных параметрах процесса резания. Этот факт также подтверждается графиком зависимости виброускорения при различных степенях износа инструмента. Стоит обратить внимание на различие плотности в области частоты 50 Гц, но, как указывалось ранее, по-прежнему необходима дальнейшая работа для понимания расхождений в каждом конкретном случае.

Таким образом, на основании проведенных исследований можно заключить, что с применением ВА-комплекса на основе формирования DS возможен контроль состояния режущего инструмента в режиме реального времени – онлайн-мониторинг. Однако особое внимание получаемым данным АЧХ акустического сигнала надо уделять с позиции их обработки и фильтрации. Значительный массив получаемых данных необходимо оптимально обработать с целью анализа и соотнесения их с состоянием режущего инструмента. Для этого в ходе исследования были определены диапазоны частот акустического сигнала, в рамках которого можно делать выводы о текущем состоянии инструмента. Следующим этапом был выбор конкретной оконной функции. Он зависел от требований к фильтрации сигнала, таких как допустимый уровень спектральных утечек и необходимая частотная разрешающая способность. В исследовании проанализированы результаты применения этих оконных функций к аудиосигналам для определения оптимальной функции с точки зрения вычислительных ресурсов и точности акустического сигнала. В результате оконная функция Хэмминга была определена как наиболее подходящая для анализа процесса механической обработки.

Установлены зависимости АЧХ акустического сигнала и шероховатости поверхности от степени износа инструмента, на основании которых можно сделать выводы о состоянии режущего инструмента на этапах, близким к критическим, с позиции качества получаемых поверхностей. Несмотря на то что исследование было направлено на определение связей между уровнем износа инструмента, его виброакустическим сигналом и качеством обработки поверхности, полученные результаты могут быть использова-

ны для разработки новых методик контроля износа инструментов, повышения эффективности процесса обработки материалов и улучшения качества готовой продукции.

Проведенное исследование также позволило сформировать последовательность действий для ВА-анализа, способствующую более точному выявлению и анализу акустических характеристик, связанных с процессом резания:

- 1) установка датчиков (акселерометров, микрофонов) рядом с рабочей зоной ТО для фиксации ВА-сигналов;
- 2) сбор временных данных ВА-сигналов;
- 3) преобразование аналогового сигнала в цифровой с помощью АЦП (аналогово-цифрового преобразователя);
- 4) применение оконной функции к собранным данным для минимизации спектральной утечки перед выполнением FFT;
- 5) выполнение FFT для преобразования временного сигнала в частотную область;
- 6) анализ спектра для выявления доминирующих частотных компонентов, связанных с состоянием инструмента;
- 7) применение фильтров для выделения интересующих частотных компонентов (применение низкочастотного фильтра для удаления высокочастотных шумов; полосового фильтра – для выделения частот, связанных с нормальной работой инструмента и аномалиями; высокочастотного фильтра – для удаления низкочастотных шумов и вибраций);
- 8) дополнительный анализ отфильтрованного сигнала (сравнение отфильтрованных сигналов с эталонными для оценки состояния инструмента; выявление изменений в звуковом и вибрационном спектрах, указывающих на износ или повреждение инструмента).

Выводы

Исходя из современного состояния исследований, описанных в данной статье, а также оценки результатов проведенных экспериментов, можно сделать следующие выводы.

1. Разработан алгоритм работы системы ОМ по контролю состояния РИ при фрезеровании с фильтрацией помех и шума в реальном времени на основе формирования DS, полученных в ходе виброакустического анализа. Данный вывод

стимулирует постановку новых задач для исследований в указанной области.

2. Анализ АЧХ в диапазоне 20...200 Гц позволил установить различие в спектральной плотности акустического сигнала с течением времени, увеличение которой позволяет фиксировать степень износа инструмента.

3. Оконная функция Хэмминга определена как оптимальная с точки зрения вычислительных ресурсов и точности акустического сигнала с позиции её использования при анализе процесса механической обработки.

4. Наличие корреляции акустического сигнала подтверждается измерениями износа радиуса фрезы, шероховатости и результатами вибродиагностики. При этом система ОМ позволяет определить более ранние признаки изменения состояния режущей кромки инструмента, чем измерения, прописанные циклом в управляющей программе ЧПУ, или измерения параметров шероховатости.

Список литературы

- ГОСТ Р 56136–2014. Управление жизненным циклом продукции. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2016. – 24 с.
- Grieves M. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication: whitepaper. – Melbourne, FL: LLC, 2014. – P. 1–7.
- ГОСТ Р 57700.37–2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. – М.: Рос. ин-т стандартизации, 2021. – 15 с.
- Ингеманссон А.Р. Современная научная проблема повышения эффективности механообрабатывающего производства путем внедрения киберфизических систем в рамках концепции «Индустрия 4.0» // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2016. – № 12. – С. 40–44. – DOI: 10.12737/23487.
- Кабалдин Ю.Г., Шатагин Д.А., Кузьмишина А.М. Разработка цифрового двойника режущего инструмента для механообрабатывающего производства // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2019. – № 4 (709). – С. 11–17. – DOI: 10.18698/0536-1044-2019-4-11-17.
- Uhlemann T.H.J., Lehmann C., Steinhilper R. The digital twin: realizing the cyber-physical production system for Industry 4.0 // Procedia CIRP. – 2017. – Vol. 61. – P. 335–340. – DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.152.
- Digital Twin-driven smart manufacturing: connotation, reference model, applications and research issues / Y. Lu, C. Liu, K.I.-K. Wang, H. Huang, X. Xu // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2020. – Vol. 61. – P. 101837. – DOI: 10.1016/j.rcim.2019.101837.
- Shaping the digital twin for design and production engineering / B. Schleich, N. Anwer, L. Mathieu, S. Wartzack // CIRP Annals. – 2017. – Vol. 66. – P. 141–144. – DOI: 10.1016/j.cirp.2017.04.040.
- A Digital Twin based service oriented application for a 4.0 knowledge navigation in the smart factory / A. Padovano, F. Longo, L. Nicoletti, G. Mirabelli // IFAC-PapersOnLine. – 2018. – Vol. 51 (11). – P. 631–636. – DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.389.
- Digital twin towards smart manufacturing and industry 4.0 / F. Tao, N. Anwer, A. Liu, L. Wang, A.Y.C. Nee, L. Li, M. Zhang // Journal of Manufacturing Systems. – 2021. – Vol. 58 (B). – P. 1–2. – DOI: 10.1016/j.jmsy.2020.12.005.
- Gimadeev M.R., Davydov V.M., Li A.A. Influence of shaping trajectory on the surface roughness in milling: vibroacoustic monitoring // Russian Engineering Research. – 2023. – Vol. 43 (7). – P. 796–801. – DOI: 10.3103/S1068798X23070109.
- Шевченко Д.В. Методология построения цифровых двойников на железнодорожном транспорте // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2021. – Т. 80, № 2. – С. 91–99. – DOI: 10.21780/2223-9731-2021-80-2-91-99.
- Altintas Y. Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design. – UK: Cambridge University Press, 2012. – 366 p. – DOI: 10.1017/CBO9780511843723.
- ГОСТ Р ИСО 9000-2015. Система менеджмента качества. Основные положения и словарь. – М.: Стандартинформ, 2015. – 42 с.
- ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования. – М.: Стандартинформ, 2015. – 57 с.
- Monitoring system for high-tech equipment / V.B. Kuznetsova, D.V. Kondusov, A.I. Serdyuk, A.I. Sergeev // Russian Engineering Research. – 2017. – Vol. 37 (10). – P. 892–896. – DOI: 10.3103/S1068798X17100136.
- Product development integration using PLM tools: an industrial lathe case study / A. Guarín, J. Gomez, M. Hincapié, D. Guerra, A. Molina // IFAC Proceedings Volumes. – 2007. – Vol. 40 (19). – P. 135–140. – DOI: 10.3182/20071002-MX-4-3906.00023.
- Ингеманссон А.Р., Чигиринский Ю.Л. Разработка состава цифровых производственных систем для механической обработки // Известия ВолгГТУ. – 2019. – № 8 (231). – С. 21–23.
- ГОСТ Р 50995.3.1–96. Технологическое обеспечение создания продукции. Технологическая подготовка производства. – М.: Госстандарт России, 1997. – 20 с.



20. ГОСТ 27.002–2015. Надежность в технике. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2016. – 28 с.
21. ГОСТ 27.003–2016. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности. – М.: Стандартинформ, 2017. – 19 с.
22. Data-driven smart manufacturing / F. Tao, Q. Qi, A. Liu, A. Kusiak // *Journal of Manufacturing Systems*. – 2018. – Vol. 48 (C). – P. 157–169. – DOI: 10.1016/j.jmsy.2018.01.006.
23. A knowledge-based digital shadow for machining industry in a digital twin perspective / A. Ladj, Z. Wang, O. Meski, F. Belkadi, M. Ritou, C. Da Cunha // *Journal of Manufacturing Systems*. – 2021. – Vol. 58 (B). – P. 168–179. – DOI: 10.1016/j.jmsy.2020.07.018.
24. The digital shadow as enabler for data analytics in product life cycle management / M. Riesener, G. Schuh, C. Dolle, C. Tonnes // *Procedia CIRP*. – 2019. – Vol. 80. – P. 729–734. – DOI: 10.1016/j.procir.2019.01.083.
25. Schuh G., Jussen P., Harland T. The digital shadow of services: a reference model for comprehensive data collection in MRO services of machine manufacturers // *Procedia CIRP*. – 2018. – Vol. 73. – P. 271–277. – DOI: 10.1016/j.procir.2018.03.318.
26. Федонин О.Н., Петрешин Д.И., Карпушкин В.А. Разработка алгоритма функционирования автоматизированной системы сбора и анализа данных с металлорежущих станков с ЧПУ // *Вестник Брянского государственного технического университета*. – 2014. – № 1 (41). – С. 58–62.
27. MES-integrated digital twin frameworks / E. Negri, S. Berardi, L. Fumagalli, M. Macchi // *Journal of Manufacturing Systems*. – 2020. – Vol. 56. – P. 58–71. – DOI: 10.1016/j.jmsy.2020.05.007.
28. Characterising the Digital Twin: a systematic literature review / D. Jones, C. Snider, A. Nassehi, J. Yon, B. Hicks // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. – 2020. – Vol. 29 (A). – P. 36–52. – DOI: 10.1016/j.cirpj.2020.02.002.
29. Ritto T.G., Rochinha F.A. Digital twin, physics-based model, and machine learning applied to damage detection in structures // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2021. – Vol. 155. – P. 107614. – DOI: 10.1016/j.ymssp.2021.107614.
30. A systematic development method for cyber-physical machine tools / C. Liu, H. Vengayil, R.Y. Zhong, X. Xu // *Journal of Manufacturing Systems*. – 2018. – Vol. 48 (C). – P. 13–24. – DOI: 10.1016/j.jmsy.2018.02.001.
31. Sensor data and information fusion to construct Digital-twins virtual machine tools for cyber-physical manufacturing / Y. Cai, B. Starly, P. Cohen, Y.-S. Lee // *Procedia Manufacturing*. – 2017. – Vol. 10. – P. 1031–1042. – DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.094.
32. Digital Twin for rotating machinery fault diagnosis in smart manufacturing / J. Wang, L. Ye, R.X. Gao, C. Li, L. Zhang // *International Journal of Production Research*. – 2019. – Vol. 57 (12). – P. 3920–3934. DOI: 10.1080/00207543.2018.1552032.
33. Application of measurement systems in tool condition monitoring of milling: a review of measurement science approach / D.Yu. Pimenov, M. Kumar Gupta, L.R.R. da Silva, M. Kiran, N. Khanna, G.M. Krolczyk // *Measurement*. – 2022. – Vol. 199. – P. 111503. – DOI: 10.1016/j.measurement.2022.111503.
34. Мониторинг состояния технологического оборудования на промышленных предприятиях / М.П. Козочкин, Ф.С. Сабиров, А.Н. Боган, К.В. Мыслицев // *Вестник УГАТУ*. – 2013. – Т. 17, № 8 (61). – С. 56–62.
35. Гимадеев М.Р., Лу А.А. Анализ систем автоматизированного обеспечения параметров шероховатости поверхности на основе динамического мониторинга // *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. – 2022. – Т. 22, № 2. – С. 116–129. – DOI: 10.23947/2687-1653-2022-22-2-116-129.
36. Digital twin for machining tool condition prediction / Q. Qiao, J. Wang, L. Ye, R.X. Gao // *Procedia CIRP*. – 2019. – Vol. 81. – P. 1388–1393. – DOI: 10.1016/j.procir.2019.04.049.
37. Qi Q., Tao F. Digital twin and big data towards smart manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree comparison // *IEEE Access*. – 2018. – Vol. 6. – P. 3585–3593. – DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2793265.
38. Convolutional neural network-based tool condition monitoring in vertical milling operations using acoustic signals / C. Cooper, P. Wang, J. Zhang, R.X. Gao, T. Roney, I. Ragai, D. Shaffer // *Procedia Manufacturing*. – 2020. – Vol. 49. – P. 105–111. – DOI: 10.1016/j.promfg.2020.07.004.
39. Аверченков В.И., Филиппова Л.Б., Пугач Л.И. Программный комплекс определения величины коррекции на инструмент для обрабатывающих центров с датчиками активного контроля // *Известия ТулГУ. Технические науки*. – 2013. – Вып. 7, ч. 1. – С. 70–78.
40. Tool condition monitoring in milling using a force singularity analysis approach / C. Zhou, K. Guo, J. Sun, B. Yang, J. Liu, G. Song, C. Sun, Z. Jiang // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2020. – Vol. 107. – P. 1785–1792. – DOI: 10.1007/s00170-019-04664-4.
41. Cuka B., Kim D.W. Fuzzy logic based tool condition monitoring for end-milling // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. – 2017. – Vol. 47. – P. 22–36. – DOI: 10.1016/j.rcim.2016.12.009.
42. TCM system in contour milling of very thick-very large steel plates based on vibration and AE signals / J. Barreiro, A.I. Fernandez-Abia, A. Gonzalez-Laguna,

O. Pereira // Journal of Materials Processing Technology. – 2017. – Vol. 246. – P. 144–157. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.03.016.

43. Лукьянов А.В., Алейников Д.П. Исследование колебаний сил взаимодействия фрезы с заготовкой при повышении скорости вращения шпинделя // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2017. – Т. 56, № 4. – С. 70–82. – DOI: 10.26731/1813-9108.2017.4(56).70-82.

44. Волосова М.А. Автоматизированная система мониторинга и диагностики обработки ответственных деталей в машиностроении керамическим режущим инструментом // Инновации. – 2016. – № 8 (214). – С. 84–87.

45. Cutting tool wear classification and detection using multi-sensor signals and Mahalanobis-Taguchi System / M. Rizal, J.A. Ghani, M.Z. Nuawi, C.H.C. Haron // Wear. – 2017. – Vol. 376–377 (B). – P. 1759–1765. – DOI: 10.1016/j.wear.2017.02.017.

46. Tool wear monitoring in milling of titanium alloy Ti-6Al-4 V under MQL conditions based on a new tool wear categorization method / M. Hu, W. Ming, Q. An, M. Chen // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2019. – Vol. 104. – P. 4117–4128. – DOI: 10.1007/s00170-019-04125-y.

47. Real-time tool wear monitoring in milling using a cutting condition independent method / M. Nouri, B.K. Fussell, B.L. Ziniti, E. Linder // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2015. – Vol. 89. – P. 1–13. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2014.10.011.

48. Investigation of the feasibility of using microphone arrays in monitoring machining / D. Shaffer, I. Ragai, A. Danesh-Yazdi, D. Loker // Manufacturing Letters. – 2018. – Vol. 15 (B). – P. 132–134. – DOI: 10.1016/j.mfglet.2017.12.008.

49. Tool condition monitoring for high-performance machining systems – a review / A. Mohamed, M. Hassan, R. Msaoubi, H. Attia // Sensors. – 2022. – Vol. 22. – P. 2206. – DOI: 10.3390/s22062206.

50. An investigation of tool wear using acoustic emission and genetic algorithm / G. Vetrichevan, S. Sundaram, S. Kumaran, P. Velmurugan // Journal of Vibration Control. – 2014. – Vol. 21 (15). – P. 3061–3066. – DOI: 10.1177/1077546314520835.

51. Sahinoglu A., Rafighi M. Investigation of vibration, sound intensity, machine current and surface roughness values of AISI 4140 during machining on the lathe / Arabian Journal for Science and Engineering. – 2020. – Vol. 45. – P. 765–778. – DOI: 10.1007/s13369-019-04124-x.

52. An on-line approach for energy efficiency monitoring of machine tools / S. Hu, F. Liu, Y. He, T. Hu // Journal of Cleaner Production. – 2012. – Vol. 27. – P. 133–140. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.01.013.

53. Комплексный подход к экспериментальным исследованиям технологических систем металлообработки по обеспечению параметров качества и эксплуатационных свойств поверхностей деталей машин / А.Г. Суслов, В. Федоров, М. Нагоркин, И. Пыриков // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2018. – № 10. – С. 3–13. DOI: 10.30987/article_5bb4b1f9abbc54.46761484.

54. Determination of tool wear in peripheral milling operations based on acoustic emission signals / R. Alzugaray-Franz, E. Diez-Cifuentes, E. Leal-Munoz, M. Villaverde San Jose, A. Vizán // IACME 2022: Proceedings of the XV Ibero-American Congress of Mechanical Engineering. – 2023. – P. 300–305. – DOI: 10.1007/978-3-031-38563-6_44.

55. Off-line geometrical and microscopic & on-line vibration based cutting tool wear analysis for micro-milling of ceramics / L. Moricz, Z.J. Viharos, A. Nemeth, A. Szepligeti, M. Buki // Measurement. – 2020. – Vol. 163. – P. 108025. – DOI: 10.1016/j.measurement.2020.108025.

56. The surface roughness analysis using sound signal in turning of mild steel / A.U. Patwari, A.A. Zamee, M.H. Bhuiyan, S.M. Sakib // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 703. – P. 012011. – DOI: 10.1088/1757-899X/703/1/012011.

57. ГОСТ Р 51904–2002. Программное обеспечение встроженных систем. Общие требования к разработке и документированию. – М.: Стандартинформ, 2012. – 36 с.

58. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15910–2002. Информационная технология. Процесс создания программного средства пользователя. – М.: Стандартинформ, 2012. – 98 с.

59. ГОСТ 34.201–89. Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Виды, комплектность и обозначение документов при создании автоматизированных систем. – М.: Госкомстандарт, 2002. – 36 с.

60. ГОСТ 34.601–90. Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы стадии создания. – М.: Госкомстандарт, 2002. – 84 с.

61. ГОСТ Р ИСО/МЭК 12207–2010. Информационная технология. Системная и программная инженерия. Процессы жизненного цикла программных средств. – М.: Стандартинформ, 2011. – 105 с.

62. ГОСТ Р 15.301–2016. Система разработки и постановки продукции на производство. Продукция производственно-технического назначения. Порядок разработки и постановки продукции на производство. – М.: Стандартинформ, 2018. – 15 с.

63. ГОСТ ISO/IEC 15420–2010. Автоматическая идентификация. Кодирование штриховое. Специфи-



кация символики штрихового кода EAN/UPC. – М.: Стандартинформ, 2011. – 45 с.

64. *Ингеманссон А.Р.* Технологическая подготовка и адаптивное управление в цифровых производственных системах // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2021. – № 4. – С. 5–13. – DOI: 10.26730/1999-4125-2021-4-5-13.

65. Система автоматизированного технологического управления износостойкостью деталей машин при обработке резанием / А.Г. Суслов, Д.М. Медведев, Д.И. Петрешин, О.Н. Федонин // Научные технологии в машиностроении. – 2018. – № 5 (83). – С. 40–44. – DOI: 10.30987/article_5ad8d291cddcd8.06334386.

66. *Тугенгольд А.К., Изюмов А.И.* Принципы концептуального подхода к созданию подсистемы Инструмент в смарт-паспорте многооперационного станка // Вестник ДГТУ. – 2014. – Т. 14, № 2 (77). – С. 74–83. – DOI: 10.23947/1992-5980-2014-2-74-83.

67. *Xiurong Z., Yeu W.* Process analysis and parameter optimization of five axis NC machine for machining complex curved surface impellers // 2019 International Conference on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City (ICITBS). – Changsha, China, 2019. – P. 122–124. – DOI: 10.1109/ICITBS.2019.00036.

68. *Заковоротный В.Л., Гвинджилia В.Е.* Синергетический подход к повышению эффективности управления процессами обработки на металлорежущих станках // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 3. – С. 84–99. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.3-84-99.

69. *Kouguchi J., Yoshioka H.* Monitoring method of cutting forces and vibrations by using frequency separation of acceleration sensor signals during milling process with small ball end mills // Precision Engineering. – 2024. – Vol. 85. – P. 337–356. – DOI: 10.1016/j.precisioneng.2023.10.013.

70. In-process complex machining condition monitoring based on deep forest and process information

fusion / Z. Lu, M. Wang, W. Dai, J. Sun // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2019. – Vol. 104. – P. 1953–1966. – DOI: 10.1007/s00170-019-03919-4.

71. Position-dependent milling process monitoring and surface roughness prediction for complex thin-walled blade component / Z. Yao, J. Shen, M. Wu, D. Zhang, M. Luo // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2023. – Vol. 198. – P. 110439. – DOI: 10.1016/j.ymssp.2023.110439.

72. *Accattatis A., Saggio G., Giannini F.* A real time FFT-based impedance meter with bias compensation // Measurement. – 2011. – Vol. 44 (4). – P. 702–707. – DOI: 10.1016/j.measurement.2011.01.00.

73. A survey on adaptive active noise control algorithms overcoming the output saturation effect / Y. Guo, D. Shi, X. Shen, J. Ji, W.-S. Gan // Signal Processing. – 2024. – Vol. 222. – P. 109525. – DOI: 10.1016/j.sigpro.2024.109525.

74. Tool wear prediction through AI-assisted digital shadow using industrial edge device / M. Chehreghad, G. Kecibas, C. Besirova, U. Uresin, M. Irican, I. Lazoglu // Journal of Manufacturing Processes. – 2024. – Vol. 113. – P. 117–130. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2024.01.052.

75. *Пономарев Б.Б., Нгуен Ш.Х.* Влияние ориентации инструмента на силы резания при концевом фрезеровании // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2019. – № 3 (708). – С. 11–20. – DOI: 10.18698/0536-1044-2019-3-11-20.

76. *Gimadeev M.R., Li A.A.* Tool condition monitoring techniques for milling // Proceedings of the 9th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2023. – Cham: Springer, 2023. – P. 698–707. – DOI: 10.1007/978-3-031-38126-3_69.

77. *Gowid S., Dixon R., Ghani S.* A novel robust automated FFT-based segmentation and features selection algorithm for acoustic emission condition based monitoring systems // Applied Acoustics. – 2015. – Vol. 88. – P. 66–74. – DOI: 10.1016/j.apacoust.2014.08.007.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Гимадеев М.Р. – формулирование основной концепции исследования, проведение экспериментов, подготовка текста статьи и формирование выводов, оформление результатов исследования в графиках, поиск аналитических материалов в отечественных и зарубежных источниках, подготовка обзора литературы;

Стельмаков В.А. – планирование эксперимента, проведение экспериментов, проведение анализа и подготовка первоначальных выводов;

Шеленок Е.А. – проведение критического анализа материалов и формирование выводов, участие в обсуждении материалов статьи, анализ и дополнение текста статьи.

© 2024 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Product life cycle: machining processes monitoring and vibroacoustic signals filtering

Mikhail Gimadeev ^{a, *}, Vadim Stelmakov ^b, Evgenii Shelenok ^c

Pacific National University, 136 Tihookeanskaya st., Khabarovsk, 680035, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0001-6685-519X>, 009063@pnu.edu.ru; ^b <https://orcid.org/0000-0003-2763-1956>, 009062@pnu.edu.ru;

^c <https://orcid.org/0000-0003-4495-9558>, 007141@pnu.edu.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 29 May 2024

Revised: 23 June 2024

Accepted: 12 July 2024

Available online: 15 September 2024

Keywords:

Life cycle

Equipment measurement sensors

Acoustic diagnostics

Vibration

Tool status monitoring

Online monitoring

Machining process

Funding

This work has funded by the Ministry of science and higher education of Russian Federation (project № FEME–2024–0010).

ABSTRACT

Introduction. In modern manufacturing, the product life cycle comprises various stages, from conception to disposal. Among these stages, machining plays a significant role, as it directly influences the durability and functionality of the finished product. With increasing competition and the need to reduce production costs, optimizing machining processes has become a crucial task. Traditionally, conservative technological approaches have been used to ensure processing quality. However, this often leads to decreased productivity and higher costs. Modern monitoring and diagnostic techniques can significantly improve process control, particularly through tool condition monitoring. **The subject.** This paper discusses the stages of the product life cycle and emphasizes the importance of monitoring machining processes. It explores the potential of using vibroacoustic signals to continuously monitor equipment and product conditions. Special attention is paid to the use of vibroacoustic signals for diagnostics and quality control. Modern approaches to filtering these signals, including the use of the fast *Fourier* transform and various window functions, are analyzed in order to improve the accuracy of the analysis and identify potential defects. **The purpose of this work** is to develop an algorithm for an online monitoring system that will monitor the condition of cutting tools based on the creation of a digital shadow using a vibroacoustic complex. The main tasks to be solved are to establish the ranges of applicability of frequency response of acoustic signals and optimal window functions, as well as to establish the relationship between the degree of wear on the cutting tool and the results of vibration diagnostics and surface roughness. **The methods and technologies** for filtering vibroacoustic signals and their application in real-world production settings are discussed. Special attention is given to the role of digital twins in integrating monitoring and filtering data, allowing for the creation of a virtual model of a product to predict its behavior and optimize processes throughout the life cycle. A comparison of various monitoring methods and technologies is conducted, as well as an analysis of practical examples of digital twin implementation in production processes and its impact on improved control. **Results and discussion** are presented, identifying current research and practical advancements, while also proposing existing challenges and promising areas for future research in the fields of monitoring, signal filtering, and the use of digital twins in mechanical manufacturing.

For citation: Gimadeev M.R., Stelmakov V.A., Shelenok E.A. Product life cycle: machining processes monitoring and vibroacoustic signals filterings. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 3, pp. 94–113. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.3-94-113. (In Russian).

References

1. GOST R 56136–2014. *Upravlenie zhiznennym tsiklom produktsii. Terminy i opredeleniya* [State Standard R 56136–2014. Life cycle management for military products. Terms and definitions]. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 24 p.
2. Grieves M. *Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication: whitepaper*. Melbourne, FL, LLC, 2014, pp. 1–7.
3. GOST R 57700.37–2021. *Komp'yuternye modeli i modelirovanie. Tsifrovye dvoiniki izdelii. Obshchie polozheniya* [State Standard R 57700.37–2021. Computer models and simulation. Digital twins of products. General provisions]. Moscow, Russian Institute of Standardization Publ., 2021. 15 p.

* Corresponding author

Stelmakov Vadim A., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
Pacific National University,
136 Tihookeanskaya st.,
680035, Khabarovsk, Russian Federation
Tel.: +7 962 221-74-60, e-mail: 009062@pnu.edu.ru

4. Ingemansson A.R. Sovremennaya nauchnaya problema povysheniya effektivnosti mekhanooobrabatyvayushchego proizvodstva putem vnedreniya kiberfizicheskikh sistem v ramkakh kontseptsii «Industriya 4.0» [Current scientific problem of efficiency increase in mechanical operation by cyber-physical systems introduction within “Industry 4.0” concept]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii = Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2016, no. 12, pp. 40–44. DOI: 10.12737/23487.
5. Kabaldin Y.G., Shatagin D.A., Kuzmishina A.M. Razrabotka tsifrovogo dvoynika rezhushchego instrumenta dlya mekhanooobrabatyvayushchego proizvodstva [The development of a digital twin of a cutting tool for mechanical production]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2019, no. 4 (709), pp. 11–17. DOI: 10.18698/0536-1044-2019-4-11-17.
6. Uhlemann T.H.J., Lehmann C., Steinhilper R. The digital twin: realizing the cyber-physical production system for Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 2017, vol. 61, pp. 335–340. DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.152.
7. Lu Y., Liu C., Wang K.I.-K., Huang H., Xu X. Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2020, vol. 61, p. 101837. DOI: 10.1016/j.rcim.2019.101837.
8. Schleich B., Anwer N., Mathieu L., Wartzack S. Shaping the digital twin for design and production engineering. *CIRP Annals*, 2017, vol. 66, pp. 141–144. DOI: 10.1016/j.cirp.2017.04.040.
9. Padovano A., Longo F., Nicoletti L., Mirabelli G. A Digital Twin based service oriented application for a 4.0 knowledge navigation in the smart factory. *IFAC-PapersOnLine*, 2018, vol. 51 (11), pp. 631–636. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.389.
10. Tao F., Anwer N., Liu A., Wang L., Nee A.Y.C., Li L., Zhang M. Digital twin towards smart manufacturing and industry 4.0. *Journal of Manufacturing Systems*, 2021, vol. 58 (B), pp. 1–2. DOI: 10.1016/j.jmsy.2020.12.005.
11. Gimadeev M.R., Davydov V.M., Li A.A. Influence of shaping trajectory on the surface roughness in milling: vibroacoustic monitoring. *Russian Engineering Research*, 2023, vol. 43 (7), pp. 796–801. DOI: 10.3103/S1068798X23070109.
12. Shevchenko D.V. Metodologiya postroeniya tsifrovyykh dvoynikov na zheleznodorozhnom transporte [Methodology for constructing digital twins in railway transport]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta = Russian Railway Science Journal*, 2021, vol. 80, no. 2, pp. 91–99. DOI: 10.21780/2223-9731-2021-80-2-91-99.
13. Altintas Y. *Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design*. UK, Cambridge University Press, 2012. 366 p. DOI: 10.1017/CBO9780511843723.
14. GOST R ISO 9000-2015. *Sistema menedzhmenta kachestva. Osnovnye polozheniya i slovar'* [State Standard R ISO 9000-2015. Quality management systems. Fundamentals and vocabulary]. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 42 p.
15. GOST R ISO 9001-2015. *Sistemy menedzhmenta kachestva. Trebovaniya* [State Standard R ISO 9001-2015. Quality management systems. Requirements]. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 57 p.
16. Kuznetsova V.B., Kondusov D.V., Serdyuk A.I., Sergeev A.I. Monitoring system for high-tech equipment. *Russian Engineering Research*, 2017, vol. 37 (10), pp. 892–896. DOI: 10.3103/S1068798X17100136.
17. Guarín A., Gómez J., Hincapié M., Guerra D., Molina A. Product development integration using PLM tools: An industrial lathe case study. *IFAC Proceedings Volumes*, 2007, vol. 40 (19), pp. 135–140. DOI: 10.3182/20071002-MX-4-3906.00023.
18. Ingemansson A.R., Tchigirinsky Ju.L. Razrabotka sostava tsifrovyykh proizvodstvennykh sistem dlya mekhanicheskoi obrabotki [The designing of composition of digital production systems for metalworking]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Izvestia of Volgograd State Technical University*, 2019, no. 8 (231), pp. 21–23. (In Russian).
19. GOST R 50995.3.1–96. *Tekhnologicheskoe obespechenie sozdaniya produktsii. Tekhnologicheskaya podgotovka proizvodstva* [State Standard R 50995.3.1–96. Technological support for products development and production. Technological preparation of production]. Moscow, Gosstandart of Russia Publ., 1997. 20 p.
20. GOST 27.002–2015. *Nadezhnost' v tekhnike. Terminy i opredeleniya* [State Standard 27.002–2015. Dependability in technics. Terms and definitions]. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 28 p.
21. GOST 27.003–2016. *Nadezhnost' v tekhnike. Sostav i obshchie pravila zadaniya trebovaniy po nadezhnosti* [State Standard 27.003–2016. Industrial product dependability. Dependability requirements: contents and general rules for specifying]. Moscow, Standartinform Publ., 2017. 19 p.
22. Tao F., Qi Q., Liu A., Kusiak A. Data-driven smart manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 2018, vol. 48 (C), pp. 157–169. DOI: 10.1016/j.jmsy.2018.01.006.

23. Ladj A., Wang Z., Meski O., Belkadi F., Ritou M., Da Cunha C. A knowledge-based digital shadow for machining industry in a digital twin perspective. *Journal of Manufacturing Systems*, 2021, vol. 58 (B), pp. 168–179. DOI: 10.1016/j.jmsy.2020.07.018.
24. Riesener M., Schuh G., Dolle C., Tonnes C. The digital shadow as enabler for data analytics in product life cycle management. *Procedia CIRP*, 2019, vol. 80, pp. 729–734. DOI: 10.1016/j.procir.2019.01.083.
25. Schuh G., Jussen P., Harland T. The digital shadow of services: a reference model for comprehensive data collection in MRO services of machine manufacturers. *Procedia CIRP*, 2018, vol. 73, pp. 271–277. DOI: 10.1016/j.procir.2018.03.318.
26. Fedonin O.N., Petreshin D.I., Karpushkin V.A. Razrabotka algoritma funktsionirovaniya avtomatizirovannoi sistemy sbora i analiza dannykh s metallovezhushchikh stankov s ChPU [Development of algorithms of the automated data collection and analysis system with a machine tool CNC]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Bryansk State Technical University*, 2014, no. 1 (41), pp. 58–62.
27. Negri E., Berardi S., Fumagalli L., Macchi M. MES-integrated digital twin frameworks. *Journal of Manufacturing Systems*, 2020, vol. 56, pp. 58–71. DOI: 10.1016/j.jmsy.2020.05.007.
28. Jones D., Snider C., Nassehi A., Yon J., Hicks B. Characterising the Digital Twin: a systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2020, vol. 29 (A), pp. 36–52. DOI: 10.1016/j.cirpj.2020.02.002.
29. Ritto T.G., Rochinha F.A. Digital twin, physics-based model, and machine learning applied to damage detection in structures. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, vol. 155, p. 107614. DOI: 10.1016/j.ymssp.2021.107614.
30. Liu C., Vengayil H., Zhong R.Y., Xu X. A systematic development method for cyber-physical machine tools. *Journal of Manufacturing Systems*, 2018, vol. 48 (C), pp. 13–24. DOI: 10.1016/j.jmsy.2018.02.001.
31. Cai Y., Starly B., Cohen P., Lee Y.-S. Sensor data and information fusion to construct Digital-twins virtual machine tools for cyber-physical manufacturing. *Procedia Manufacturing*, 2017, vol. 10, pp. 1031–1042. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.094.
32. Wang J., Ye L., Gao R.X., Li C., Zhang L. Digital Twin for rotating machinery fault diagnosis in smart manufacturing. *International Journal of Production Research*, 2019, vol. 57 (12), pp. 3920–3934. DOI: 10.1080/00207543.2018.1552032.
33. Pimenov D.Yu., Kumar Gupta M., da Silva L.R.R., Kiran M., Khanna N., Krolczyk G.M. Application of measurement systems in tool condition monitoring of milling: a review of measurement science approach. *Measurement*, 2022, vol. 199, p. 111503. DOI: 10.1016/j.measurement.2022.111503.
34. Kozochkin M.P., Sabirov F.S., Bogan A.N., Myslivcev K.V. Monitoring sostoyaniya tekhnologicheskogo oborudovaniya na promyshlennykh predpriyatiyakh [Monitoring of process equipment for industrial enterprises]. *Vestnik UGATU = Scientific Journal of Ufa State Aviation Technical University*, 2013, vol. 17, no. 8 (61), pp. 56–62.
35. Gimadeev M.R., Li A.A. Analiz sistem avtomatizirovannogo obespecheniya parametrov sherokhovatosti poverkhnosti na osnove dinamicheskogo monitoringa [Analysis of automated surface roughness parameter support systems based on dynamic monitoring]. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*, 2022, vol. 22, no. 2, pp. 116–129. DOI: 10.23947/2687-1653-2022-22-2-116-129.
36. Qiao Q., Wang J., Ye L., Gao R.X. Digital twin for machining tool condition prediction. *Procedia CIRP*, 2019, vol. 81, pp. 1388–1393. DOI: 10.1016/j.procir.2019.04.049.
37. Qi Q., Tao F. Digital twin and big data towards smart manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree comparison. *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 3585–3593. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2793265.
38. Cooper C., Wang P., Zhang J., Gao R.X., Roney T., Ragai I., Shaffer D. Convolutional neural network-based tool condition monitoring in vertical milling operations using acoustic signals. *Procedia Manufacturing*, 2020, vol. 49, pp. 105–111. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.07.004.
39. Averchenkov V.I., Filippova L.B., Pugach L.I. Programmnyi kompleks opredeleniya velichiny korrektsii na instrument dlya obrabatyvayushchikh tsentrov s datchikami aktivnogo kontrolya [Determination of software tool compensation values in the preparation of automated production of the use of active control sensor tool]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = News of the Tula state university. Technical sciences*, 2013, iss. 7 (1), pp. 70–78.
40. Zhou C., Guo K., Sun J., Yang B., Liu J., Song G., Sun C., Jiang Z. Tool condition monitoring in milling using a force singularity analysis approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, vol. 107, pp. 1785–1792. DOI: 10.1007/s00170-019-04664-4.
41. Cuka B., Kim D.W. Fuzzy logic based tool condition monitoring for end-milling. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2017, vol. 47, pp. 22–36. DOI: 10.1016/j.rcim.2016.12.009.



42. Barreiro J., Fernandez-Abia A.I., Gonzalez-Laguna A., Pereira O. TCM system in contour milling of very thick-very large steel plates based on vibration and AE signals. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, vol. 246, pp. 144–157. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.03.016.

43. Lukyanov A.V., Aleynikov D.P. Issledovanie kolebaniy sil vzai-modeistviya frezy s zagotovkoi pri povyshenii skorosti vrashcheniya shpindelya [Analysis of oscillations of cutting forces between a mill and a work-piece when increasing the spindle rotation speed]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie = Modern Technologies. System Analysis. Modeling*, 2017, vol. 56, no. 4, pp. 70–82. DOI: 10.26731/1813-9108.2017.4(56).70-82. (In Russian).

44. Volosova M.A. Avtomatizirovannaya sistema monitoringa i diagnostiki obrabotki otvetstvennykh detalei v mashinostroenii keramicheskimi rezhushchimi instrumentami [Automated monitoring and diagnostic system for the processing of critical parts in mechanical engineering ceramic cutting tool]. *Innovatsii = Innovations*, 2016, no. 8 (214), pp. 84–87. (In Russian).

45. Rizal M., Ghani J.A., Nuawi M.Z., Haron C.H.C. Cutting tool wear classification and detection using multi-sensor signals and Mahalanobis-Taguchi System. *Wear*, 2017, vol. 376–377 (B), pp. 1759–1765. DOI: 10.1016/j.wear.2017.02.017.

46. Hu M., Ming W., An Q., Chen M. Tool wear monitoring in milling of titanium alloy Ti-6Al-4 V under MQL conditions based on a new tool wear categorization method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, vol. 104, pp. 4117–4128. DOI: 10.1007/s00170-019-04125-y.

47. Nouri M., Fussell B.K., Ziniti B.L., Linder E. Real-time tool wear monitoring in milling using a cutting condition independent method. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2015, vol. 89, pp. 1–13. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2014.10.011.

48. Shaffer D., Ragai I., Danesh-Yazdi A., Loker D. Investigation of the feasibility of using microphone arrays in monitoring machining. *Manufacturing Letters*, 2018, vol. 15 (B), pp. 132–134. DOI: 10.1016/j.mfglet.2017.12.008.

49. Mohamed A., Hassan M., Msaoubi R., Attia H. Tool condition monitoring for high-performance machining systems – a review. *Sensors*, 2022, vol. 22, p. 2206. DOI: 10.3390/s22062206.

50. Vetrichevan G., Sundaram S., Kumaran S., Velmurugan P. An investigation of tool wear using acoustic emission and genetic algorithm. *Journal of Vibration Control*, 2014, vol. 21 (15), pp. 3061–3066. DOI: 10.1177/1077546314520835.

51. Sahinoglu A., Rafighi M. Investigation of vibration, sound intensity, machine current and surface roughness values of AISI 4140 during machining on the lathe. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2020, vol. 45, pp. 765–778. DOI: 10.1007/s13369-019-04124-x.

52. Hu S., Liu F., He Y., Hu T. An on-line approach for energy efficiency monitoring of machine tools. *Journal of Cleaner Production*, 2012, vol. 27, pp. 133–140. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.01.013.

53. Suslov A.G., Fedorov V.P., Nagorkin M.N., Pyrikov I.L. Kompleksnyi podkhod k eksperimental'nyim issledovaniyam tekhnologicheskikh sistem metallobrabotki po obespecheniyu parametrov kachestva i ekspluatatsionnykh svoystv poverkhnostei detalei mashin [Complex approach to experimental investigations of metal-working technological systems to ensure parameters of quality and operation properties of machinery surfaces]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii = Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2018, no. 10, pp. 3–13. DOI: 10.30987/article_5bb4b1f9abbc54.46761484.

54. Alzugaray-Franz R., Diez-Cifuentes E., Leal-Munoz E., Villaverde San Jose M., Vizán A. Determination of tool wear in peripheral milling operations based on acoustic emission signals. *IACME 2022: Proceedings of the XV Ibero-American Congress of Mechanical Engineering*, 2023, pp. 300–305. DOI: 10.1007/978-3-031-38563-6_44.

55. Moricz L., Viharos Z.J., Nemeth A., Szepligeti A., Buki M. Off-line geometrical and microscopic & on-line vibration based cutting tool wear analysis for micro-milling of ceramics. *Measurement*, 2020, vol. 163, p. 108025. DOI: 10.1016/j.measurement.2020.108025.

56. Patwari A.U., Zamee A.A., Bhuiyan M.H., Sakib S.M. The surface roughness analysis using sound signal in turning of mild steel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 703, p. 012011. DOI: 10.1088/1757-899X/703/1/012011.

57. GOST R 51904–2002. *Programmnoe obespechenie vstroennykh sistem. Obshchie trebovaniya k razrabotke i dokumentirovaniyu* [State Standard R 51904–2002. Embedded system software. General requirements for development and documentation]. Moscow, Standartinform Publ., 2012. 36 p.

58. GOST R ISO/MEK 15910–2002. *Informatsionnaya tekhnologiya. Protssess sozdaniya programmnoy sredstva pol'zovatelya* [State Standard R ISO/MEK 15910–2002. Information technology. Software user documentation process]. Moscow, Standartinform Publ., 2012. 98 p.

59. GOST 34.201–89. *Informatsionnaya tekhnologiya. Kompleks standartov na avtomatizirovannyye sistemy. Vidy, komplektnost' i oboznachenie dokumentov pri sozdanii avtomatizirovannykh system* [State Standard 34.201–89. Information technology. Set of standards for automated systems. Types, sets and indication of documents for automated systems making]. Moscow, Goskomstandart Publ., 2002. 36 p.
60. GOST 34.601–90. *Informatsionnaya tekhnologiya. Kompleks standartov na avtomatizirovannyye sistemy. Avtomatizirovannyye sistemy stadii sozdaniya* [State Standard 34.601–90. Information technology. Set of standards for automated systems. Automated systems. Stages of development]. Moscow, Goskomstandart Publ., 2002. 84 p.
61. GOST R ISO/MEK 12207–2010. *Informatsionnaya tekhnologiya. Sistemnaya i programmnaya inzheneriya. Protsessy zhiznennogo tsikla programmnykh sredstv* [State Standard R ISO/MEK 12207–2010. Information technology. System and software engineering. Software life cycle processes]. Moscow, Standartinform Publ., 2011. 105 p.
62. GOST R 15.301–2016. *Sistema razrabotki i postanovki produktsii na proizvodstvo. Produktiya proizvodstvenno-tekhnicheskogo naznacheniya. Poryadok razrabotki i postanovki produktsii na proizvodstvo* [State Standard R 15.301–2016. System of product development and launching into manufacture. Products of industrial and technical designation. Procedure of product development and launching into manufacture]. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 15 p.
63. GOST ISO/IEC 15420–2010. *Avtomaticeskaya identifikatsiya. Kodirovanie shtrikhovoe. Spetsifikatsiya simvoliki shtrikhovogo koda EAN/UPC* [State Standard ISO/IEC 15420–2010. Automatic identification. Bar coding. EAN/UPC bar code symbology specification]. Moscow, Standartinform Publ., 2011. 45 p.
64. Ingemansson A.R. Tekhnologicheskaya podgotovka i adaptivnoe upravlenie v tsifrovyykh proizvodstvennykh sistemakh [Technological preparation and adaptive control in digital production systems]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 2021, no. 4, pp. 5–13. DOI: 10.26730/1999-4125-2021-4-5-13.
65. Suslov A.G., Medvedev D.M., Petreshin D.I., Fedonin O.N. Sistema avtomatizirovannogo tekhnologicheskogo upravleniya iznosostoičnost'yu detalei mashin pri obrabotke rezaniem [System for automated wear-resistance technological control of machinery at cutting]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii = Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2018, no. 5 (83), pp. 40–44. DOI: 10.30987/article_5ad8d291cddcd8.06334386.
66. Tugengold A.K., Izyumov A.I. Printsipy kontseptual'nogo podkhoda k sozdaniyu podsistemy Instrument v smart-pasporte mnogooperatsionnogo stanka [Principles of conceptual approach to creating tool subsystem for multioperation machine smart-passport]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Don State Technical University*, 2014, vol. 14 (2), pp. 74–83. DOI: 10.23947/1992-5980-2014-2-74-83.
67. Xiurong Z., Yeu W. Process analysis and parameter optimization of five axis NC machine for machining complex curved surface impellers. *2019 International Conference on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City (ICITBS)*, Changsha, China, 2019, pp. 122–124. DOI: 10.1109/ICITBS.2019.00036.
68. Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E. Sinergeticheskii podkhod k povysheniyu effektivnosti upravleniya protsessami obrabotki na metallovezhushchikh stankakh [Synergetic approach to improve the efficiency of machining process control on metalcutting machines]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 3, pp. 84–99. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.3-84-99.
69. Kouguchi J., Yoshioka H. Monitoring method of cutting forces and vibrations by using frequency separation of acceleration sensor signals during milling process with small ball end mills. *Precision Engineering*, 2024, vol. 85, pp. 337–356. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2023.10.013.
70. Lu Z., Wang M., Dai W., Sun J. In-process complex machining condition monitoring based on deep forest and process information fusion. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, vol. 104, pp. 1953–1966. DOI: 10.1007/s00170-019-03919-4.
71. Yao Z., Shen J., Wu M., Zhang D., Luo M. Position-dependent milling process monitoring and surface roughness prediction for complex thin-walled blade component. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, vol. 198, p. 110439. DOI: 10.1016/j.ymssp.2023.110439.
72. Accattatis A., Saggio G., Giannini F. A real time FFT-based impedance meter with bias compensation. *Measurement*, 2011, vol. 44 (4), pp. 702–707. DOI: 10.1016/j.measurement.2011.01.00.
73. Guo Y., Shi D., Shen X., Ji J., Gan W.-S. A survey on adaptive active noise control algorithms overcoming the output saturation effect. *Signal Processing*, 2024, vol. 222, p. 109525. DOI: 10.1016/j.sigpro.2024.109525.
74. Chehrehzad M., Kecibas G., Besirova C., Uresin U., Irican M., Lazoglu I. Tool wear prediction through AI-assisted digital shadow using industrial edge device. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, vol. 113, pp. 117–130. DOI: 10.1016/j.jmapro.2024.01.052.
75. Ponomarev B.B., Nguyen S.H. Vliyanie orientatsii instrumenta na sily rezaniya pri kontsevom frezerovanii [The influence of tool orientation on cutting forces during end milling]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii*.

Mashinostroenie = *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2019, no. 3, pp. 11–20. DOI: 10.18698/0536-1044-2019-3-11-20.

76. Gimadeev M.R., Li A.A. Tool condition monitoring techniques for milling. *Proceedings of the 9th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2023*. Cham, Springer, 2023, pp. 698–707. DOI: 10.1007/978-3-031-38126-3_69.

77. Gowid S., Dixon R., Ghani S. A novel robust automated FFT-based segmentation and features selection algorithm for acoustic emission condition based monitoring systems. *Applied Acoustics*, 2015, vol. 88, pp. 66–74. DOI: 10.1016/j.apacoust.2014.08.007.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

Claimed contribution of co-authors:

Gimadeev M.R. – formulation of the basic concept of the study, conducting experiments, preparing the text of the paper and drawing conclusions, presenting the research results in graphs, searching for analytical materials in domestic and foreign sources, preparing a literature review;

Stelmakov V.A. – planning the experiment, conducting experiments, conducting analysis and preparing initial conclusions;

Shelenok E.A. – conducting a critical analysis of materials and drawing conclusions, participating in the discussion of the paper materials, analyzing and supplementing the text of the paper.

© 2024 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).