МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.941.08 EDN: FUCNXZ

Деркачёв С. В., Сидоров В. А., Лавшонок А. В.
Донецкий национальный технический университет
**E-mail: sergey_derkachev@mail.ru*

ПОКАЗАТЕЛИ ВИБРАЦИИ ПРИ НЕИСПРАВНОСТЯХ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ СТАНКОВ С ЧПУ

В статье рассмотрены возможности вибрационного контроля для диагностирования подшипниковых узлов станков с ЧПУ. Представлены результаты спектрального анализа, визуального осмотра и динамической балансировки оснастки, позволившие снизить виброскорость до 0,2 мм/с. Обоснована необходимость комплексного подхода к оценке технического состояния металлорежущего оборудования.

Ключевые слова: *шпиндель, станок с ЧПУ, подшипники, диагностирование, вибрация, спектральный анализ, динамическая балансировка, техническое состояние.*

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Для металлорежущих станков показатели вибрации отражали качество процесса резания в выбранном технологическом диапазоне и состояние механической части станка. Жесткие массивные корпуса, относительно низкие частоты вращения классических токарных и фрезерных станков позволяли минимизировать влияние вибрации на качество обрабатываемого изделия. Появление станков с ЧПУ во многом изменило подходы к техническому обслуживанию и оценке состояния, появлению и устранению неисправностей механической части. Следует отметить более жесткие требования к уровню вибрационных показателей станков с ЧПУ и необходимость своевременного выявления первых признаков проявления неисправностей. Полученные результаты при диагностировании технического состояния некоторых станков с ЧПУ, последовательность постановки диагноза и устранения повышенной вибрации рассматриваются в данной статье.

Вопросы вибрационного контроля станков с ЧПУ составляют основное содержание многочисленных исследований, отражающих попытки использовать полученные данные в технологическом процессе. В работе [1] исследованы способы компенсации вариабельности процесса резания посредством аккумулирования статистики износа режущего инструмента. В качестве косвенного параметра при этом используется уровень вибрации технологической системы, коррелирующий с динамикой износа инструмента. Рассмотренный подход получил развитее в работе [2], результаты которой показывают, что поведение максимальной мощности спектра сигнала вибрации не является случайным, а закономерно изменяется в соответствии со стадиями износа режущего инструмента. Для решения задачи повышения точности прогнозирования стойкости режущего инструмента, авторы [3] предлагают конструкцию устройства измерения вибрации путем измерения вибрации оправки инструмента. В статье [4] приведены результаты исследования амплитудно-частотных характеристик обрабатывающих центров, основанных на согласованном измерении вибрации и частоты вращения шпинделя станка. Система защиты обрабатывающих центров от динамических нагрузок, реализующая мониторинг состояния технологического оборудования по параметрам вибрации и силы, действующей на шпиндель, представлена в работе [5].

В работе [6] предложена математическая модель, которая позволяет преобразовать сигналы вибродатчиков в колебательные перемещения по обобщенным коор-

динатам, а также представлена визуализация трехмерной модели обрабатывающего центра, базирующаяся на временной реализации вибрационного сигнала.

Методы борьбы с вибрацией на многоцелевых сверлильно-фрезерно-расточных станках с ЧПУ стали основным содержанием работы [7]. Результатом работы [8] стали границы частотного диапазона для разных способов закрепления датчиков обрабатывающего центра, определены резонансные частоты конструкций соединений. В статье [9] представлены и обобщены результаты исследований в области контроля вибраций, моделирования систем, систематизированы перспективные направления исследований гашения вибраций станков с ЧПУ.

Результаты исследования износа инструмента и качества поверхности при высокоскоростной обработке сплава Ti6Al4V приведены в работе [10]. В статье [11] утверждается, что правильный выбор параметров резания и угла наклона режущего инструмента позволяет снизить удельную энергию резания при высокоскоростной обработке алюминиевого сплава. Результаты исследования и разработки системы мониторинга и сбора данных для станков с ЧПУ в интеллектуальном производстве представлены в статье [12]. Тема активного контроля вибрации фрезерного станка с ЧПУ стала основной в работе [13]. Объединение вопросов резки металла, вибрации станка с ЧПУ выполнено в работе [14]. Моделирование статического и динамического поведения большого токарного станка большой мощности при номинальных нагрузках приведено в статье [15]. Исследование механики и предварительной обработки вибрационных сигналов для станка с ЧПУ приведено в [16]. О раннем обнаружении износа конструкций обрабатывающего центра с ЧПУ с использованием анализа вибрации и преобразования Фурье для профилактического обслуживания рассказывается в работе [17]. Необходимость одновременного отслеживания и подавления вибрации на основе привода в системах подачи станков с ЧПУ стало основной целью исследований статьи [18]. Проведенный краткий литературный обзор подтверждает актуальность выбранной темы и расширяет объем проведенных исследований данными вибрационных проявлений некоторых неисправностей в механической части станка с ЧПУ.

Постановка задачи. Современные металлорежущие станки с числовым программным управлением (ЧПУ) предъявляют повышенные требования к уровню вибрационных показателей, которые напрямую влияют на качество обработки, точность позиционирования и долговечность механических узлов (шпиндельных узлов, подшипниковых опор, редукторов). В отличие от классических станков жесткие корпуса и высокие рабочие частоты вращения станков с ЧПУ делают их более чувствительными к вибрациям, вызванным дисбалансом, износом подшипников, нарушением посадок или накоплением продуктов окисления в смазке. Существующие стандарты (например, ГОСТ Р ИСО 20816-1-2021) задают общие допустимые уровни вибрации для роторных машин, но не учитывают специфику станков с ЧПУ, где даже небольшие вибрационные отклонения могут приводить к браку деталей, преждевременному отказу инструмента и дорогостоящим ремонтам. Литературный обзор показывает, что большинство исследований сосредоточено либо на диагностировании износа инструмента по вибрации, либо на моделировании динамики станков, однако комплексный подход к выявлению, локализации и устранению причин повышенной вибрации непосредственно в механической части станка с ЧПУ с использованием органолептических, спектральных и термометрических методов проработан недостаточно. Поэтому требуется системное исследование, позволяющее на основе вибрационного контроля и последующего визуального подтверждения дефектов разработать практические рекомендации по

диагностике и устранению вибрационных неисправностей у станков с ЧПУ.

В связи с этим ***целью*** настоящей работы явились разработка и обоснование подхода к диагностированию технического состояния механических узлов металлорежущих станков с ЧПУ на основе вибрационного контроля, спектрального анализа и визуального подтверждения повреждений, а также применение способов снижения уровня вибрации (включая динамическую балансировку оснастки) для повышения качества обработки и надежности оборудования.

Объект исследования — технологический процесс эксплуатации и ремонта металлорежущих станков с ЧПУ (на примере токарного обрабатывающего центра GLS-200M и фрезерного станка FRITZ WERNER TC 1.4 C) в условиях проявления повышенной вибрации.

Предмет исследования — закономерности изменения вибрационных параметров (виброскорости, виброускорения, спектральных составляющих) в подшипниковых узлах шпинделя и других механических элементах станков с ЧПУ при возникновении и развитии повреждений (износ, ослабление посадок, загрязнение смазки, дисбаланс), а также связь этих параметров с характером дефектов, подтвержденных визуальным осмотром.

Задачи исследования:

– Провести оценку технического состояния шпиндельного узла станка с ЧПУ с использованием органолептического метода, измерения общего уровня вибрации (виброскорости, виброускорения) в разных частотных диапазонах и спектрального анализа для выявления диагностических признаков неисправностей.

– Установить зависимости изменения параметров вибрации от частоты вращения шпинделя и идентифицировать характер повреждений (дисбаланс, механические дефекты подшипников, ослабление посадок) на основе линейности/нелинейности этих зависимостей и анализа гармонических составляющих.

– Верифицировать поставленный вибрационный диагноз путем разборки подшипникового узла, визуального осмотра деталей (следы проворота, окисление, состояние сепаратора и тел качения) и сопоставления выявленных дефектов с зарегистрированными вибрационными сигналами.

– Оценить качество ремонта станка с ЧПУ (на примере FRITZ WERNER TC 1.4 C) по результатам вибрационных измерений на холостом и рабочем ходу, выявить характерные спектральные признаки (высокие гармоники, субгармоники, нестабильность спектра), указывающие на перекос, зазоры и неудовлетворительное состояние сопряжений.

– Разработать и апробировать методику динамической балансировки технологического приспособления в собственных опорах станка с ЧПУ для снижения виброскорости до уровня 0,2 мм/с, обеспечивающего рабочую частоту вращения 2500 об/мин, и определить требования к конструкции оснастки (наличие мест под балансировочные грузы).

Методика исследования. Для решения поставленной задачи использовался комплекс методов, включающий органолептический контроль, измерение общего уровня виброскорости (10–1000 Гц) и виброускорения (10–5000 Гц) с последующим спектральным анализом сигналов (пакет ConSpect) в контрольных точках подшипниковых узлов шпинделя, а также термометрию тепловизором. Верификация диагноза выполняется визуальным осмотром разобранных узлов для сопоставления выявленных дефектов (следы проворота, окисление, повреждения сепаратора) с зарегистрированными вибрационными характеристиками.

Изложение материала. Подшипниковые узлы станков с ЧПУ обеспечивают необходимую жесткость шпинделя при выполнении технологических операций, определяя качество поверхности и точность размеров. Долговечность и безотказность данного элемента во многом обеспечивают показатели надежности станка в целом.

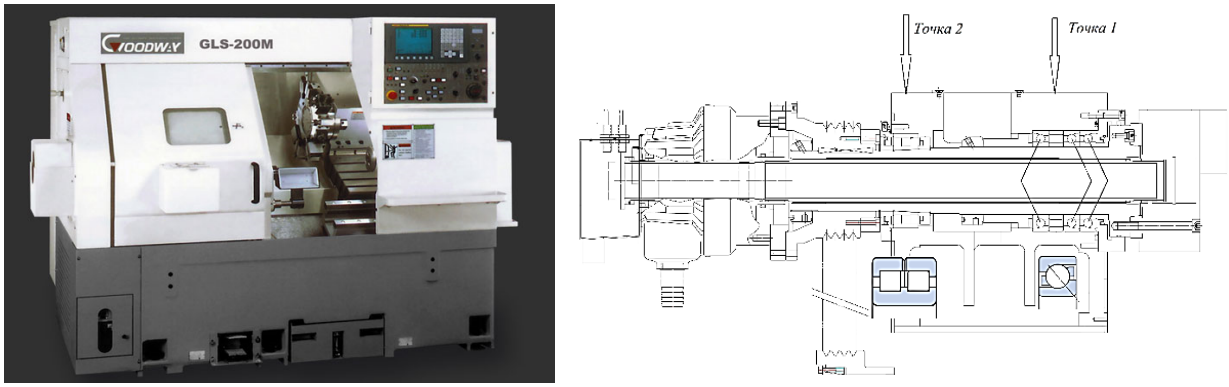
Своевременная идентификация признаков зарождающихся дефектов в данном узле позволит обеспечить наименьшие издержки на восстановление его работоспособности при условии соблюдения сроков выполнения ремонтных работ.

В работах [1, 19, 20] предложено оснащать станки с ЧПУ стационарными системами вибрационного контроля. Также существуют комплексные методики, включающие анализ погрешностей, определяющих положение обрабатывающего инструмента по пяти координатам, включая необходимую коррекцию перемещений на основании анализа показаний оптических датчиков [21], результаты корректируются на основании математической модели шпинделя с учетом значений динамических составляющих шпинделя станка с ЧПУ [22].

Опыт диагностирования металлообрабатывающих станков, полученный при оценке их технического состояния, указывает на низкий уровень вибрационных показателей, определяющих качество обрабатываемой поверхности и индивидуальные особенности границ допустимых значений при диагностировании данного класса оборудования, относительно таких элементов, как подшипники шпиндельного узла, корпусные детали, резьбовые соединения и др. Использование методологии вибрационного диагностирования в данном случае требует применения методологии спектрального анализа.

Предлагаемый в работе алгоритм диагностирования подшипниковых узлов шпинделя станка с ЧПУ типа GLS-200M (рис. 1, *а*), основанный на методах вибрационных измерений и анализе альтернативных подходов, позволяет минимизировать риск ошибок при оценке фактического технического состояния. Привод шпинделя токарного обрабатывающего центра модели GLS-200M осуществляется посредством поликлинового ремня, а сам шпиндель смонтирован на подшипниках качения, заполненных пластичной смазкой (рис. 1, *б*).

Двухрядный роликовый подшипник NN3018 воспринимает доминирующую радиальную составляющую нагрузки и гарантирует высокую точность центрирования. Три шариковых радиально-упорных подшипника 7020A5 скомпонованы по «О»-схеме с тандемным усилением, что позволяет эффективно компенсировать осевые нагрузки. Регулировка зазоров в «О»-образной паре подшипников 7020A5 выполняется с помощью промежуточных колец. Диапазон рабочих частот вращения (42…4200 об/мин) не достигает предельно допустимых значений для применения пластичной смазки (как для NN3018, так и для 7020A5). Мощность шпиндельной группы — 15 кВт.



а б

Рисунок 1 — Станок с ЧПУ GLS-200M (а), схема шпинделя (б), а также расположение контрольных точек измерения вибрации

Диагностические симптомы, указавшие на изменение текущего состояния в работе металлорежущего станка, связаны с использованием органолептических методов, в частности: работа без нагрузки и при реализации технологического процесса сопровождалась изменением звуковой картины, возникли вибрационные явления, а также зафиксирован локальный перегрев узлов. Локализация источника аномального шума позволила выдвинуть предположение о возникновении отклонений в работе подшипникового узла. Принятие решения о необходимости проведения ремонтных операций определило необходимость определения уровня развития дефекта, приобретенного при эксплуатации.

Использование анализатора вибрации 795М позволило провести измерения общего уровня показателей вибрации на подшипниковых узлах шпинделя при работе станка без нагрузки. Дополнительно использовался виброметр 795М-107В, позволяющий выполнять аналогичные измерения и планирующийся для дальнейшего оснащения службы диагностирования.

Полученные значения фиксировались в памяти приборов, и после передачи данных была выполнена компьютерная обработка с использованием специализированного программного обеспечения ConSpect, позволившего получить спектральные составляющие вибрационных сигналов.

Крепление пьезоэлектрического датчика ДН-3 осуществлялось при использовании ниодимового магнита с усилием 50 Н. Датчик располагался в контрольных точках, указанных на рисунке 1, *б*: точка 1 — подшипниковый узел холостой стороны (шариковые подшипники); точка 2 — подшипниковый узел приводной стороны — от шкива (роликовые подшипники).

Общий уровень вибрационных показателей предполагает измерение: среднеквадратичного значения виброскорости (СКЗ) в частотном диапазоне 10…1000 Гц и среднеквадратичного (СКЗ) и пикового (ПИК) значения виброускорения в частотном диапазоне 10…4000 Гц. Результаты проведенных измерений станка без начальных отклонений в характере шума и исследуемого объекта, приведенные в таблице 1, выполненные на фиксированной частоте 2000 об/мин при реализации одинаковых технологических режимов позволили использовать метод взаимной оценки при определении технического состояния. Анализ полученных значений указывает на сопоставимость радиальных составляющих в вертикальном и горизонтальном направлениях и значительные различия СКЗ виброскорости в осевом направлении для станка с нехарактерным шумом подшипников. Высокая жесткость корпуса шпиндельного узла не позволяет локализовать место повреждения. Однако фиксация осевых перемещений реализуется блоком радиально-упорных шариковых подшипников.

При изменении частоты вращения шпинделя от 500 до 3000 об/мин в режиме холостого хода установлены зависимости изменения параметров вибрации (рис. 2). Для виброскорости (рис. 2, *а*) характерны линейные зависимости с различным углом наклона для роликового и шариковых подшипников. Следовательно, это не дисбаланс, для которого характерны квадратичные зависимости, а механические повреждения подшипников.

Таблица 1

Результаты измерения виброскорости в контрольных точках станков

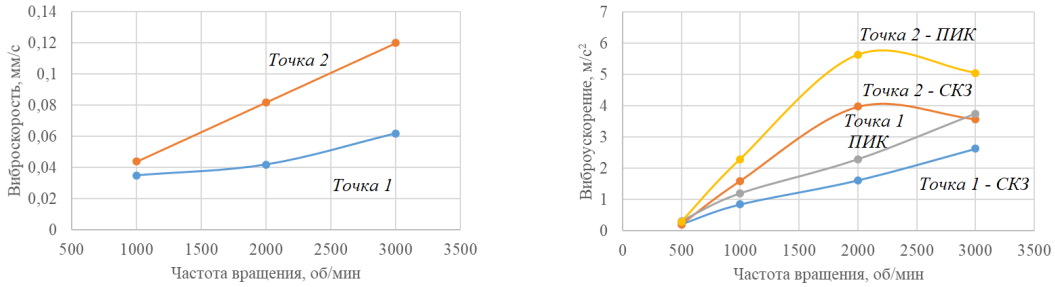
Точка измерения	Среднеквадратичное значение виброскорости (мм/с) для направлений измерения, частотный диапазон 10…1000 Гц		
	Вертикальное	Горизонтальное	Осевое
1	0,26 / 0,20	0,19 / 0,18	0,32 / 0,04
2	0,24 / 0,22	0,14 / 0,15	0,34 / 0,05

Примечание: в знаменателе — значения для исправного шпинделя.

Как видно из рисунка 2, *б*, линейность виброускорения сохраняется для шарикоподшипников, а вот роликовый подшипник демонстрирует уже нелинейную картину. Это прямой признак того, что подшипниковые узлы оказывают влияние друг на друга, когда начинают проявляться повреждения. Самые высокие показатели виброускорения возникают как раз в районе роликоподшипника.

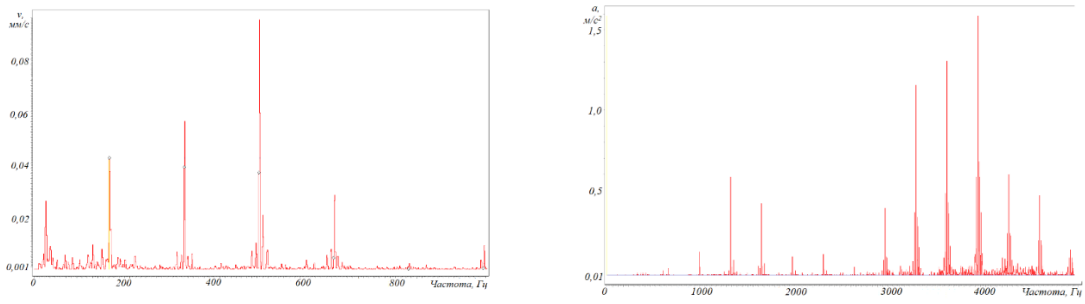
Спектральный анализ виброскоростных и виброускоренческих параметров (рис. 3) проведен в условиях, соответствующих начальной фазе зарождения дефектов. В спектре вибрационного сигнала идентифицированы гармоники оборотной частоты и боковые полосы как основные составляющие. Динамика этих составляющих показателей вибрации анализировалась при постепенном ступенчатом повышении частоты вращения шпинделя в диапазоне от 500 до 3000 об/мин.

Диагностические признаки, выявленные в ходе исследования, характеризуются линейной зависимостью от первой гармоники частоты вращения шпинделя. Присутствие гармонических составляющих интерпретируется как следствие ослабления посадочного натяга или наличия зазоров. Частота указанных гармоник соответствует процессу перекатывания тел качения по наружной дорожке радиально-упорного шарикоподшипника 7020A5 и практически идентична 10-й гармонике оборотной частоты шпинделя, что создает неоднозначность при постановке диагноза. В диапазоне 500…1000 об/мин наблюдается нестабильность виброускорения. При дальнейшем повышении частоты вращения фиксируется модуляция вибрационного сигнала частотой вращения сепаратора, проявляющаяся в виде боковых полос вблизи гармоник.



а б

Рисунок 2 — Зависимости изменения параметров виброскорости (а) и виброускорения (б) от частоты вращения



а б

Рисунок 3 — Спектрограммы виброскорости (а) и виброускорения (б) подшипниковых узлов шпинделя станка GLS-200M

В качестве дополнительного диагностического признака выступает повышенная амплитуда высших гармоник, что интерпретируется как следствие развития повреждения. Низкий абсолютный уровень составляющих обусловлен демпфирующими свойствами корпусных деталей и начальной стадией развития дефекта. Поставленный диагноз: техническое состояние подшипникового узла шпинделя — неудовлетворительное и требуется ремонтное вмешательство. Степень повреждения — переходная от начальной к развитой форме. Возможные дефекты: увеличенный осевой люфт либо радиальный зазор, ослабление посадки подшипника, начальная стадия разрушения сепаратора. Принятое решение: инициировать подготовку к ремонту (замене подшипниковых узлов) и контролировать техническое состояние шпиндельных подшипников в динамике.

Повторные измерения, выполненные через месяц эксплуатации станка, зафиксировали увеличение показателей вибрации более чем в 2,5 раза. Исходя из принципов различения границ технического состояния по показателям вибрации, повышение измеренных значений в 2,0 раза не приводит к изменению категории технического состояния, более высокие значения указывают на изменение категории технического состояния. Дополнительный диагностический признак — появление в спектре составляющих, указывающих на динамическое соударение деталей подшипникового узла. Указанные диагностические симптомы в наибольшей степени проявились в осевом направлении, что послужило основанием для проведения замены подшипников шпинделя.

После разборки шпиндельного узла, снятия подшипников при осмотре выявлено: признаки окисления смазочного материала в виде частиц коксования темного цвета; корпусные детали имели следы фреттинг-коррозии — темных окисных поверхностных пленок, указывающих на ослабление посадки наружного кольца подшипника. Элементы роликовых подшипников находились в исправном состоянии, без признаков износа. Радиально-упорные шариковые подшипники разобраны подетально, и проведенная визуальная дефектовка (рис. 4) установила следующее:

– легкие щелчки при прокручивании, исчезающие после промывки;

– наружное кольцо: следы проворота по посадочному диаметру в корпусе (рис. 4, *а*) и по торцевым поверхностям (рис. 4, *б*); неплотное прилегание дистанционного кольца (рис. 4, *в*);

– беговые дорожки: признаки окислительного износа и микроцарапины, ориентированные по направлению движения; макроповреждения отсутствуют;

– сепаратор: аккумуляция окисленной смазки в окнах сепаратора;

– тела качения: на шариках — окисление в виде светло-коричневой полосы;

– внутреннее кольцо: ослабление посадки на валу по посадочному диаметру (рис. 4, *г*).

Выявленные характерные признаки механических повреждений позволили предположить наличие взаимосвязанных причин возникновения и развития повреждения: нарушения осевой игры при монтаже радиально-упорных подшипников, значения которой индивидуальны для каждой пары устанавливаемых подшипников; накопление продуктов окисления смазочного материала в окнах сепараторов. Первая причина приводит к повышенной податливости подшипникового узла и повышению вибрации в осевом направлении. Вторая причина вызывает проскальзывание тел качения, повышая силу трения, температуры и приводя к ускоренному окислению смазочного материала. Избирательное вращение шариков в окнах сепараторов вокруг одной оси приводит к неравномерному распределению нагрузки между телами качения и появлению осевых составляющих дополнительных сил. Осевое и угловое смещение не компенсируется роликовыми подшипниками из-за более жестких допусков на угловые отклонения. Относительно малые отклонения в состоянии деталей подшипникового узла приводили к сниже-

нию качества обрабатываемой поверхности деталей. Развитие повреждения могло привести к внезапному отказу, заклиниванию шпинделя. Замена подшипников выполнена в оптимальные сроки, что подтверждается отсутствием макроповреждений на деталях подшипников и сопряженных элементах.

Следующая задача связана с оценкой качества проведенного ремонта. После завершения ремонтных работ выполнена оценка вибрационного состояния фрезерного станка FRITZ WERNER TC 1.4 C (рис. 5). Измерения проводились на холостом ходу (1116 об/мин) и под нагрузкой (1212 об/мин) с использованием анализатора вибрации типа 795M. Датчик крепился с помощью магнита. Зарегистрированы общие параметры и частотная форма вибрационного сигнала. Частотные диапазоны: для виброскорости — 2…600 Гц и 10…1000 Гц; для виброускорения — 10…4000 Гц. Измерение вибрации выполнено в следующих контрольных точках: 1 — рабочий стол станка; 2 — подшипниковые узлы шпинделя; 3 — подшипник двигателя со стороны вентилятора; 4, 5 — устройство фиксации обрабатываемой детали. Вибрация в точках 1…4 измерялась в радиальном, а в точке 5 — в осевом направлении.

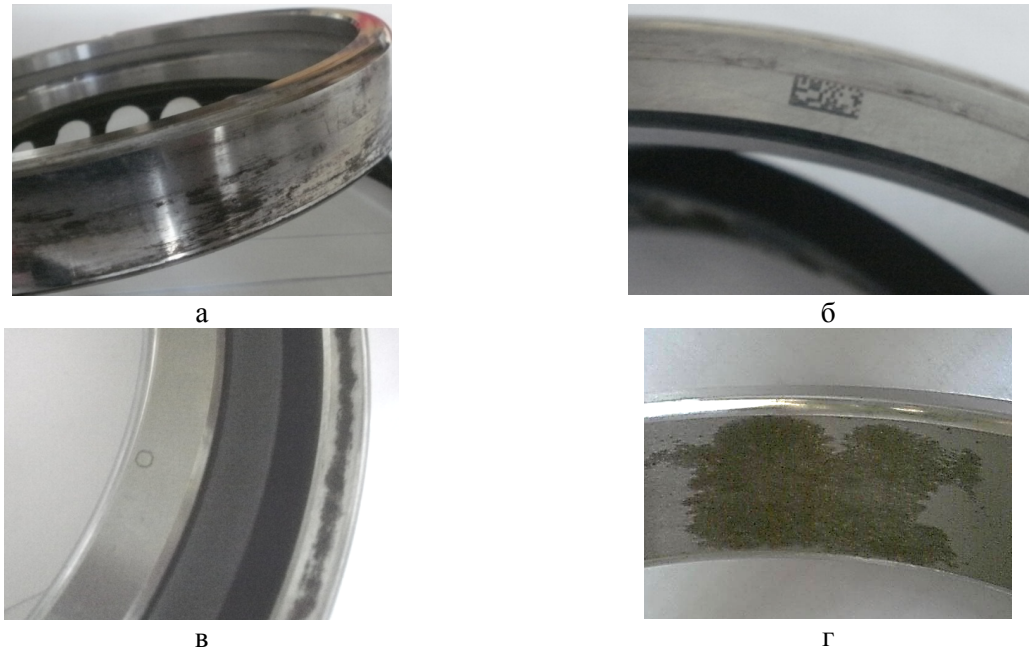
В таблице 2 приведены результаты замеров интегральных вибрационных параметров, выполненных в контрольных точках оборудования.

Приведенные результаты измерения вибрации позволяют сформировать комплекс диагностических симптомов:

– увеличение СКЗ виброскорости на рабочем ходу (под нагрузкой);

– самые высокие значения СКЗ виброскорости и СКЗ/ПИК виброускорения соответствуют контрольным точкам 4 и 5 (устройство фиксации обрабатываемой детали) при работе в режиме холостого хода и при обработке детали — валка для винтовой прокатки;

– рабочему столу станка (точка 1) соответствуют наиболее низкие показатели виброскорости и виброускорения как в режиме холостого хода, так и при обработке детали.



а б в г

Рисунок 4 — Визуализация повреждений элементов подшипника 7020: а) следы проворота по посадочному диаметру наружного кольца; б) следы проворота по торцевой поверхности наружного кольца; в) неплотное прилегание дистанционного кольца к наружному кольцу; г) ослабление посадки внутреннего кольца на валу





Рисунок 5 — Фрезерный станок типа FRITZ WERNER TC 1.4 C и его общий вид

Таблица 2

Значения параметров вибрации для контрольных точек станка

Точка измерения	Виброскорость, мм/с холостой ход	Виброскорость, мм/с рабочий ход	Виброускорение СКЗ/ПИК, м/с^2 холостой ход
1	0,05	0,4	0,1/0,4
2	0,2	1,6	1,2/11,7
3	0,5	1,9	1,7/5,8
4	5,8	9,2	2,6/11,3
5	2,4	3,9	6,9/25,9

В спектрах вибрации присутствуют следующие составляющие (рис. 6):

– гармоники до 24-й оборотной частоты, что свидетельствует о наличие металлического контакта между деталями узла;

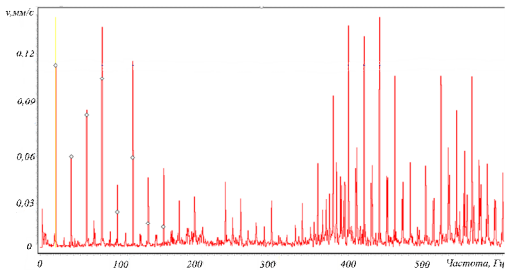
– преобладание 2-ой и 4-ой гармоник указывает на перекос или изгиб вала;

– дробные гармоник (1/2, 1/3 и др.), а также боковые полосы основных гармоник соответствуют наличию зазоров;

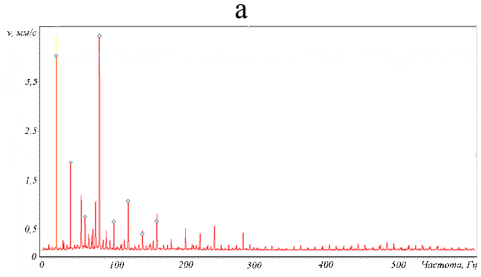
– изменение амплитудных значений спектральных составляющих однозначно указывает на присутствие металлического контакта в сопрягаемых узлах станка;

– информативные частоты возможных повреждений подшипников качения.

Полученные данные позволили оценить качество ремонта как неудовлетворительное, исключить эксплуатацию в длительном временном интервале. Определены возможные повреждения сопрягаемых деталей и рекомендованы ремонтные операции по восстановлению работоспособного состояния станка. Повышенная вибрация влияет на состояние элементов механической, электрической и в наибольшей степени измерительно-координатной систем. Возможные последствия связаны с увеличением объема ремонтных работ и длительной настройкой измерительных программ.



а



б

Рисунок 6 — Спектрограмма виброскорости:
а) в точке 2 — шпиндель под нагрузкой;
б) в точке 4 — зажимное устройство под нагрузкой

Режимы работы металлорежущих станков существенно отличаются от условий работы роторных энергетических машин, в связи с чем допустимые значения вибрации для них должны быть установлены на уровне, заметно более жестком, чем типовые рекомендации ГОСТ Р ИСО 20816-1-2021 «Вибрация. Измерения вибрации и оценка вибрационного состояния машин. Часть 1. Общее руководство».

Значения показателей вибрации влияют на качество обрабатываемой поверхности, одновременно существует тенденция увеличения частоты вращения шпинделя. В процессе разработки технологической оснастки были учтены требования равномерного распределения масс. Приспособление было выполнено в виде асимметричной конструкции (рис. 7) с обеспечением статической уравновешенности на стадиях проектирования и дальнейшей доводки после изготовления. Расчетная частота вращения (3000 об/мин) оказалась недостижимой из-за повышенного уровня вибрации, возникающей при частоте вращения, равной 1000 об/мин.

Принятое решение — выполнить одноплоскостную динамическую балансировку разработанного приспособления, закрепив его в шпинделе станка с ЧПУ. Ограниченная приспособленность станка для выполнения данной операции, связанная с высокой жесткостью корпусных деталей, компенсировалась точностью анализатора вибрации и выделения амплитуды оборотной составляющей. Относительный метод сравнения показателей вибрации в данных условиях обеспечил возможность выполнения измерений при тестовых и пробных запусках.

Первоначально были определены допустимые значения виброскорости, при которых не фиксируются отклонения при измерении координат элементов станка. При частоте вращения шпинделя 1000 об/мин принято значение 1,8 мм/с. Это обеспечило работоспособное состояние измерительной системы, но потребовало проведения трех последовательных балансировок по снижению вибрации.

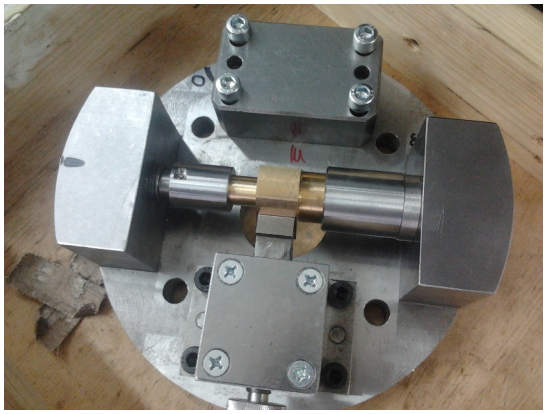
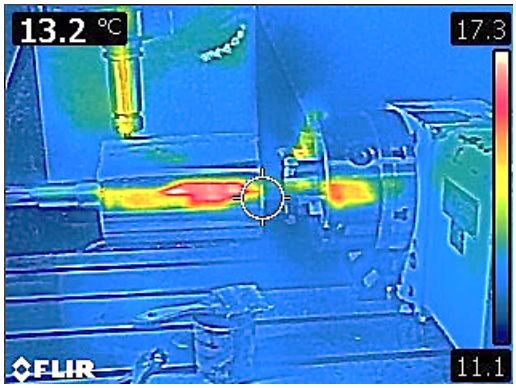


Рисунок 7 — Приспособление для механической обработки деталей

Выполнив предварительное уравновешивание приспособления на частоте вращения 1000 об/мин, шпиндель станка разогнали до частоты 1500 об/мин, не превышая допустимое значение. Установка пробных и корректирующих грузов выполнялась в технологические отверстия приспособления. Третий этап уравновешивания проводился на частоте вращения шпинделя 2000 об/мин и позволил снизить амплитуду первой гармоники (определяющую степень уравновешивания) до 0,2 мм/с на частоте вращения 2500 об/мин. Следует отметить изменение значения динамического коэффициента влияния по этапам балансировки, что связано с уменьшением значения дополнительных сил и обеспечения устойчивой работы станка. Используемый метод амплитуд и фаз показал высокую эффективность при решении данной задачи, обеспечив минимальное количество запусков. В последующих конструкциях приспособлений были предусмотрены фиксированные отверстия для размещения компенсирующих грузов.

Измерение температурного поля при помощи тепловизора не позволило получить стабильных диагностических признаков (рис. 8). Основные причины: массивность корпусных деталей, определяющих длительное время, необходимое для прогрева; кратковременность рабочих режимов; наличие бликующих поверхностей, искажающих истинную тепловую картину.



а



б

Рисунок 8 — Спектрограмма виброскорости: а) в точке 2 — шпиндель под нагрузкой; б) в точке 4 — зажимное устройство под нагрузкой

Наиболее перспективным представляется вибрационный контроль режущего инструмента при начале, в процессе и при окончании обработки. Диагностические симптомы: соотношение вибрации холостого и рабочего хода; характеристика ударного процесса при изменении режима резания или в начале процесса обработки. Высокую информативность представляет анализ временных реализаций виброускорения, что определяет основное направление дальнейших исследований.

Выводы и направление дальнейших исследований. Выполненные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Подтверждена эффективность комплексного применения органолептического метода для обнаружения неисправностей, виброметрии и спектрального анализа для диагностики состояния и планирования ремонтных работ, а также визуального осмотра как инструмента выявления причин возникновения повреждений.

2. Проведенное уравновешивание технологической оснастки в собственных опорах станка с ЧПУ указывает на необходимость разработки специализированных балансировочных станков. Проведенный эксперимент указывает на возможность эффективного устранения дисбаланса при использовании современных виброизмерительных приборов и стандартной методологии динамической балансировки в одной плоскости методом амплитуд и фаз. Результат — СКЗ виброскорости в частотном диапазоне 10…1000 Гц — 0,2 мм/с обеспечивает необходимое качество поверхности при обработке изделия и заданную производительность.

3. Одновременно полученные значения и проведенные исследования, результаты некоторых из которых приведены в статье, указывают на необходимость разработки стандарта, более жестко регламентирующего допустимый уровень вибрации (виброскорости) металлорежущих станков, в частности станков с ЧПУ.

4. Возникновение и развитие повреждений связано в станках с ЧПУ с одновременным влиянием нескольких причин, обуславливающих появление дополнительных сил (трения, центробежных и др.), снижающих ресурс подшипниковых узлов. Полученные результаты предполагается применить для проверки разрабатываемых математических моделей, в частности цифровых двойников.

5. Мехатронная архитектура металлорежущих станков должна быть оборудована не только средствами вибрационного контроля, но и дополнена системами управления вибрацией. К числу таких средств можно отнести автоматическую компенсацию дисбаланса, применение которой напрямую позволяет повысить долговечность оборудования.

Список источников

1. Экспериментальная установка контроля вибрации при обработке на станках с ЧПУ / А. В. Анцев, Ч. Х. Данг, Е. С. Янов, М. В. Полев // Вестник ВГТУ. 2019. Т. 15. № 2. С. 151–158. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnaya-ustanovka-kontrolya-vibratsii-pri-obrabotke-na-stankah-s-chpu (дата обращения: 21.08.2026). DOI: 10.25987/VSTU.2019.15.2.020 EDN CSLVVL

2. Методика обработки вибрационных сигналов для оценки состояния режущего инструмента / А. В. Анцев Н. И. Пасько Е. С. Янов Х. Ч. Данг // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 4. С. 291–296. DOI: 10.24411/2071-6168-2020-00030 EDN QIUXZI

3. Анцев А. В., Данг Х. Ч. Прогнозирование периода стойкости режущего инструмента на основе контроля вибрации в процессе фрезерования // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 7. С. 3–11. EDN YAGHSP

4. Алейников Д. П., Лукьянов А. В., Лукьянов Д. А. Исследование и визуализация амплитудно-частотных характеристик обрабатывающих центров // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. № 1 (53). С. 58–66. EDN YKRLNJ

5. Лукьянов А. В., Алейников Д. П., Портной А. Ю. Система защиты обрабатывающих центров от опасных динамических нагрузок на основе анализа параметров вибрации и силы // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 4 (123). С. 30–38. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-4-30-38 EDN YLJJFB

6. Лукьянов Д. А., Алейников Д. П., Лукьянов А. В. Вычисление параметров и визуализация пространственных колебаний шпинделя обрабатывающего центра по результатам виброизмерений // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. № 12 (83). С. 92–99. EDN RTSACD

7. Аминов П. Ю. Методы борьбы с вибрацией на многоцелевых сверлильно-фрезерно-расточных станках с ЧПУ // Проблемы науки. 2019. № 6 (42). С. 15–17. EDN NDQFVP

8. Алейников Д. П., Лукьянов А. В. Исследование динамики крепления датчиков вибрации шпинделей обрабатывающих центров // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 2 (97). С. 28–35. EDN TKOKSX

9. Analysis of Dual-Driven Feed System Vibration Characteristics Based on Computer Numerical Control Machine Tools: A Systematic Review / U. M. Chantal [et al.] // Symmetry. 2023. Vol. 15. No. 11. Art. 2012. DOI: 10.3390/sym15112012 EDN OSYADZ

10. Fundamental Investigation into Tool Wear and Surface Quality in High-Speed Machining of Ti6Al4V Alloy / A. T. Abbas [et al.] // Materials. 2021. Vol. 14. No. 23. Art. 7128. DOI: 10.3390/ma14237128 EDN BGLOAZ

11. Proper selection of cutting parameters and cutting tool angle to lower the specific cutting energy during high speed machining of 7050-T7451 aluminum alloy / B. Wang [et al.] // Journal of Cleaner Production. 2016. Vol. 129. P. 292–304. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.04.071

12. Guo Y., Sun Y., Wu K. Research and development of monitoring system and data monitoring system and data acquisition of CNC machine tool in intelligent manufacturing // International Journal of Advanced Robotic System. 2020. Vol. 17. Iss. 2. Art. 1729881419898017. DOI: 10.1177/1729881419898017 EDN GXCUGK

13. Active vibration control for a CNC milling machine / D. G. Ford [et al.] // Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci. 2014. Vol. 228. Iss. 2. P. 230–245. DOI: 10.1177/0954406213484224

14. Altintas Y., Ber A. A. Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design // Appl. Mech. Rev. 2001. Vol. 54. B84. DOI: 10.1115/1.1399383

15. Modeling the Static and Dynamic Behaviors of a Large Heavy-Duty Lathe Machine under Rated Loads / Ch.-Yu. Lin [et al.] // Computation 2022. Vol. 10. No. 12. Art. 207. DOI: 10.3390/computation10120207 EDN QTWKWU

16. Peng E. B., Zhang H. G., Wang H. Y. Mechanics and Pretreatment Research of Vibration Signals for the Numerical Control Machine // Advanced Materials Research. 2013. Vol. 676. P. 162–165. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.676.162

17. Early detection of degradation in the structural base of a CNC machining center through vibration analysis and fourier transform for preventive maintenance / J. Hermosillo [et al.]. 2026.

18. Sina Kuseyri İ. Simultaneous Tracking and Drive-Based Vibration Suppression of CNC Machine Tool Feed Systems // Engineer and Machinery. 2025. Vol. 66. Iss. 721. P. 532–549. DOI: 10.46399/muhendismakina.1600632

19. Systèmes de surveillance automatique en usinage: Moyens et methods / A. Beskri, H. Mejri, K. Mehdi, J. F. Rigal // 21ème Congrès Français de Mécanique, CFM 2013. Bordeaux, France, 2013. URL: https://www.academia.edu/6235837/Systèmes_de_surveillance_automatique_en_usinage_Moyens_et_méthodes (date of treatment: 21.08.2026).

20. Morel J. Surveillance vibratoire et maintenance predictive. URL: https://clck.su/ZEogK (date of treatment: 21.08.2026).

21. Identification de la géométrie de machines CN par mesure d'artefacts / M. Makki [et al.] // 1er Congrès International Francophone de Mécanique Avancée, Faculté de Génie Mécanique, Université d'Alep, Syrie, May 2006, Alep, Syrie. URL: https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01101528/document (date of treatment: 15.04.2026).

22. Analyse du comportement dynamique d'une broche de machine-outils / C.-F. Bisu [et al.] // Mechanics & Industry. 2012. Vol. 12. Iss. 6. P. 459–467. URL: https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00660867/document (date of treatment: 15.04.2026).

© Деркачёв С. В., Сидоров В. А., Лавшонок А. В., 2026

Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. управление качеством ДонНТУ Ченцовым Н. А.,
к.т.н., доц., зав. каф. ММК ДонГТУ Денисовой Н. А.

Статья поступила в редакцию 24.06.2026.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Деркачёв Сергей Владимирович, *канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник — руководитель молодежной научной лаборатории «Приборостроение и станкостроение»*
Донецкий национальный технический университет,
г. Донецк, Россия, e-mail: sergey_derkachev@mail.ru

Сидоров Владимир Анатольевич, *д-р техн. наук, доцент, профессор каф. механического оборудования заводов черной металлургии*
Донецкий национальный технический университет,
г. Донецк, Россия

Лавшонок Андрей Валериевич, *канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры горной электротехники и автоматики им. Р. М. Лейбова*
Донецкий национальный технический университет,
г. Донецк, Россия

***Derkachev S. V., Sidorov V. A., Lavshonok A. V.** *(Donetsk National Technical University, Donetsk, Russia, *e-mail: sergey_derkachev@mail.ru)*

VIBRATION INDICATORS WITH A FAULTY MECHANICAL PART OF CNC MACHINES

The article considers the feasibility of vibration control to diagnose the CNC machine bearing unites. The outcomes from spectral analysis, visual examination and dynamic balance of mechanical facilities were showcased, enabling to reduce the vibratory thickness up to 0,2 mm/s. The necessity of a multifaceted approach to the operating condition assessment of metal-cutting equipment has been justified.

Key words: *spindle, CNC machine, bearings, diagnosis, vibration, spectral analysis, dynamic balance, operating conditions.*

References

1. Ancev A. V., Dang Ch. Kh., Yanov E. S., Polev M. V. Experimental unit for vibration control during processing on CNC machines [Eksperimental'naya ustanovka kontrolya vibracii pri obrabotke na stankah s ChPU]. Bulletin of Voronezh state technical university. 2019. Vol. 15. No. 2. Pp. 151–158. DOI: 10.25987/VSTU.2019.15.2.020 EDN CSLVVL

2. Ancev A. V., Pas'ko N. I., Yanov E. S., Dang Kh. Ch. The method of processing vibration signals for evaluating the cutting tool state [Metodika obrabotki vibracionnyh signalov dlya ocenki sostoyaniya rezhushchego instrumenta]. News of the Tula state university. Technical sciences. 2020. No. 4. Pp. 291–296. DOI: 10.24411/2071-6168-2020-00030 EDN QIUXZI

3. Ancev A. V., Dang Kh. Ch. Tool life prediction by vibration measurement during milling [Prognozirovanie perioda stojkosti rezhushchego instrumenta na osnove kontrolya vibracii v processe frezerovaniya]. News of the Tula state university. Technical sciences. 2018. No. 7. Pp. 3-11 EDN YAGHSP

4. Alejnikov D. P., Luk'yanov A. V., Luk'yanov D. A. Study and visualization of the amplitude-frequency characteristics of machining centers [Issledovanie i vizualizaciya amplitudno-chastotnyh harakteristik obrabatyvayushchih centrov]. Modern technologies. System analysis. Modelling. 2017. No. 1 (53). Pp. 58–66. EDN YKRLNJ

5. Luk'yanov A. V., Alejnikov D. P., Portnoj A. Yu. A system for protecting machining centers from dangerous dynamic loads based on the analysis of vibration and force parameters [Sistema zashchity obrabatyvayushchih centrov ot opasnyh dinamicheskih nagruzok na osnove analiza parametrov vibracii i sily]. Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta. 2017. Vol. 21. No. 4 (123). Pp. 30–38. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-4-30-38 EDN YLJJFB

6. Luk'yanov D. A., Alejnikov D. P., Luk'yanov A. V. Calculation of parameters and visualization of spindle spatial oscillations in the processing center using vibration measurement results [Vychislenie parametrov i vizualizaciya prostranstvennyh kolebanij shpindelya obrabatyvayushchego centra po rezul'tatam vibroizmerenij]. Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta. 2013. No. 12 (83). Pp. 92–99. EDN RTSACD

7. Aminov P. Yu. Methods of combating vibration on multi-purpose CNC drilling-milling-boring machines [Metody bor'by s vibraciej na mnogocelevyh sverlil'no-frezerno-rastochnyh stankah s ChPU]. Problems of science. 2019. No. 6 (42). Pp. 15–17. EDN NDQFVP

8. Alejnikov D. P., Luk'yanov A. V. Studying fixation dynamics of machining center spindle vibration sensor [Issledovanie dinamiki krepleniya datchikov vibracii shpindelej obrabatyvayushchih centrov]. Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta. 2015. No. 2 (97). Pp. 28–35. EDN TKOKSX

9. Chantal U. M. [et al.]. Analysis of Dual-Driven Feed System Vibration Characteristics Based on Computer Numerical Control Machine Tools: A Systematic Review. Symmetry. 2023. Vol. 15. No. 11. Art. 2012. DOI: 10.3390/sym15112012 EDN OSYADZ

10. Abbas A. T. [et al.]. Fundamental Investigation into Tool Wear and Surface Quality in High-Speed Machining of Ti6Al4V Alloy. Materials 2021. 2021. Vol. 14. No. 23. Art. 7128. DOI: 10.3390/ma14237128 EDN BGLOAZ

11. Wang B. [et al.]. Proper selection of cutting parameters and cutting tool angle to lower the specific cutting energy during high speed machining of 7050-T7451 aluminum alloy. Journal of Cleaner Production. 2016. Vol. 129. P. 292–304. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.04.071

12. Guo Y., Sun Y., Wu K. Research and development of monitoring system and data monitoring system and data acquisition of CNC machine tool in intelligent manufacturing. International Journal of Advanced Robotic System. 2020. Vol. 17. Iss. 2. Art. 1729881419898017. DOI: 10.1177/1729881419898017 EDN GXCUGK

13. Ford D. G. [et al.]. Active vibration control for a CNC milling machine. Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci. 2014. Vol. 228. Iss. 2. Pp. 230–245. DOI: 10.1177/0954406213484224

14. Altintas Y., Ber A. A. Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design. Appl. Mech. Rev. 2001. Vol. 54. B84. DOI: 10.1115/1.1399383

15. Lin C.-Y. [et al.]. Modeling the Static and Dynamic Behaviors of a Large Heavy-Duty Lathe Machine under Rated Loads. Computation 2022. Vol. 10. No. 12. Art. 207. DOI: 10.3390/computation10120207 EDN QTWKWU

16. Peng E. B., Zhang H. G., Wang H. Y. Mechanics and Pretreatment Research of Vibration Signals for the Numerical Control Machine. Advanced Materials Research. 2013. Vol. 676. Pp. 162–165. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.676.162

17. Hermosillo J. [et al.]. Early detection of degradation in the structural base of a CNC machining center through vibration analysis and fourier transform for preventive maintenance. 2026.

18. Sina Kuseyri İ. Simultaneous Tracking and Drive-Based Vibration Suppression of CNC Machine Tool Feed Systems. Engineer and Machinery. 2025. Vol. 66. Iss. 721. Pp. 532–549. DOI: 10.46399/muhendismakina.1600632

19. Beskri A., Mejri H., Mehdi K., Rigal J. F. Systèmes de surveillance automatique en usinage: Moyens et methods. 21ème Congrès Français de Mécanique, CFM 2013. Bordeaux, France, 2013. URL: https://www.academia.edu/6235837/Systèmes_de_surveillance_automatique_en_usinage_Moyens_et_méthodes (date of treatment: 21.08.2026).

20. Morel J. Surveillance vibratoire et maintenance predictive. URL: https://clck.su/ZEogK (date of treatment: 21.08.2026).

21. Makki M. [et al.]. Identification de la géométrie de machines CN par mesure d'artefacts. 1er Congrès International Francophone de Mécanique Avancée, Faculté de Génie Mécanique, Université d'Alep, Syrie, May 2006, Alep, Syrie. URL: https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01101528/document (date of treatment: 15.04.2026).

22. Bisu C.-F. [et al.]. Analyse du comportement dynamique d'une broche de machine-outils. Mechanics & Industry. 2012. Vol. 12. Iss. 6. Pp. 459–467. URL: https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00660867/document (date of treatment: 15.04.2026).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Derkachev Sergey Vladimirovich, *PhD in Engineering, Leading Research Scientist, Head of the Youth Scientific Laboratory "Instrument Engineering and Machine Tool Engineering"*
Donetsk National Technical University,
Donetsk, Russia, e-mail: sergey_derkachev@mail.ru

Sidorov Vladimir Anatolyevich, *Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Mechanical Equipment of Ferrous Metallurgy Plants*
Donetsk National Technical University,
Donetsk, Russia

Lavshonok Andrey Valeryevich, *PhD in Engineering, Associate Professor, Assistant Professor of the Department of Mining Electrical Engineering and Automation named after R. M. Leibov*
Donetsk National Technical University,
Donetsk, Russia