



Информационные свойства виброакустической эмиссии в системах диагностики износа режущего инструмента

Вилор Заковоротный^a, Валерия Гвинджилия^{b, *}, Кирилл Кислов^c

Донской государственный технический университет, пл. Гагарина, 1, г. Ростов-на-Дону, 344000, Россия

^a <https://orcid.org/0000-0003-2187-9897>, vzakovorotny@dstu.edu.ru; ^b <https://orcid.org/0000-0003-1066-4604>, vvgvindjiliya@donstu.ru;
^c <https://orcid.org/0000-0002-5770-2519>, kislovk@bk.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9:531.3

История статьи:

Поступила: 19 апреля 2025
 Рецензирование: 23 апреля 2025
 Принята к печати: 05 июня 2025
 Доступно онлайн: 15 сентября 2025

Ключевые слова:

Диагностика состояния режущего инструмента
 Вибрации
 Информационные модели диагностики

АННОТАЦИЯ

Введение. Статья посвящена построению методики диагностирования износа режущего инструмента на основе анализа сигнала виброакустической эмиссии. При этом решаются две задачи. Во-первых, формируется пространство информационных признаков износа. Во-вторых, в этом пространстве определяются решающие правила, которые позволяют разделить его на отдельные кластеры по признаку принадлежности к величине износа. Поскольку главное значение в этих процедурах имеют методы построения пространства информационных признаков (ПИП), то **целью работы** является определение закономерности изменения частотных характеристик динамической системы резания, вызванных развитием износа, и построение на этой основе рационального информационного пространства диагностирования износа инструмента. **Метод и методология.** В исследовании на основе результатов математического моделирования возмущенной динамической системы резания определяется пространство информационных признаков, в котором отображается износ инструмента. Предлагаются методы определения параметров ПИП, обеспечивающие высокую их чувствительность к изменению износа. Все параметры ПИП должны быть безразмерными, и при нулевом износе они должны обнуляться. Они должны удовлетворять и другим требованиям, в том числе к условиям помехозащищенности. **Результаты и обсуждение.** В статье приводятся результаты построения параметров ПИП для анализа виброакустической эмиссии в двух частотных диапазонах. В низкочастотном диапазоне, ограниченном первыми собственными частотами взаимодействующих подсистем (до 1,0...1,5 кГц), компоненты ПИП определяются на основе рассмотрения вибрационных последовательностей, полученных аналитически при силовых возмущениях в виде «белого» шума. В высокочастотной области (выше 2,0 кГц) предлагается построение информационных моделей на основе случайной импульсной последовательности. Показано, что применимость конкретного информационного признака зависит от условий. Таким образом, разработанная методика, математическое моделирование, а также цифровые и натурные эксперименты позволили сформировать рациональное информационное пространство диагностирования износа, в котором на основе известных методов распознавания можно построить решающие правила разделения информации по признаку принадлежности к величине износа.

Для цитирования: Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е., Кислов К.В. Информационные свойства виброакустической эмиссии в системах диагностики износа режущего инструмента // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 3. – С. 50–70. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.3-50-70.

Введение

В последние 10–15 лет научная общественность мира уделяет большое внимание построению виртуальных цифровых моделей (ВЦМ) процесса обработки [1–14]. Они прежде всего предназначены для определения связи технологических режимов и выходных свойств обработ-

ки. Большинство из представленных работ не раскрывают структуру связи координат состояния с выходными свойствами [1–7], а используют экспериментально полученные уравнения регрессии, связывающие режимы с параметрами качества деталей и изнашивания инструмента [5–7]. Эта информация необходима для построения программы ЧПУ. Во многих случаях вместо регрессионных уравнений применяются методы нейросетевого моделирования [8–11]. Исключениями являются исследования [2–4, 17–21], в которых для построения ВЦМ используются

*Адрес для переписки

Гвинджилия Валерия Енвериевна, к.т.н., старший преподаватель
 Донской государственный технический университет,
 пл. Гагарина, 1,
 344000, г. Ростов-на-Дону, Россия
 Тел.: +7 918 583-23-33, e-mail: vvgvindjiliya@donstu.ru

модели динамической системы резания (ДСР). Разработаны ВЦМ, позволяющие связать траектории формообразующих движений с геометрическими характеристиками формируемой поверхности и износом [17–21].

Большинство исследований ограничиваются проблемой оценивания износа как главного фактора, влияющего на выходные свойства [22–24]. Здесь отметим предложенное нами ранее моделирование эволюционных изменений ДСР [25, 26]. В этой системе эволюция износа и параметры качества представляются в виде интегрального уравнения Вольтерры второго рода относительно фазовой траектории мощности необратимых преобразований по произведенной работе. Таким образом, эволюция свойств и параметров раскрывает полную ДСР, но ее использование требует большого вычислительного ресурса.

В этой статье мы ограничимся проблемой диагностирования износа на основе анализа виброакустической эмиссии (ВАЭ) [27–47]. Для измерения ВАЭ применяются пьезоэлектрические преобразователи, датчики сил, бесконтактные лазерные и другие измерительные системы, позволяющие определять колебания некоторой координаты ДСР в частотном диапазоне (от 10 Гц до 600 кГц). Измеренные последовательности проходят первичную обработку с помощью интегральных преобразований, прежде всего преобразования Фурье [26], вейвлет-преобразования [37], преобразования Гильберта – Хуанга [36], преобразования Вольтерры [3, 37, 28] и др. Используются методы комплексирования измеримых последовательностей различной физической природы [48].

В отличие от известных работ в настоящей статье главное внимание уделяется построению пространства информационных признаков (ПИП), в котором рассматривается чувствительность вариаций параметров к изменению износа, их помехозащищенность и простота формирования в системах диагностики. Рассматривается отдельно два частотных диапазона. Низкочастотный диапазон лежит в пределах до 1,0...1,5 кГц, высокочастотный – выше 2,0 кГц. Такое разделение обусловлено особенностями математического моделирования ДСР как канала, по которому передается информация о силовых взаимодействиях, формируемых в процессе обработки.

Целью работы является построение методики диагностирования износа режущего инструмента с помощью определения информационного пространства признаков, сформированного на основе изучения изменения частотных характеристик динамической системы резания, вызванных развитием износа.

Для достижения цели необходимо решить следующие **задачи**: разработать методику аналитического определения информационного пространства низкочастотного и высокочастотного диапазона, выполнить математическое моделирование и произвести цифровые и натурные эксперименты, определить параметры информационного пространства в рассматриваемых частотных диапазонах и методику их оценки.

Методика исследований

Методика экспериментального оценивания износа. Обобщенным параметром, позволяющим оценивать состояние инструмента, является его износ по задней грани. Поэтому рассмотрим алгоритм экспериментального оценивания износа, который определяется по высоте ленточки износа по задней грани (рис. 1). Конфигурация следа от износа на задней грани меняется. Лишь в некоторых случаях она близка к прямоугольнику, как показано на рис. 1, а. Поэтому под оценкой износа будем понимать высоту эквивалентного прямоугольника $w = S_0 / (t_P^{(0)} - X_1^*)$ мм, где S_0 – площадь поверхности следа на задней грани инструмента; X_1^* – упругая деформация в состоянии равновесия. Площадь S_0 определяется по сетке (рис. 1, в). Ранее показано [2, 3, 26, 47], что на свойства ДСР влияют параметры динамической связи, изменение которых проявляется в вариациях спектров вибраций. Параметры этой связи зависят от износа, и анализ взаимозависимости спектра колебаний и износа удобно рассматривать независимо в двух частотных диапазонах. В низкочастотном диапазоне $\omega_H \in (0, \omega_0)$ модель представляется в виде конечномерной пространственной дискретной модели [47]. Это частотный диапазон, ограниченный сверхсобственными частотами подсистем инструмента и заготовки. Частотную область, лежащую

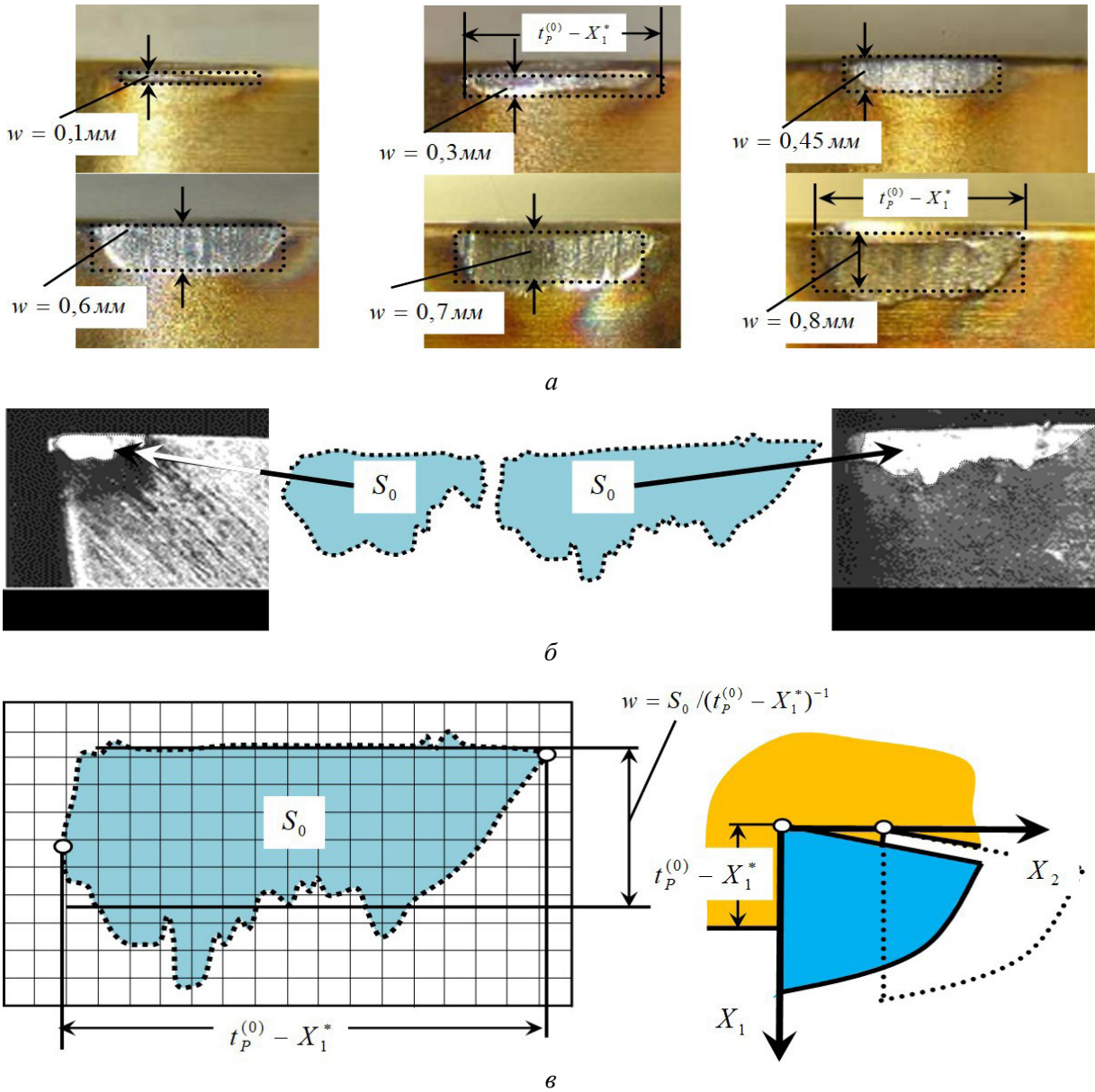


Рис. 1. Примеры фотографий изношенной части инструмента и схема оценивания износа: а – износ по задней грани пластинки из Т15К6 при точении стали AISI 301; б – развитие износа пластинки из Т15К6 при точении стали 20Х; в – схема сетки

Fig. 1. Examples of photographs of the worn tool part and wear evaluation scheme: а – flank wear of a 79 WC-15 TiC-6% Co insert during turning of AISI 301 steel; б – wear development of a 79 WC-15 TiC-6% Co insert during turning of steel 0.2 C-Cr; в – schematic of the matrix grid

выше ω_0 , будем интерпретировать как высокочастотный диапазон $\omega_B \in (\omega_0, \infty)$.

Методика аналитического определения информационного пространства низкочастотного диапазона. Рассмотрим модель ДСР, полученную нами ранее [47]. Ограничимся случаем обработки недеформируемой заготовки. Тогда уравнение возмущенной ДСР будет

$$\mathbf{m} \frac{d^2 \mathbf{X}}{dt^2} + \mathbf{h} \frac{d \mathbf{X}}{dt} + \mathbf{c} \mathbf{X} = \mathbf{F}_\Sigma(\mathbf{L}, \mathbf{V}, \mathbf{X}, \mathbf{p}) + \mathbf{f}(t), \quad (1)$$

где $\mathbf{m} = \text{diag}(m)$, $\mathbf{h} = [h_{S,k}]$, $\mathbf{c} = [c_{S,k}]$, $s, k = 1, 2, 3$ – положительно определенные симметричные матрицы инерционных, скоростных и упругих коэффициентов; $\mathbf{X} = \{X_1, X_2, X_3\}^T \in \mathfrak{R}_X^{(3)}$ – вектор деформаций; $\mathbf{F}_\Sigma = \mathbf{F} + \mathbf{\Phi}$ – вектор-функция сил на передней \mathbf{F} и задней $\mathbf{\Phi}$ гранях; $\mathbf{F} = \{F_1, F_2, F_3\}^T \in \mathfrak{R}_X^{(3)}$; $\mathbf{\Phi} = \{\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3\}^T \in \mathfrak{R}_X^{(3)}$.

Введем в рассмотрение также скорости деформаций $\mathbf{V}_X = d\mathbf{X} / dt = \{V_{X,1}, V_{X,2}, V_{X,3}\}^T \in \mathfrak{R}$

$\in \mathbb{R}_X^{(3)}$. Силы \mathbf{F} представим в виде $\mathbf{F} = \{F_1, F_2, F_3\}^T = F^{(0)}\{\chi_1, \chi_2, \chi_3\}^T$ [47]. Здесь χ_1, χ_2, χ_3 – угловые коэффициенты, они удовлетворяют условию $(\chi_1)^2 + (\chi_2)^2 + (\chi_3)^2 = 1$. Заданные возмущения $\mathbf{f}(\mathbf{t}) = f_0(t)\{\chi_1, \chi_2, \chi_3\}^T$ рассматриваются приведенными к системе координат сил \mathbf{F} , причем $f_0(t)$ представляется в виде «белого» шума.

На основе выполненных ранее исследований модель сил резания, действующих на переднюю грань инструмента $F^{(0)}$, представим в виде [47]

$$\begin{aligned} & T^{(0)} dF^{(0)} dt + F^{(0)} = \\ & = \rho(V_3, V_X) \left\{ t^{(0)} - [X_1 - k_p X_1(t - T)] \right\} \times \\ & \times \int_{t-T}^t \left\{ V_2(\xi) - V_{X_2}(\xi) \right\} d\xi, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\rho = \rho_0 \left\{ 1 + \mu \exp[-\zeta(V_3 - V_{X_3})] \right\}$ – давление стружки (кг/мм²); ρ_0 – давление в области малых скоростей резания; μ – безразмерный параметр; ζ – коэффициент наклона (с·м⁻¹); $T^{(0)}$ – постоянная времени стружкообразования (с); k_p – безразмерный коэффициент регенерации следа, $0 < k_p = 1$.

Силы Φ_2 и Φ_3 представимы как

$$\begin{aligned} \Phi_2 &= k_\Phi F_0 + \rho_\Phi \left[t_p^{(0)} - X_1(t) \right] \times \\ & \times \exp[\zeta(v - v^*)]; \\ \Phi_3 &= k_\Phi k_T F_0 + k_T \rho_\Phi \times \\ & \times \left\{ \left[t_p^{(0)} - X_1(t) \right] \exp[\zeta(v - v^*)] \right\}, \end{aligned} \quad (3)$$

где ρ_Φ – сила, приведенная к длине контакта (кг/мм); ζ – параметр, зависящий от заднего угла α и износа; k_T – коэффициент трения; k_Φ – безразмерный коэффициент упругого восстановления.

Уравнения (1–3) представляют цифровую модель ДСР. Адекватность модели была подтверждена путем сравнения результатов цифровых и натуральных экспериментов, проведенных

с помощью измерительных комплексов непрерывного вибрационного контроля. Уточнение параметров уравнения динамической связи, в частности параметра давления стружки на переднюю грань инструмента, проводилось как с использованием теоретического материала [49], так и с помощью измерения силовой характеристики процесса резания [50]. В этом случае вместо суппорта устанавливается система STD.201-1 для измерения динамических нагрузок инструмента по осям $\{X_1, X_2, X_3\}$. Аппаратный интерфейс станда представляет собой совокупность электронных блоков производства фирмы National Instruments – NI-9234, NI-9237, NI-9219 – с частотой дискретизации до 25 кГц. Корректность результатов аналитического моделирования ограничена зоной стационарного износа инструмента и началом зоны интенсификации износа, когда влияние случайных процессов в зоне резания снижает точность классических аналитических нелинейных моделей.

Здесь разработанный ранее математический инструментарий применяется для построения пространства признаков износа.

Примем во внимание, что параметры формируемой резанием динамической связи $\mathbf{p}(\mathbf{w}) = \{p_1(\mathbf{w}), p_2(\mathbf{w}), \dots, p_n(\mathbf{w})\}$ зависят от износа. Пусть заданы экспериментально определенные траектории $\mathbf{p}(\mathbf{w}) = \{p_1(\mathbf{w}), p_2(\mathbf{w}), \dots, p_n(\mathbf{w})\}$. Для последовательности $\mathbf{w} = \{w_1, w_2, \dots, w_k\}$ вычислим спектры $S_{X_1, X_1}(\omega)$, $S_{X_2, X_2}(\omega)$ и $S_{X_3, X_3}(\omega)$ в пространстве $\mathbb{R}_X^{(3)}$ как Фурье-изображения от диагональных элементов корреляционных матриц временных последовательностей деформаций $\mathbf{X}^{(i)}(\mathbf{t}) = \{X_1^{(i)}(t), X_2^{(i)}(t), X_3^{(i)}(t)\}^T \in \mathbb{R}_X^{(3)}$, $i = 1, 2, \dots, k$. В результате получаем набор спектров деформаций для каждого набора параметров, соответствующих набору параметров для каждого износа $\mathbf{w} = \{w_1, w_2, \dots, w_k\}$.

Результаты и их обсуждение

Пример определения параметров информационного пространства в области низких частот. Если возмущения $f_0(t)$ малы и равнове-

сие асимптотически устойчиво, то силами Φ в модели (1) можно пренебречь. Тогда основными параметрами, влияющими на формирование спектров, являются вариации ρ и $T^{(0)}$. Рассмотрим точение вала диаметром $D = 84,0$ мм из стали 10ГН2МФА. Исследования выполнялись в рамках реализации хоздоговора с заводом «Атоммаш» (г. Волгодонск). Условия обработки базируются на технологическом процессе изготовления реальной детали типа «патрубок» для полустого точения. Технологические режимы: подача $S_p^{(0)} = 0,1$ мм; глубина $t_p^{(0)} = 2,0$ мм и скорость резания $V_p^{(0)} = (0,5 \dots 3,8)$ м/с. При исследовании диапазон скорости резания брался расширенным для получения более полной информации о диагностических признаках в сигналах ВАЭ. Обработка велась на модернизированном станке 1К62, снабженном регулируемыми приводами шпинделя и подачи. Вместо суппорта установлена измерительная система STD.201-1 для определения сил, вибрации и температуры. Параметры даны в табл. 1. Обобщенная масса $m = 0,015$ кг · с²/мм. Параметры динамической связи приведены в табл. 2. Резонансные частоты

подсистемы инструмента: $\Omega_{0,1} = 130$, $\Omega_{0,1} = 174$, $\Omega_{0,1} = 236$ Гц.

Будем изучать спектры на основе численного моделирования в программном комплексе MATLAB – Simulink, а также экспериментально на основе прямого измерения ВАЭ в процессе резания. Рассмотрим спектры колебаний деформаций $X \in \mathfrak{R}_X^{(3)}$, вычисленные как реакции на «белый» шум. Спектры на рис. 2, а, б отличаются от спектров на рис. 2, в угловыми коэффициентами $\chi = \{\chi_1, \chi_2, \chi_3\}^T$. Примеры подобраны так, чтобы отобразить следующие свойства спектров колебаний.

1. В спектрах можно выделить резонансы (показаны круглыми незатемненными точками) и антирезонансы (показаны затемненными точками). В реальных системах они остаются практически неизменными при вариациях параметров формируемой процессом резания динамической связи.

2. При кинематических возмущениях (рис. 2, а) на спектры накладываются периодические всплески. Расстояние между ними равно частоте вращения заготовки. При силовых воз-

Таблица 1

Table 1

Матрицы скоростных коэффициентов и упругости подсистемы инструмента
Matrices of speed coefficients and elasticity of the tool subsystem

$c_{1,1}$, кг/мм	$c_{2,2}$, кг/мм	$c_{3,3}$, кг/мм	$h_{1,1}$, кг · с/мм	$h_{2,2}$, кг · с/мм	$h_{3,3}$, кг · с/мм
4500	1500	750	1,3	1,1	0,8
$c_{1,2} = c_{2,1}$, кг/мм	$c_{1,3} = c_{3,1}$, кг/мм	$c_{2,3} = c_{3,2}$, кг/мм	$h_{1,2} = h_{2,1}$, кг · с/мм	$h_{1,3} = h_{3,1}$, кг · с/мм	$h_{2,3} = h_{3,2}$, кг · с/мм
200	150	80	0,6	0,5	0,4

Таблица 2

Table 2

Параметры динамической связи
Dynamic coupling parameters

ρ , кг/мм ²	$\rho\Phi$, кг/мм	Ω , с ⁻¹	$T_0^{(0)}$, с	ς	k_T	$k^{(S)}$, с/м	χ_1	χ_2	χ_3
100...1000	20	5...50	0,0001	1...7	0,2	0,1	0,4	0,51	0,76

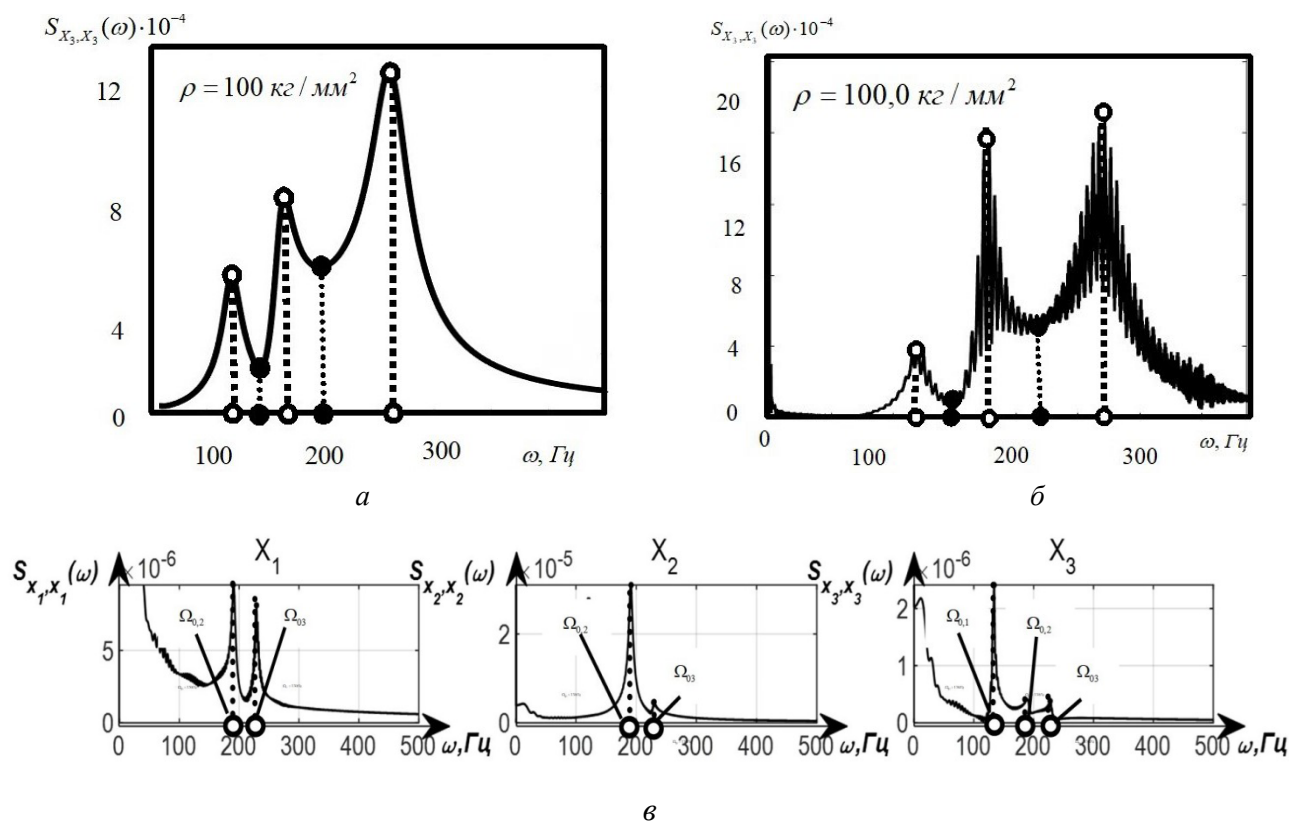


Рис. 2. Типичные примеры автоспектров:

a – частота вращения шпинделя равна 10,0 Гц, возмущения приложены к вариациям скорости подачи; b – частота вращения шпинделя равна 100 Гц, возмущения приложены к модулю сил резания; c – изменение спектров в зависимости от направления деформационных смещений в пространстве $\mathfrak{R}_X^{(3)}$

Fig. 2. Typical examples of autospectra:

a – spindle rotation frequency of 10.0 Hz, disturbances applied to feed rate variations; b – spindle rotation frequency of 100 Hz, disturbances applied to cutting force module; c – spectral changes depending on the direction of deformation displacements in space $\mathfrak{R}_X^{(3)}$

мушения всплески нивелируются (рис. 2, б). Они нивелируются и в высокочастотной области. Поэтому в реально измеренных спектрах обнаруживаются существенные вариации уровня по мере увеличения частоты, но резонансные частоты, как правило, наблюдаемы.

3. Всплески на всех резонансах могут не проявляться или проявляться в меньшей степени (рис. 2, в). Все определяется структурой матриц упругости и коэффициентами χ . Известно, что угловые коэффициенты χ изменяются по мере увеличения износа. Например, силы в направлении, нормальном к задней грани, возрастают быстрее [51], что отображается в перераспределении амплитуд на резонансных частотах.

4. Развитие износа вызывает увеличение параметров ρ и $T^{(0)}$, а также изменение угловых коэффициентов χ . Увеличение ρ вызывает сме-

щение корней характеристического полинома линеаризованного уравнения в вариациях так, что некоторые из корней двигаются в сторону мнимой оси, и увеличение ρ всегда приводит к потере устойчивости. Увеличение $T^{(0)}$ вызывает противоречивое влияние: с одной стороны, оно способствует самовозбуждению, с другой – приводит к дополнительному затуханию.

5. По мере развития износа за счет изменения параметров динамической связи система может потерять устойчивость равновесия, и тогда в окрестности траектории формируются различные притягивающие множества деформаций, а вдоль траектории могут наблюдаться бифуркации. В этом случае нормированный спектр вибраций практически не зависит от возмущений, а определяется свойствами ДСР.

Приведем пример влияния ρ на нормированные к дисперсии спектры для $\mathbf{X} \in \mathfrak{R}_X^{(3)}$ (рис. 3).

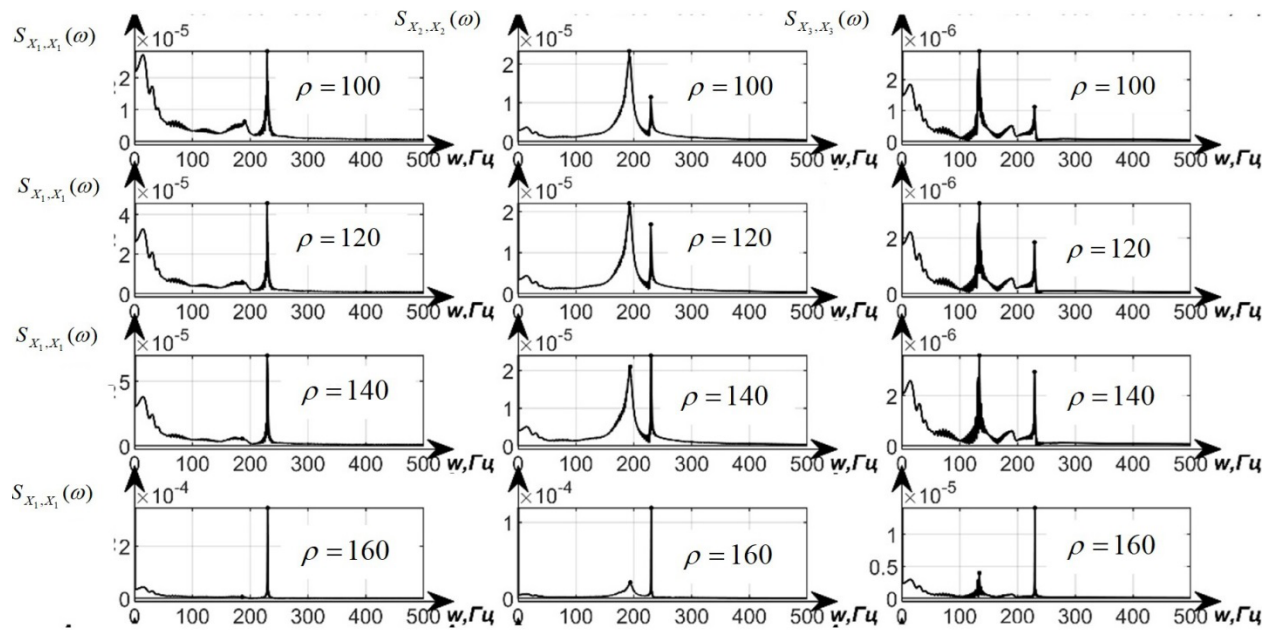


Рис. 3. Пример изменения автоспектров деформаций в зависимости от давления ρ стружки на переднюю грань инструмента

Fig. 3. Example of changes in deformation autospectra depending on chip pressure ρ on the tool's rake face

Эксперименты показывают, что для стали 10ГН2МФА на режимах подачи $S_p^{(0)} = 0,1$ мм, глубины резания $t_p^{(0)} = 1,5$ мм и скорости резания $V_p^{(0)} = 1,2$ м/с по мере увеличения износа по задней грани до значения 0,6 мм наблюдается монотонное увеличение ρ от 100 до 160 кг/мм². Этому соответствует трансформация спектров на рис. 3.

Отметим особенности изменения спектров. Имеют место перераспределения интенсивности колебаний в частотных областях, расположенных вблизи собственных частот. Обозначим их $A_{i,s}$, $i, s = 1, 2, 3$. Здесь i – номер резонанса, s – номер направления колебаний в пространстве $\mathfrak{R}_X^{(3)}$. При увеличении ρ не только наблюдается увеличение амплитуды на частоте Ω_3 , но и возрастает добротность этого контура. При $\rho = 160$ кг/мм² формируется единый осциллятор с общей частотой Ω_3 . Анализ показывает, что уже при $\rho = 145$ кг/мм² равновесие теряет устойчивость и образуются автоколебания.

Подробнее с формированием притягивающих множеств деформаций можно ознакомиться

в наших работах [2, 3, 25, 26]. При приближении корней характеристического полинома к мнимой оси добротность осциллятора, отображающего эту пару комплексно сопряженных корней, возрастает. Приведем примеры зависимости изменения отношения амплитуд на резонансах ρ (рис. 4). Пунктирным красным цветом отмечена точка потери устойчивости, правее которой формируется $\delta(\omega - \Omega_3)$ -образный спектр, поэтому все коэффициенты неограниченно возрастают.

Более грубой, но более помехозащищенной оценкой является средняя частота спектров $\omega^{(C)}$ по направлениям $\mathbf{X} \in \mathfrak{R}_X^{(3)}$. При увеличении износа, прежде всего за счет увеличения $T^{(0)}$, наблюдается смещение общего спектра колебаний в низкочастотную область. Если задана $\omega^{(C)}$, то справедливо
$$\int_0^{\omega^{(C)}} S_{X_i X_i}(\omega) d\omega = \int_{\omega^{(C)}}^{\infty} S_{X_i X_i}(\omega) d\omega.$$

Приращение $\omega^{(C)}$ в меньшей степени зависит от вариаций начальных параметров, возмущений и режимов. По мере увеличения износа наблюдаются два взаимосвязанных процесса. Первый характеризует детерминацию состояния. При этом пики в спектрах становятся ярко выражен-

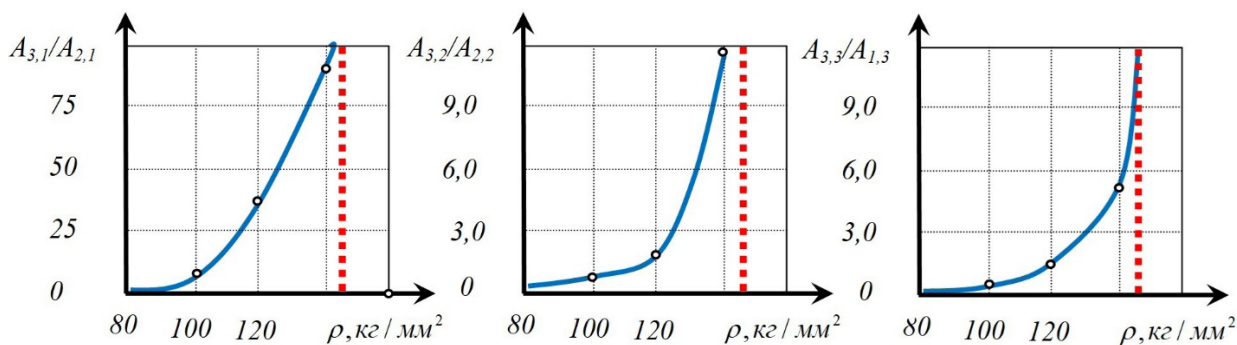


Рис. 4. Чувствительность амплитуд при резонансах к вариациям ρ

Fig. 4. Sensitivity of amplitudes at resonances to variations ρ

ными, и они имеют повышенную добротность. Второй процесс характеризует деградацию свойств, проявляющуюся в формировании хаоса.

Для оценивания эволюции удобно воспользоваться дисперсионной оценкой

$$\hat{\sigma}_{X_1, X_1}(\rho_i) = \sigma_{X_1, X_1}(\rho_i) [\sigma_{X_1, X_1}(\rho_0)]^{-1}, \quad (4)$$

где $\sigma_{X_1, X_1}(\rho_i) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} S_{X_1, X_1}(\omega, \rho_i) d\omega$, $i = 0, 1, 2, \dots, k$

$\rho = \{\rho_0, \rho_1, \dots, \rho_r\}$ – последовательность значений ρ_i , каждой из которых соответствует дисперсия. В связи с этим при рассмотрении общей дисперсии имеют место два этапа (рис. 5, б). На начальном этапе приработки уменьшается дисперсия колебаний, которая затем возрастает. Причем эта тенденция справедлива, является ли точка равновесия устойчивой, или в ее окрестности образуются различные притягивающие множества деформаций. Анализ позволяет соз-

дать систему ПИП. Первая оценка Π_1 основана на анализе изменения относительных приращений амплитуд $A_{i,s}$, $i, s = 1, 2, 3$ по направлению s :

$$\Pi_1 = [\delta_A(w) - \delta_A(0)] \delta_A(0)^{-1}, \quad (5)$$

где $\delta_A(w) = A_{3,1}(w) / A_{2,1}(w)$, здесь $s = 1$.

Вторая оценка Π_2 основана на определении смещения $\omega^{(C)}$ по мере увеличения износа w . Однако расчет средней частоты требует значительных вычислительных ресурсов. Поэтому можно рассматривать эквивалентную оценку двух сигналов, прошедших через фильтры низких и высоких частот. В этом случае точное совпадение частот среза фильтров с частотой $\omega^{(C)}$ необязательно. Тогда

$$\Pi_2 = \frac{\sigma_I(w) - \sigma_B(w)}{\sigma(w)}, \quad (6)$$

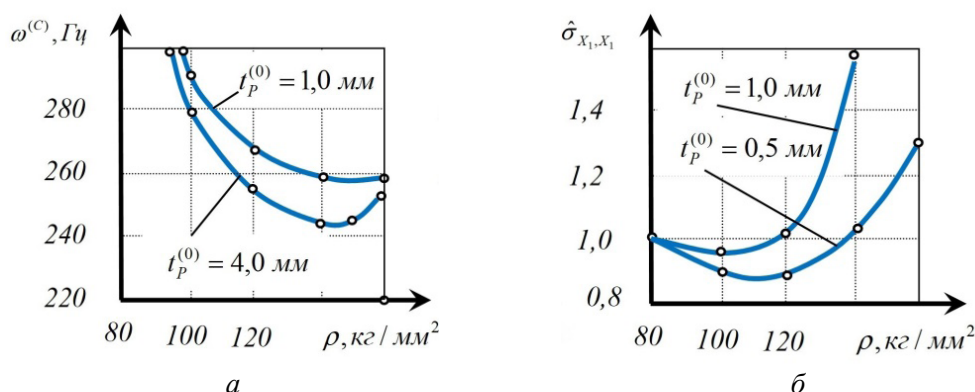


Рис. 5. Чувствительность средней частоты $\omega^{(C)}$ (а) и относительной дисперсии σ_{X_1, X_1} (б) при варьировании ρ на различных глубинах $t_p^{(0)}$ резания

Fig. 5. Sensitivity of average frequency $\omega^{(C)}$ (а) and relative dispersion σ_{X_1, X_1} (б)

during variation at different cutting depths $t_p^{(0)}$

где $\sigma_H(w)$ – дисперсия сигнала ВАЭ в низкочастотном диапазоне; $\sigma_B(w)$ – дисперсия сигнала в высокочастотном диапазоне; $\sigma(w)$ – общая дисперсия. Сигнал настраивается так, что при $w = 0$ оценка $\Pi_2 = 0$. Информативной является и оценка Π_3 , основанная на формуле (4):

$$\Pi_3 = \frac{\hat{\sigma}_{X_1, X_1}(w) - \hat{\sigma}_{X_1, X_1}(0)}{\hat{\sigma}_{X_1, X_1}(0)}, \quad (7)$$

где $\hat{\sigma}_{X_1, X_1}(w)$ – дисперсионная оценка, вычисленная по алгоритму (4).

Параметры информационного пространства высокочастотного диапазона. В высокочастотной области аналитическое определение реакции вибрационных последовательностей на изменение износа не представляется возможным, так как динамическая модель имеет ограниченную область определения в частотной области. Однако процесс резания является источником волн в частотном диапазоне, достигающем до сотен килогерц [5, 15]. Измеренный сигнал в высокочастотной области будем интерпретировать как сигнал акустической эмиссии (АЭ). Источник этого сигнала – силовые взаимодействия в областях (рис. 6, а) первичной (1) и вторичной (2) пластической деформации, а также в области контакта задней грани инструмента с заготовкой (3). При измерении этого сигнала принципиальное значение имеют волновые

свойства канала, который связывает зону резания с точкой измерения АЭ. Необходимо учитывать не только диссипативные свойства канала, но и его геометрию, а также стыки, вносящие нелинейные искажения, и зону нечувствительности, вносимую стыковыми соединениями [50, 51].

Для экспериментального изучения свойств АЭ был использован измерительный резец (рис. 6, б). АЭ оценивалась пьезоэлектрическим преобразователем 2, установленным в контакте с четырехгранной пластинкой 1 из Т15К6 2 и телом резца 5. Две пластины из керамики ЦТС установлены так, что их внешние поверхности имеют электрический контакт с телом инструмента, а центральные пластины изолированы и соединены с коаксиальным кабелем 3, оплётка которого соединена с телом резца. Керамические вкладки 2 поджаты винтом 4 к режущей пластинке. Коаксиальный кабель с помощью аналого-цифрового преобразователя Е 14-440 соединен с ЭВМ для обработки информации. Можно предложить модель источника силовой эмиссии. Для этого на поверхности изнашиваемой задней грани инструмента выделим в область $S_i^{(N,k)}(t)$ (рис. 6, в), в которой формируется сила $f_i^{(N,k)}(t)$. Во времени она является последовательностью стандартных импульсов (рис. 6, з), каждый из них описывает изменение сил на временном отрезке $t \in (t_{i-1}, t_i)$:

$$f_i^{(N,k)}(t) = \begin{cases} f_i^{(N,k)}(t) = k_1^f t, & t \in (t_i, t_i + \Delta T_{i+1}^{(N,k)}), & k_1^f = f_{0,i}^{(N,k)} / \Delta T_{i+1}^{(N,k)}; \\ f_i^{(N,k)}(t) = f_{0,i}^{(N,k)} - k_2^f t, & t \in (t_i + \Delta T_{i+1}^{(N,k)}, t_i + \Delta T_{i+1}^{(N,k)} + \Delta t_{i+1}^{(N,k)}), & k_2^f = f_{0,i}^{(N,k)} / \Delta t_{i+1}^{(N,k)}; \\ f_i^{(N,k)}(t) = 0, & t \in (t_i + \Delta T_{i+1}^{(N,k)} + \Delta t_{i+1}^{(N,k)}, t_{i+1}). \end{cases} \quad (8)$$

Последовательность представляет собой набор стандартных импульсов (система ((8)): $f_i^{(N,k)}(t) = \left\{ f_i^{(N,k)}(t), t \in (0, T_1^{(N,k)}); f_i^{(N,k)}(t), t \in (T_1^{(N,k)}, T_2^{(N,k)}); \dots; f_i^{(N,k)}(t), t \in (T_{s-1}^{(N,k)}, T_s^{(N,k)}) \right\}$. Аналогичную структуру имеют и тангенциальные составляющие элементарных сил $f_i^{(T,k)}(t)$. В дальнейшем ограничимся импульс-

ной последовательностью $f_i^{(N,k)}(t)$, имеющей две стадии. На первой стадии происходит накопление потенциальной энергии (временной отрезок $\Delta T_{i+1}^{(N,k)}$). Здесь наблюдается упругое смещение микроконтактов до величин, при которых имеет место разрыв связей. Это время зависит от скорости резания. На втором этапе происходит выделение энергии (временной отрезок $\Delta t_{i+1}^{(N,k)}$),

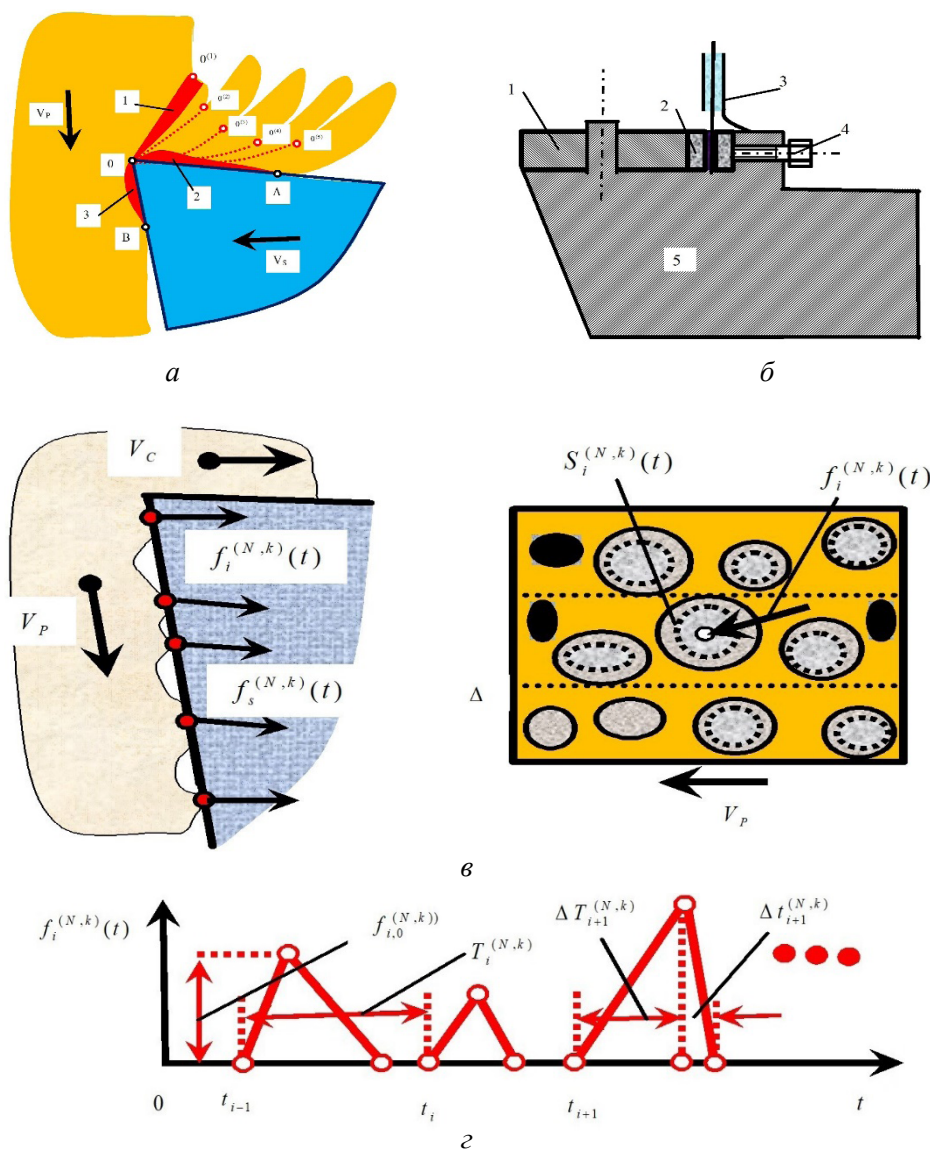


Рис. 6. Схема измерения и формирования сигнала АЭ:

a – модель формирования периодических составляющих сил; *б* – схема измерительного резца; *в*, *г* – модель формирования случайной импульсной последовательности

Fig. 6. Scheme of AE signal measurement and formation:

a – model of periodic force components formation; *b* – cutter measuring scheme; *v*, *z* – model of random pulse sequence formation

которое сопровождается импульсом необратимых преобразований энергии, формирующим производство тепла, но также влияющим на другие эффекты физических взаимодействий. Выделение энергии образует и импульс упругой волны. Стандартная последовательность характеризуется следующими параметрами: расстоянием между импульсами $T_i^{(N,k)}$, временем нарастания $\Delta T_i^{(N,k)}$, временем спада $\Delta t_i^{(N,k)}$ и высотой $f_{i,0}^{(N,k)}$ (рис. 6, *г*). Это может быть импульс, обусловленный упругопластическим

взаимодействием или разрушением адгезионных и других связей.

Вначале протестируем отображения последовательности в частотной области (рис. 7). На иллюстрации верхние две кривые отображают последовательность во времени, но в разном масштабе. Нижние две диаграммы соответствуют спектральному их представлению, они также приведены в двух масштабах. Отметим следующие наиболее важные свойства отображений.

1. Если расстояние между импульсами постоянно $T_i^{(N,k)} = 0,02 \text{ с} = \text{const}$, то в спектре мы

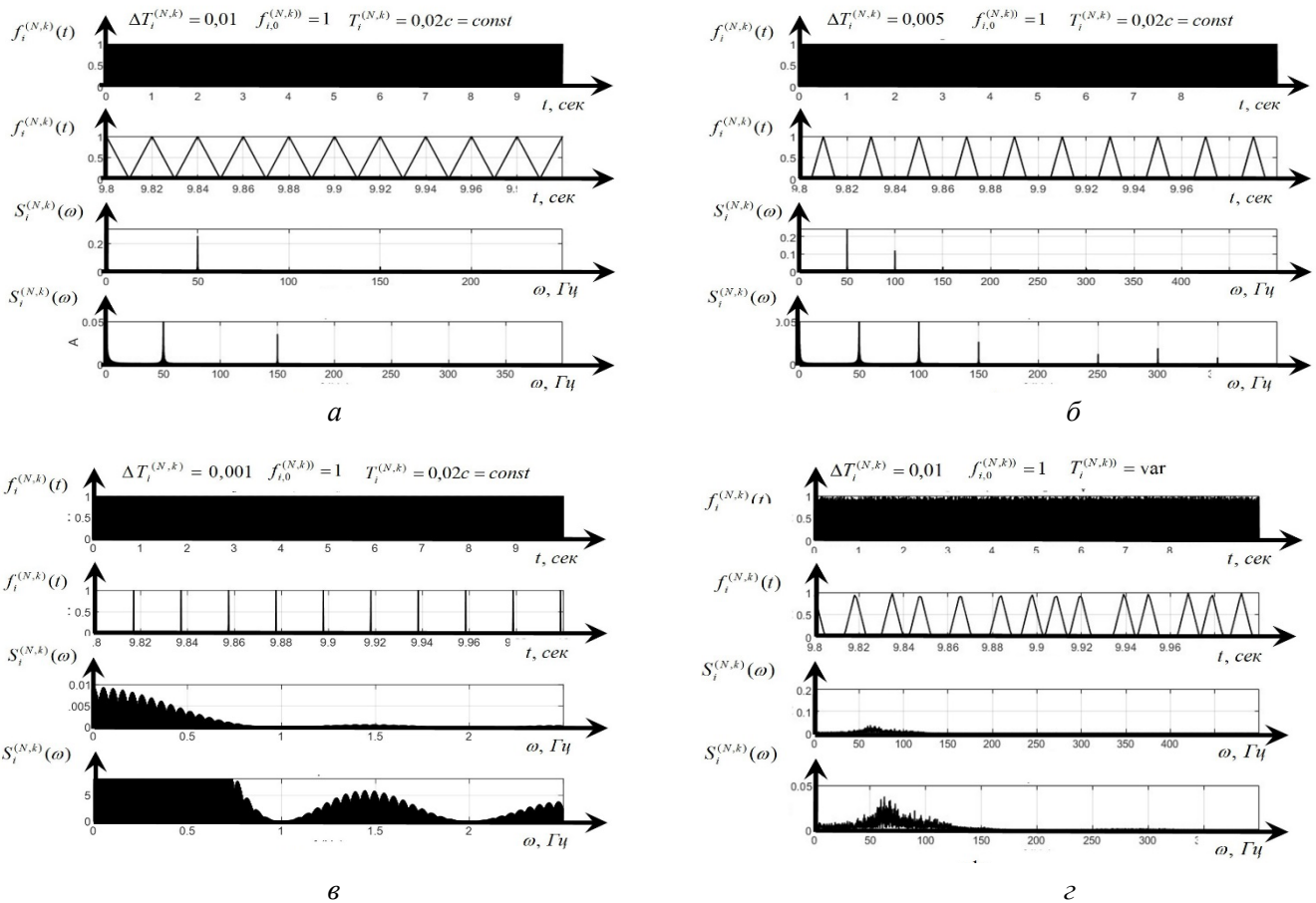


Рис. 7. Примеры изменения спектров стандартной импульсной последовательности

Fig. 7. Examples of spectral changes of a standard pulse sequence

имеем дискретный набор частот, зависящий от длительности импульса по отношению к расстоянию $\Delta T_i^{(N,k)}$. Если ширина импульсов равна расстоянию между ними, то в частотной области мы фактически имеем частотные всплески, соответствующие разложению в ряд Фурье. Мы имеем постоянную составляющую, первую и третью гармоники (рис. 7, а). При уменьшении $\Delta T_i^{(N,k)}$ образуются дополнительные частоты (рис. 7, б), которые затем преобразуются в непрерывный спектр (рис. 7, в). При $\Delta T_i^{(N,k)} \rightarrow 0$ спектр приближается к «белому» шуму.

Если ввести неопределенность в $\Delta T_i^{(N,k)}$, то дискретный спектр на рис. 7, б преобразуется в непрерывный (рис. 7, г). При этом наблюдается уширение спектральных линий. На частоте максимума спектра отображается математическое ожидание расстояния между импульсами, а в уширении спектральной линии – разброс скажности между импульсами.

Изменение соотношения между стадиями нарастания и спада импульсов также отображается в изменениях спектра, но моделирование показывает, что изменения спектров в этом случае незначительны. Что касается неопределенности амплитуд, то в спектре в этом случае усиливается его составляющая, находящаяся между основными всплесками. Если узкополосным фильтром выделить сигнал в частотном окне $\Delta\omega$, то увеличению неопределенности амплитуд соответствует увеличение амплитудной модуляции сигнала в окне $\Delta\omega$.

В области контакта задней грани инструмента и заготовки существует множество взаимодействий (рис. 6, в), которое образует сигнал эмиссии:

$$F^{(N)}(t) = \sum_{i=1}^{i=n} \sum_{k=1}^{k=m} f_i^{(N,k)}(t), \quad (9)$$

где k и i – соответственно число строк и контактов в строке на поверхности взаимодействий. Для определения спектральных свойств сово-

купности случайных последовательностей необходимо дополнительно сформулировать гипотезы о влиянии вероятности их распределения на поверхности контакта.

Вычисления показывают, что увеличение неопределенности в сигнале эмиссии во времени приводит к уширению спектральной линии эмиссионного сигнала, а регулярные смещения в сигналах в пространстве вызывают уменьшение интервалов между импульсами. Поэтому спектр эмиссионного сигнала по мере увеличения износа размывается и смещается в высокочастотную область. Важно отметить, что каждый единичный импульс имеет стадии нарастания и спада, зависящие в основном не от времени, а от пути относительных перемещений, поэтому увеличение скорости резания уменьшает параметры $T_i^{(N,k)}$ и $\Delta T_i^{(N,k)}$. В результате спектр становится зависящим от скорости резания. Если анализировать частотную область $\Delta\omega_0 \in (\omega_{0,1}, \omega_{0,2})$, то мы замечаем, что основные изменения частотных спектров по мере увеличения износа соответствуют отмеченным особенностям. Причем верхняя частота

$\omega_{0,2}$ в этой области определяется по правилу

$$\omega_{0,2} = \left(\frac{h_0}{V_P} \right)^{-1}. \text{ Здесь } h_0 \text{ – высота контакта зад-}$$

ней грани с заготовкой на начальной стадии износа $w = 0$, она зависит от упругого восстановления материала. Нижняя частота $\omega_{0,1}$

$$\text{определяется как } \omega_{0,1} = \left(\frac{h_0 + w}{V_P} \right)^{-1}.$$

Этот диапазон необходимо экспериментально откорректировать. Приведем пример изменения спектров, которые получены из последовательностей, измеренных резцом на рис. 6, б в точении стали 10ГН2МФА на следующем режиме: подача $S_P^{(0)} = 0,1$ мм, глубина $t_P^{(0)} = 1,5$ мм и скорость резания $V_P^{(0)} = 1,2$ м/с (рис. 8).

Спектры представляют уже сигнал АЭ, измеренный после преобразования сил в акустические волны. Пусть определена вибрационная последовательность $X(t)$ в окне $\Delta\omega_0 \in (\omega_{0,1}, \omega_{0,2})$. Введем следующие информационные признаки сигнала АЭ:

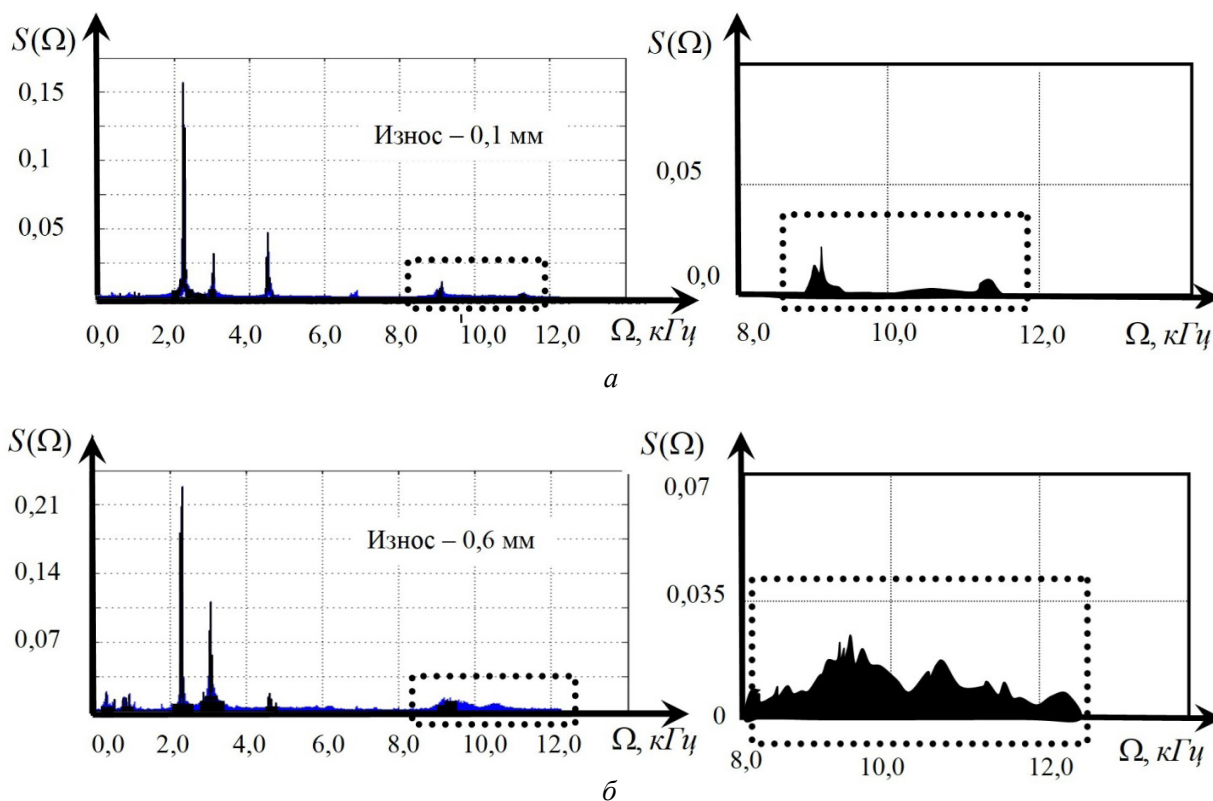


Рис. 8. Пример изменения спектра АЭ в зависимости от износа

Fig. 8. Example of AE spectrum changes depending on wear

$$\Pi_4(w) = \left\{ \int_{\omega_{0,1}}^{\omega_{0,2}} S(\omega, w) d\omega - \int_{\omega_{0,1}}^{\omega_{0,2}} S(\omega, 0) d\omega \right\} \times \left\{ \int_{\omega_{0,1}}^{\omega_{0,2}} S(\omega, 0) d\omega \right\}^{-1}, \quad (10)$$

где $S(\omega, w)$ – спектр сигнала АЭ изношенного инструмента; $S(\omega, 0)$ – спектр сигнала АЭ на начальной стадии износа;

$$\Pi_5(w) = \left\{ \int_{\omega_{0,1}}^{\omega_{0,c}} S(\omega, w) d\omega - \int_{\omega_{0,1}}^{\omega_{0,c}} S(\omega, 0) d\omega \right\} \times \left\{ \int_{\omega_{0,1}}^{\omega_{0,2}} S(\omega, 0) d\omega \right\}^{-1}, \quad (11)$$

где $\omega_{0,c}$ – средняя частота спектра в окне $\Delta\omega_0 \in (\omega_{0,1}, \omega_{0,2})$.

Поскольку вычисление частоты спектра в окне $\Delta\omega_0$ представляет некоторые сложности, то удобно выбрать частоту $\omega_{0,c} = 0,5(\omega_{0,1} + \omega_{0,2})$ и при $w = 0$ обеспечить условие $\int_{\omega_{0,1}}^{\omega_{0,c}} S(\omega, w) d\omega = \int_{\omega_{0,1}}^{\omega_{0,c}} S(\omega, 0) d\omega$. Наконец, как

было отмечено, для оценивания нерегулярности амплитуды импульсной последовательности можно рассматривать сигнал амплитудной модуляции избранного высокочастотного сигнала $X(t)$. Тогда высокой информативностью обладает уровень модуляции $x(t)$, определяемый после детектирования сигнала $X(t)$ и оценивания его дисперсии по алгоритмам скользящего сред-

него: $\sigma(t) = \frac{1}{\Delta T} \int_{t-\Delta T}^t x^2(\xi) d\xi$. Получим

$$\Pi_6(w) = \{\sigma_w(t) - \sigma\} \{\sigma\}^{-1}. \quad (12)$$

В зависимости от аппаратной реализации и доступных к измерению вибрационных последовательностей можно использовать все отмеченные выше информационные признаки $\Pi = \{\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_6\}^T \in \mathfrak{R}_{\Pi}^{(6)}$.

Все сформированные параметры ПИП $\Pi = \{\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_6\}^T \in \mathfrak{R}_{\Pi}^{(6)}$ обладают следующими свойствами.

1. Они являются безразмерными, и их значения, как правило, положительны и монотонно изменяются по мере развития износа.

2. Износу $w = 0$ во всех случаях соответствует условие $\Pi_i(w) = 0$ при $w = 0$.

3. Из разнообразия информационных признаков выбраны такие, которые обладают высокой чувствительностью к изменению износа. Область их применения зависит от следующих факторов.

Информационный признак Π_1 можно использовать в том случае, если по мере развития износа равновесие динамической системы резания является асимптотически устойчивым. Достаточно указать на то, что внутренний коэффициент усиления в динамической системе зависит не только от ρ , но и от глубины резания. Он в меньшей степени изменяется и при вариациях скорости резания и подачи. Ранее показано, что эволюция свойств системы резания может обладать высокой чувствительностью к малым вариациям технологических параметров и возмущений. Можно сделать вывод, что перераспределение амплитуд обладает высокой чувствительностью к развитию износа. Однако это справедливо в диапазоне устойчивого равновесия, а также в случае малой чувствительности эволюции системы к вариациям начальных параметров системы и возмущений. Для использования информационного признака Π_1 с целью диагностирования износа на станках с ЧПУ необходимо согласовать диагностирование с программой ЧПУ. Информационные оценки Π_2 и Π_3 являются более универсальными, но менее чувствительными к вариациям динамических свойств системы и к вариациям режимов. При построении систем диагностики при точении конструкционных сталей на постоянных режимах в случае устойчивого равновесия упругих деформаций удастся обеспечить разделение информации об износе на 4–5 классов износа [27].

Однако все три признака зависят от точности конкретного станка и его состояния. Ранее выполненные исследования функции когерентно-



сти между силовыми возмущениями и деформациями показали, что она по мере увеличения частоты возрастает [3]. При выборе пространства информационных признаков более помехозащищенными являются признаки P_4 , P_5 и P_6 . В данном случае основные возмущения связаны с вариациями припуска, биениями шпиндельной группы и кинематическими возмущениями от приводов подач. Все возмущения, идущие от станка, находятся в низкочастотном диапазоне. Одновременно при установке датчика АЭ необходимо учитывать волновые свойства канала, связывающего формируемую в зоне резания силовую эмиссию и измеряемые колебания (колебательные деформации, смещения, ускорения и др.). Здесь существует общее правило: чем выше частота, тем ближе к зоне резания должен находиться измерительный преобразователь. По нашему мнению, для измерения АЭ наиболее перспективными являются специальные резцы со встроенными измерительными преобразователями.

Представленная методика определения диагностических признаков развития износа инструмента и повышения вибрационной активности исполнительных элементов обладает прикладной значимостью для создания и развития интеллектуальных алгоритмов систем мониторинга. Изменения в оценках диагностических признаков развития износа являются коррекционными параметрами, относительно которых может выстраиваться алгоритм адаптивного управления в блоке ЧПУ, способного продлить ресурс инструмента, но не ограничиваются только этим. В рамках представленной методики исследовательский интерес вызывают задачи определения диагностических признаков деградации свойств геометрической топологии поверхности детали и эксплуатационных характеристик станка, и это может стать предметом изучения будущих исследований. Определенные и собранные информационные признаки в сигналах ВАЭ позволяют создать базы данных Test Data и Training Data для обучения оценки динамики процесса резания в моделях машинного обучения систем диагностики, что является еще одним шагом к цифровой трансформации станкостроительной отрасли.

Заключение

Разработанная методика, математическое моделирование, а также цифровые и натурные эксперименты позволили сформировать рациональное информационное пространство диагностирования износа, в котором на основе известных методов распознавания можно построить решающие правила разделения информации по признаку принадлежности к величине износа. Для практического применения методики в алгоритмах мониторинга, диагностики и управления процессом резания важно учесть следующие моменты.

В основу построения систем диагностики износа инструмента на основе наблюдения за измеримыми вибрационными последовательностями можно положить как зависимость вибраций от изменения параметров формируемой процессом резания динамической связи, так и изменения свойств силовой эмиссии, представленной в виде случайной импульсной последовательности.

Параметры формируемой процессом резания динамической связи зависят не только от износа, но и от технологических режимов и возмущений, идущих от самого станка. Поэтому использование информационных параметров, в основу построения которых положены изменения спектра колебаний в низкочастотной области, актуально при обработке деталей на неизменных режимах на оборудовании, имеющем малые вариации припуска, биения шпиндельной группы и кинематические возмущения (например, при обработке на автоматических линиях). При использовании указанных параметров на станках с ЧПУ требуется согласование программы диагностирования с программой ЧПУ. В противном случае адекватность отображения износа в характеристиках спектра существенно снижается.

Силовая эмиссия, рассматриваемая в высокочастотной области, во-первых, вызывает изменения интенсивности силовой эмиссии, во-вторых, смещает максимум интенсивности в частотной области. Наконец, развитие износа приводит к формированию неопределенности всех параметров, моделирующих силовую эмиссию как импульсный случайный процесс, что также является информационным признаком для систем диагностики износа.

Список литературы

1. *Budak E.* Machining process improvement through process twins // Proceedings of 3rd International Conference on the Industry 4.0 Model for Advanced Manufacturing: AMP 2018. – Springer International Publishing, 2018. – P. 164–179. – DOI: 10.1007/978-3-319-89563-5_13.
2. *Zakovorotny V., Gvindjiliya V.* Process control synergetics for metal-cutting machines // Journal of Vibroengineering. – 2022. – Vol. 24 (1). – P. 177–189. – DOI: 10.21595/jve.2021.22087.
3. *Zakovorotnyi V.L., Gvindjiliya V.E.* Influence of speeds of forming movements on the properties of geometric topology of the part in longitudinal turning // Journal of Manufacturing Processes. – 2024. – Vol. 112. – P. 202–213. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2024.01.037.
4. *Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е.* Изучение отображения вибрационных возмущений в геометрии формируемой резанием поверхности при точении // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2024. – Т. 26, № 2. – С. 107–126. – DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.2-107-126.
5. *Остафьев В.А., Антонюк В.С., Тымчик Г.С.* Диагностика процесса металлообработки. – Киев: Тэхника, 1991. – 152 с. – ISBN 5-335-00209-3.
6. *Козочкин М.П.* Многопараметрическая диагностика технологических систем для обработки материалов резанием // Вестник МГТУ «Станкин». – 2014. – № 1 (28). – С. 13–19.
7. *Грубый С.В.* Оптимизация процесса механической обработки и управления режимными параметрами. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 149 с. – ISBN 978-5-7038-3935-5.
8. Нейронно-сетевое моделирование процесса изнашивания твердосплавного инструмента / Ю.Г. Кабалдин, А.М. Кузьмишина, Д.А. Шатагин, М.С. Аносов // Автоматизация. Современные технологии. – 2021. – Т. 75, № 9. – С. 398–402. – DOI: 10.36652/0869-4931-2021-75-9-398-402.
9. Разработка цифрового двойника станка с ЧПУ на основе методов машинного обучения / Ю.Г. Кабалдин, Д.А. Шатагин, М.С. Аносов, А.М. Кузьмишина // Вестник Донского государственного технического университета. – 2019. – № 19 (1). – С. 45–55. – DOI: 10.23947/1992-5980-2019-19-1-45-55.
10. *Кабалдин Ю.Г., Шатагин Д.А., Кузьмишина А.М.* Разработка цифрового двойника режущего инструмента для механообрабатывающего производства // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2019. – № 4. – С. 11–17. – DOI: 10.18698/0536-1044-2019-4-11-17.
11. *Пантюхин О.В., Васин С.А.* Цифровой двойник технологического процесса изготовления изделий специального назначения // Станкоинструмент. – 2021. – № 1 (22). – С. 56–59. – DOI: 10.22184/2499-9407.2021.22.1.56.58.
12. *Erkorkmaz K., Altintas Y., Yeung C.-H.* Virtual computer numerical control system // CIRP Annals. – 2006. – Vol. 55 (1). – P. 399–402. – DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60444-2.
13. *Kilic Z.M., Altintas Y.* Generalized mechanics and dynamics of metal cutting operations for unified simulations // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2016. – Vol. 104. – P. 1–13. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2016.01.006.
14. Development of machining strategies for aerospace components, using virtual machining tools / L. Estman, D. Merdol, K.-G. Brask, V. Kalhori, Y. Altintas // New Production Technologies in Aerospace Industry. – Cham: Springer, 2014. – P. 63–68. – (Lecture Notes in Production Engineering). – DOI: 10.1007/978-3-319-01964-2_9.
15. *Козочкин М.П., Сабиров Ф.С., Селезнев А.Е.* Виброакустический мониторинг лезвийной обработки заготовок из закаленной стали // Вестник МГТУ «Станкин». – 2018. – № 1 (44). – С. 23–30.
16. *Барзов А.А., Горелов В.А., Игошкин Б.А.* Акустоэлектрическая диагностика процесса резания полимерных композиционных материалов // Авиационная промышленность. – 1986. – № 12. – С. 36.
17. Virtual process systems for part machining operations / Y. Altintas, P. Kersting, D. Biermann, E. Budak, B. Denkena // CIRP Annals. – 2014. – Vol. 63 (2). – P. 585–605. – DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.007.
18. Virtual machine tool / Y. Altintas, C. Brecher, M. Weck, S. Witt // CIRP Annals. – 2005. – Vol. 54 (2). – P. 115–138. – DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60022-5.
19. *Soori M., Arezoo B., Habibi M.* Virtual machining considering dimensional, geometrical and tool deflection errors in three-axis CNC milling machines // Journal of Manufacturing Systems. – 2014. – Vol. 33 (4). – P. 498–507. – DOI: 10.1016/j.jmsy.2014.04.007.
20. A novel virtual metrology scheme for predicting machining precision of machine tools / H. Tieng, H.C. Yang, M.H. Hung, F.T. Cheng // IEEE International Conference on Robotics and Automation. – IEEE, 2013. – P. 264–269. – DOI: 10.1109/ICRA.2013.6630586.
21. *Astakhov V.P.* Geometry of single-point turning tools and drills: Fundamentals and practical applications. – London: Springer, 2010. – 566 p. – DOI: 10.1007/978-1-84996-053-3.
22. *Konrad H., Isermann R., Oette H.U.* Supervision of tool wear and surface quality during end milling operations // IFAC Proceedings Volumes. – 1994. – Vol. 27 (4). – P. 507–513. – DOI: 10.1016/S1474-6670(17)46074-5.
23. *Заковоротный В.Л., Бордачев Е.В.* Информационное обеспечение системы динамической диа-



гностики износа режущего инструмента на примере токарной обработки // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1995. – № 3. – С. 95–103.

24. Григорьев А.С. Инструментарий системы ЧПУ для диагностики и прогнозирования износа режущего инструмента в реальном времени при токарной обработке // Вестник МГТУ «Станкин». – 2012. – № 1 (18). – С. 39–43.

25. Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е. Эволюция динамической системы резания, обусловленная необратимыми преобразованиями энергии в зоне обработки // СТИН. – 2018. – № 12. – С. 17–25.

26. Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е. Связь самоорганизации динамической системы резания с изнашиванием инструмента // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. – 2020. – Т. 28, № 1. – С. 46–61. – DOI: 10.18500/0869-6632-2020-28-1-46-61.

27. Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е., Кислов К.В. Информационные свойства частотных характеристик динамической системы резания при диагностике износа инструментов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2024. – Т. 26, № 3. – С. 114–134. – DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.3-114-134.

28. A review of sensor system and application in milling process for tool condition monitoring / M. Rizal, J.A. Ghani, M.Z. Nuawi, C.H. Haron // Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. – 2014. – Vol. 7 (10). – P. 2083–2097. – DOI: 10.19026/rjaset.7.502.

29. Teti R. Advanced IT methods of signal processing and decision making for zero defect manufacturing in machining // Procedia CIRP. – 2015. – Vol. 28. – P. 3–15. – DOI: 10.1016/j.procir.2015.04.003.

30. Bhuiyan M., Choudhury I., Nukman Y. An innovative approach to monitor the chip formation effect on tool state using acoustic emission in turning // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2012. – Vol. 58. – P. 19–28. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2012.02.001.

31. Rehorn A.G., Jiang J., Orban P.E. State-of-the-art methods and results in tool condition monitoring: a review // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2005. – Vol. 26. – P. 693–710. – DOI: 10.1007/s00170-004-2038-2.

32. Jemielniak K., Arrazola P. Application of AE and cutting force signals in tool condition monitoring in micro-milling // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. – 2008. – Vol. 1 (2). – P. 97–102. – DOI: 10.1016/j.cirpj.2008.09.007.

33. Zakovorotny V.L., Ladnik I.V., Dhande S.G. A method for characterization of machine-tools dynamic parameters for diagnostic purposes // Journal of Materials

Processing Technology. – 1995. – Vol. 53 (3–4). – P. 588–600. – DOI: 10.1016/0924-0136(94)01745-M.

34. Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E. Self-organization and evolution in dynamic friction systems // Journal of Vibroengineering. – 2021. – Vol. 23 (6). – P. 1418–1432. – DOI: 10.21595/jve.2021.22033.

35. Precision manufacturing process monitoring with acoustic emission / D.E. Lee, I. Hwang, C.M.O. Valente, J.F.G. Oliveira, D.A. Dornfeld // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2006. – Vol. 46 (2). – P. 176–188. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.04.001.

36. Tool condition monitoring (TCM) – the status of research and industrial application / G. Byrne, D. Dornfeld, I. Inasaki, G. Ketteler, W. Konig, R. Teti // CIRP Annals. – 1995. – Vol. 44 (2). – P. 541–567. – DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60503-4.

37. Dimla D.E. Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations – a review of methods // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2000. – Vol. 40 (8). – P. 1073–1098. – DOI: 10.1016/S0890-6955(99)00122-4.

38. Choi Y., Narayanaswami R., Chandra A. Tool wear monitoring in ramp cuts in end milling using the wavelet transform // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2004. – Vol. 23 (5–6). – P. 419–428. – DOI: 10.1007/s00170-003-1898-1.

39. Dolinšek S., Kopac J. Acoustic emission signals for tool wear identification // Wear. – 1999. – Vol. 225–229 (1). – P. 295–303. – DOI: 10.1016/S0043-1648(98)00363-9.

40. Chiou R.Y., Liang S.Y. Analysis of acoustic emission in chatter vibration with tool wear effect in turning // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2000. – Vol. 40 (7). – P. 927–941. – DOI: 10.1016/S0890-6955(99)00093-0.

41. Application of acoustic emission sensor to investigate the frequency of tool wear and plastic deformation in tool condition monitoring / M.S.H. Bhuiyan, I.A. Choudhury, M. Dahari, Y. Nukman, S.Z. Dawal // Measurement. – 2016. – Vol. 92. – P. 208–217. – DOI: 10.1016/j.measurement.2016.06.006.

42. Siddhpura A., Paurobally R. A review of flank wear prediction methods for tool condition monitoring in a turning process // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2013. – Vol. 65. – P. 371–393. – DOI: 10.1007/s00170-012-4177-1.

43. Tool wear monitoring using naive Bayes classifiers / J. Karandikar, T. McLeay, S. Turner, T. Schmitz // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2014. – Vol. 77. – P. 1613–1626. – DOI: 10.1007/s00170-014-6560-6.

44. Kene A.P., Choudhury S.K. Analytical modeling of tool health monitoring system using multiple sensor data fusion approach in hard machining // Measurement. –

2019. – Vol. 145. – P. 118–129. – DOI: 10.1016/j.measurement.2019.05.062.

45. Tool condition monitoring techniques in milling process – a review / T. Mohanraj, S. Shankar, R. Rajasekar, N. Sakthivel, A. Pramanik // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2019. – Vol. 9 (1). – P. 1032–1042. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2019.10.031.

46. Kalvoda T., Hwang Y.R. A cutter tool monitoring in machining process using Hilbert–Huang transform // *International Journal of Machine Tool and Manufacture*. – 2010. – Vol. 50 (5). – P. 495–501. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2010.01.006.

47. Заковоротный В.Л., Флек М.Б. Динамика процесса резания. Синергетический подход. – Ростов н/Д.: Терра, 2005. – 880 с. – ISBN 5-98254-055-2.

48. Артоболевский И.И., Бобровницкий Ю.И., Генкин М.Д. Введение в акустическую динамику машин. – М.: Наука, 1979. – 296 с.

49. Зорев Н.Н., Грановский Г.И., Ларин М.Н. Развитие науки о резании металлов. – М.: Машиностроение, 1967. – 416 с.

50. Влияние динамических характеристик процесса резания на шероховатость поверхности детали при токарной обработке / В.Е. Гвинджилия, Е.В. Фоминов, Д.В. Моисеев, Е.И. Гамалева // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2024. – Т. 26, № 2. – С. 143–157. – DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.2-143-157.

51. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания. – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2025 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





Information properties of vibroacoustic emission in diagnostic systems for cutting tool wear

Vilor Zakovorotny^a, Valery Gvindjiliya^{b, *}, Kirill Kislov^c

Don State Technical University, 1 Gagarin square, Rostov-on-Don, 344000, Russian Federation

^a  <https://orcid.org/0000-0003-2187-9897>,  vzakovorotny@dstu.edu.ru; ^b  <https://orcid.org/0000-0003-1066-4604>,  vgvindjiliya@donstu.ru;

^c  <https://orcid.org/0000-0002-5770-2519>,  kislovk@bk.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 19 April 2025

Revised: 23 April 2025

Accepted: 05 June 2025

Available online: 15 September 2025

Keywords:

Cutting tool condition diagnostics

Vibrations

Information models of dynamic monitoring

ABSTRACT

Introduction. This paper is devoted to the development of a methodology for diagnosing cutting tool wear based on the analysis of vibroacoustic emission signals. Two tasks are addressed. Firstly, the information feature space related to wear is constructed. Secondly, within this space, decision rules are defined that allow division into separate clusters according to wear levels. Since the construction of the information feature space (*IFS*) methods is of primary importance in these procedures, the **purpose of this work** is to determine the regularities of changes in the frequency characteristics of the dynamic cutting system caused by wear development and to construct, on this basis, a rational information space for diagnosing tool wear. **Method and methodology.** The study is based on mathematical modeling results of a perturbed dynamic cutting system to determine the information feature space representing tool wear. Methods for determining the parameters of information signal parameters (*ISPs*) are proposed, which provide high sensitivity to wear changes. All *ISP* parameters should be dimensionless and zeroed at zero wear. They must satisfy additional requirements, including noise immunity conditions. **Results and discussion.** The paper presents results of constructing *ISP* parameters for vibroacoustic emission analysis in two frequency ranges. In the low-frequency range, limited by the first natural frequencies of interacting subsystems (up to 1.0–1.5 kHz), vibration response parameters (*VRP*) are determined based on vibration sequences obtained analytically under power perturbations modeled as “white” noise. In the high-frequency range (above 2.0 kHz), information models based on random pulse sequences are proposed. It is shown that the applicability of a particular information feature depends on the conditions. Thus, the developed methodology, mathematical simulation, and digital and field experiments enabled the formation of a rational information space for wear diagnostics, in which known recognition methods can be used to construct decision rules for classifying information according to wear levels.

For citation: Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E., Kislov K.V. Information properties of vibroacoustic emission in diagnostic systems for cutting tool wear. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2025, vol. 27, no. 3, pp. 50–70. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.3-50-70. (In Russian).

References

1. Budak E. Machining process improvement through process twins. *Proceedings of the 3rd International Conference on the Industry 4.0 Model for Advanced Manufacturing: AMP 2018*. Springer International Publishing, 2018, pp. 164–179. DOI: 10.1007/978-3-319-89563-5_13.
2. Zakovorotny V., Gvindjiliya V. Process control synergetics for metal-cutting machines. *Journal of Vibroengineering*, 2022, vol. 24 (1), pp. 177–189. DOI: 10.21595/jve.2021.22087.
3. Zakovorotnyi V.L., Gvindjiliya V.E. Influence of speeds of forming movements on the properties of geometric topology of the part in longitudinal turning. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, vol. 112, pp. 202–213. DOI: 10.1016/j.jmapro.2024.01.037.

* Corresponding author

Gvindjiliya Valery E., Ph.D. (Engineering), Senior Lecturer
 Don State Technical University,
 1 Gagarin square,
 344000, Rostov-on-Don, Russian Federation
Tel.: +7 918 583-23-33, **e-mail:** vgvindjiliya@donstu.ru

4. Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E. The study of vibration disturbance mapping in the geometry of the surface formed by turning. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 2, pp. 107–126. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.2-107-126.
5. Ostaf'ev V.A., Antonyuk V.S., Tymchik G.S. *Diagnostika protsessa metalloobrabotki* [Diagnostics of the metalworking process]. Kiev, Tekhnika Publ., 1991. 152 p. ISBN 5-335-00209-3.
6. Kozochkin M.P. Mnogoparametricheskaya diagnostika tekhnologicheskikh sistem dlya obrabotki materialov rezaniem [Multivariate diagnostics of technological systems for processing materials by cutting]. *Vestnik MGTU «Stankin» = Vestnik MSUT «Stankin»*, 2014, no. 1 (28), pp. 13–19.
7. Grubyi S.V. *Optimizatsiya protsessa mekhanicheskoi obrabotki i upravleniya rezhimnymi parametrami* [Optimization of the process of mechanical processing and control of operating parameters]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2014. 149 p. ISBN 978-5-7038-3935-5.
8. Kabaldin Yu.G., Kuzmishina A.M., Shatagin D.A., Anosov M.S. Neironnosetevoe modelirovanie protsessa iznashivaniya tverdosplavnogo instrumenta [Neural network modeling of the wear process of a carbide cutting tool]. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii = Automation. Modern Technologies*, 2021, vol. 75, no. 9, pp. 398–402. DOI: 10.36652/0869-4931-2021-75-9-398-402.
9. Kabaldin Yu.G., Shatagin D.A., Anosov M.S., Kuzmishina A.M. Razrabotka tsifrovogo dvoynika stanka s ChPU na osnove metodov mashinnogo obucheniya [Development of digital twin of CNC unit based on machine learning methods]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Don State Technical University*, 2019, no. 19 (1), pp. 45–55. DOI: 10.23947/1992-5980-2019-19-1-45-55.
10. Kabaldin Yu.G., Shatagin D.A., Kuzmishina A.M. Razrabotka tsifrovogo dvoynika rezhushchego instrumenta dlya mekhanooobratyvyayushchego 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, pp. 11–17. DOI: 10.18698/0536-1044-2019-4-11-17.
11. Pantyukhin O.V., Vasin S.A. Tsifrovoy dvoynik tekhnologicheskogo protsessa izgotovleniya izdelii spetsial'nogo naznacheniya [Digital double of the technological process of manufacturing special-purpose products]. *Stankoinstrument*, 2021, no. 1 (22), pp. 56–59. DOI: 10.22184/2499-9407.2021.22.1.56.58. (In Russian).
12. Erkorkmaz K., Altintas Y., Yeung C.-H. Virtual computer numerical control system. *CIRP Annals*, 2006, vol. 55 (1), pp. 399–402. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60444-2.
13. Kilic Z.M., Altintas Y. Generalized mechanics and dynamics of metal cutting operations for unified simulations. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2016, vol. 104, pp. 1–13. DOI: 10.1016/j.ijmactools.2016.01.006.
14. Estman L., Merdol D., Brask K.-G., Kalhori V., Altintas Y. Development of machining strategies for aerospace components, using virtual machining tools. *New Production Technologies in Aerospace Industry*. Cham, Springer, 2014, pp. 63–68. DOI: 10.1007/978-3-319-01964-2_9.
15. Kozochkin M.P., Sabirov F.S., Seleznev A.E. Vibroakusticheskii monitoring lezviinoi obrabotki zagotovok iz zakalennoi stali [Vibroacoustic monitoring of cutting edge machining of hardened steel]. *Vestnik MGTU «Stankin» = Vestnik MSUT «Stankin»*, 2018, no. 1 (44), pp. 23–30.
16. Barzov A.A., Gorelov V.A., Igonkin B.A. Akustoelektricheskaya diagnostika protsessa rezaniya polimernykh kompozitsionnykh materialov [Acoustoelectric diagnostics of the cutting process of polymer composite materials]. *Aviatsionnaya promyshlennost' = Aviation Industry*, 1986, no. 12, p. 36.
17. Altintas Y., Kersting P., Biermann D., Budak E., Denkena B. Virtual process systems for part machining operations. *CIRP Annals*, 2014, vol. 63 (2), pp. 585–605. DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.007.
18. Altintas Y., Brecher C., Weck M., Witt S. Virtual machine tool. *CIRP Annals*, 2005, vol. 54 (2), pp. 115–138. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60022-5.
19. Soori M., Arezoo B., Habibi M. Virtual machining considering dimensional, geometrical and tool deflection errors in three-axis CNC milling machines. *Journal of Manufacturing Systems*, 2014, vol. 33 (4), pp. 498–507. DOI: 10.1016/j.jmsy.2014.04.007.
20. Tieng H., Yang H.C., Hung M.H., Cheng F.T. A novel virtual metrology scheme for predicting machining precision of machine tools. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 2013, pp. 264–269. DOI: 10.1109/ICRA.2013.6630586.
21. Astakhov V.P. *Geometry of single-point turning tools and drills: Fundamentals and practical applications*. London, Springer, 2010. 566 p. DOI: 10.1007/978-1-84996-053-3.
22. Konrad H., Isermann R., Oette H.U. Supervision of tool wear and surface quality during end milling operations. *IFAC Proceedings Volumes*, 1994, vol. 27 (4), pp. 507–513. DOI: 10.1016/S1474-6670(17)46074-5.



23. Zakovorotny V.L., Bordachev E.V. Informatsionnoe obespechenie sistemy dinamicheskoi diagnostiki iznosa rezhushchego instrumenta na primere tokarnoi obrabotki [Information support for the system of dynamic diagnostics of cutting tool wear using the example of turning]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin = Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 1995, no. 3, pp. 95–103.

24. Grigoriev A.S. Instrumentarii sistemy ChPU dlya diagnostiki i prognozirovaniya iznosa rezhushchego instrumenta v real'nom vremeni pri tokarnoi obrabotke [CNC tool for diagnostic and prediction of cutting tool wear in real time for turning processing]. *Vestnik MGTU «Stankin» = Vestnik MSUT “Stankin”*, 2012, no. 1 (18), pp. 39–43.

25. Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E. Evolyutsiya dinamicheskoi sistemy rezaniya, obuslovlennaya neobratimymi preobrazovaniyami energii v zone obrabotki [Evolution of the dynamic cutting system caused by irreversible energy transformations in the processing zone]. *STIN = Russian Engineering Research*, 2018, no. 12, pp. 17–25. (In Russian).

26. Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E. Svyaz' samoorganizatsii dinamicheskoi sistemy rezaniya s iznashivaniem instrumenta [Link between the self-organization of dynamic cutting system and tool wear]. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya nelineinaya dinamika = Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*, 2020, vol. 28, no. 1, pp. 46–61. DOI: 10.18500/0869-6632-2020-28-1-46-61.

27. Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E., Kislov K.V. Information properties of frequency characteristics of dynamic cutting systems in the diagnosis of tool wear. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 3, pp. 114–134. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.3-114-134.

28. Rizal M., Ghani J.A., Nuawi M.Z., Haron C.H. A review of sensor system and application in milling process for tool condition monitoring. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 2014, vol. 7 (10), pp. 2083–2097. DOI: 10.19026/rjaset.7.502.

29. Teti R. Advanced IT methods of signal processing and decision making for zero defect manufacturing in machining. *Procedia CIRP*, 2015, vol. 28, pp. 3–15. DOI: 10.1016/j.procir.2015.04.003.

30. Bhuiyan M., Choudhury I., Nukman Y. An innovative approach to monitor the chip formation effect on tool state using acoustic emission in turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2012, vol. 58, pp. 19–28. DOI: 10.1016/j.ijmactools.2012.02.001.

31. Rehorn A.G., Jiang J., Orban P.E. State-of-the-art methods and results in tool condition monitoring: a review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2005, vol. 26, pp. 693–710. DOI: 10.1007/s00170-004-2038-2.

32. Jemielniak K., Arrazola P. Application of AE and cutting force signals in tool condition monitoring in micro-milling. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2008, vol. 1 (2), pp. 97–102. DOI: 10.1016/j.cirpj.2008.09.007.

33. Zakovorotny V.L., Ladnik I.V., Dhande S.G. A method for characterization of machine-tools dynamic parameters for diagnostic purposes. *Journal of Materials Processing Technology*, 1995, vol. 53 (3–4), pp. 588–600. DOI: 10.1016/0924-0136(94)01745-M.

34. Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E. Self-organization and evolution in dynamic friction systems. *Journal of Vibroengineering*, 2021, vol. 23 (6), pp. 1418–1432. DOI: 10.21595/jve.2021.22033.

35. Lee D.E., Hwang I., Valente C.M.O., Oliveira J.F.G., Dornfeld D.A. Precision manufacturing process monitoring with acoustic emission. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2006, vol. 46 (2), pp. 176–188. DOI: 10.1016/j.ijmactools.2005.04.001.

36. Byrne G., Dornfeld D., Inasaki I., Ketteler G., Konig W., Teti R. Tool condition monitoring (TCM) – the status of research and industrial application. *CIRP Annals*, 1995, vol. 44 (2), pp. 541–567. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60503-4.

37. Dimla D.E. Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations – a review of methods. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2000, vol. 40 (8), pp. 1073–1098. DOI: 10.1016/S0890-6955(99)00122-4.

38. Choi Y., Narayanaswami R., Chandra A. Tool wear monitoring in ramp cuts in end milling using the wavelet transform. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2004, vol. 23 (5–6), pp. 419–428. DOI: 10.1007/s00170-003-1898-1.

39. Dolinšek S., Kopac J. Acoustic emission signals for tool wear identification. *Wear*, 1999, vol. 225–229 (1), pp. 295–303. DOI: 10.1016/S0043-1648(98)00363-9.

40. Chiou R.Y., Liang S.Y. Analysis of acoustic emission in chatter vibration with tool wear effect in turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2000, vol. 40 (7), pp. 927–941. DOI: 10.1016/S0890-6955(99)00093-0.

41. Bhuiyan M.S.H., Choudhury I.A., Dahari M., Nukman Y., Dawal S.Z. Application of acoustic emission sensor to investigate the frequency of tool wear and plastic deformation in tool condition monitoring. *Measurement*, 2016, vol. 92, pp. 208–217. DOI: 10.1016/j.measurement.2016.06.006.
42. Siddhpura A., Paurobally R. A review of flank wear prediction methods for tool condition monitoring in a turning process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, vol. 65, pp. 371–393. DOI: 10.1007/s00170-012-4177-1.
43. Karandikar J., McLeay T., Turner S., Schmitz T. Tool wear monitoring using naive Bayes classifiers. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, vol. 77, pp. 1613–1626. DOI: 10.1007/s00170-014-6560-6.
44. Kene A.P., Choudhury S.K. Analytical modeling of tool health monitoring system using multiple sensor data fusion approach in hard machining. *Measurement*, 2019, vol. 145, pp. 118–129. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.05.062.
45. Mohanraj T., Shankar S., Rajasekar R., Sakthivel N., Pramanik A. Tool condition monitoring techniques in milling process – a review. *Journal of Materials Research and Technology*, 2019, vol. 9 (1), pp. 1032–1042. DOI: 10.1016/j.jmrt.2019.10.031.
46. Kalvoda T., Hwang Y.R. A cutter tool monitoring in machining process using Hilbert–Huang transform. *International Journal of Machine Tool and Manufacture*, 2010, vol. 50 (5), pp. 495–501. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2010.01.006.
47. Zakovorotny V.L., Flek M.B. *Dinamika protsessa rezaniya. Sinergeticheskii podkhod* [The dynamics of the cutting process. Synergistic approach]. Rostov-on-Don, Terra Publ., 2005. 880 p. ISBN 5-98254-055-2.
48. Artobolevskii I.I., Bobrovnikskii Yu.I., Genkin M.D. *Vvedenie v akusticheskuyu dinamiku mashin* [Introduction to the acoustic dynamics of machines]. Moscow, Nauka Publ., 1979. 296 p.
49. Zorev N.N., Granovskii G.I., Larin M.N. *Razvitie nauki o rezanii metallov* [Development of the science of metal cutting]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1967. 416 p.
50. Gvindjiliya V.E., Fominov E.V., Moiseev D.V., Gamaleeva E.I. Influence of dynamic characteristics of the turning process on the workpiece surface roughness. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 2, pp. 143–157. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.2-143-157.
51. Makarov A.D. *Optimizatsiya protsessov rezaniya* [Optimization of cutting processes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 278 p.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2025 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>).