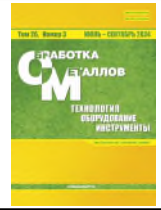




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Информационные свойства частотных характеристик динамической системы резания при диагностике износа инструментов

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: 22 мая 2024
 Рецензирование: 14 июня 2024
 Принята к печати: 22 июня 2024
 Доступно онлайн: 15 сентября 2024

Ключевые слова:

Диагностика состояния режущего инструмента
 Вибрации
 Информационные модели динамического мониторинга

Финансирование

Исследование выполнено при поддержке гранта в рамках конкурса «Наука-2030».

АННОТАЦИЯ

Введение. Одно из направлений повышения эффективности обработки резанием связано с созданием систем диагностики износа инструмента. Разработаны алгоритмы и устройства, оценивающие износ на основе анализа сигнала виброакустической эмиссии. Эти алгоритмы, как правило, не раскрывают природу образования износа и причины изменения по мере его развития. **Предмет.** Статья посвящена анализу причин изменения свойств вибраций с развитием износа инструмента. **Целью данной работы** является изучение изменения частотных характеристик динамической системы резания, вызванных развитием износа, построение на этой основе информационных моделей диагностики и использование их в промышленности. **Метод и методология.** Приводятся результаты математического моделирования возмущенной динамической системы резания, где наблюдаемые вибрационные последовательности являются следствием возмущений, преобразованных динамической системой, параметры которой зависят от износа. Рассматриваются два частотных диапазона. **Результаты и обсуждения.** Первый диапазон включает в себя частоты, лежащие в пределах полосы пропускания подсистемы инструмента, второй – за ее пределами. В первом частотном диапазоне аналитически и экспериментально доказано, что развитие износа приводит к принципиальным изменениям частотных свойств системы резания как преобразователя возмущений в колебания инструмента. Наблюдается смещение собственных частот колебательных контуров, формируемых системой резания, и уменьшение их добротности; по мере развития износа проявляются некоторые выявленные особенности спектров вибраций, в том числе соотношения низкочастотной и высокочастотной частей спектра и др. Во втором частотном диапазоне рассматривается модель силовой эмиссии в виде случайной импульсной последовательности и отображения в ней износа. Приводятся результаты изучения функции когерентности между силами, действующими на инструмент, и колебательными смещениями. Предлагаются информационные модели износа, приводится пример информационной модели износа и результаты его использования в промышленности.

Для цитирования: 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.

Введение

В связи с созданием автоматизированных систем обработки резанием в последние сорок лет ведутся исследования, направленные на создание систем диагностики обработки. Рассматриваются проблемы выбора режимов, при которых наблюдается наибольшая экономическая эффективность [1–3] и минимальная интенсивность

изнашивания инструмента [4, 5]. Рассматриваются алгоритмы, позволяющие оценить текущие характеристики состояния станка и инструмента [6–9], а также качества формируемой резанием поверхности [10, 11]. В системах диагностики используются временные последовательности виброакустической эмиссии (ВАЭ) [7, 12–15], сил [16, 17], температуры резания [7, 18, 19] и др. Используются также элементы машинного зрения, ток якоря серводвигателя [16]. Особое место в создании этих систем занимает ВАЭ. Анализируется сигнал ВАЭ в частотном диапазоне от 10 Гц до 600 кГц, отдельные поддиапазоны которого отображают различные свойства

*Адрес для переписки

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



физико-механических взаимодействий в зоне резания. В частотном диапазоне 10...2000 Гц изучаются изменения макровзаимодействий, а в частотном диапазоне 20...600 кГц отображаются процессы микроконтактных взаимодействий на гранях инструмента и в области первичной пластической деформации. Самостоятельное значение имеет оценивание состояния узлов трения, в том числе в контакте задней грани инструмента и заготовки [20, 21]. Отмечается, что развитие износа вызывает изменение статистических свойств ВАЭ в узле трения. Выполнены исследования, направленные на оценивание состояния узлов станка по сигналу вибраций при резании [22, 23], а также качества изготовления деталей [24, 25].

Особое внимание уделяется оцениванию износа инструмента [26–29]. Рассматриваются измерительные преобразователи для анализа вибраций динамической системы резания (ДСР), а также пьезоэлектрические преобразователи [26, 27], лазерные системы [28, 29], бесконтактные электрические преобразователи, например магнитоэлектрические, индукционные, емкостные и пр. Построение систем диагностики включает в себя методы первичной обработки сигналов и построение информационного пространства, в котором рассматриваются решающие правила распознавания. Как правило, применяются преобразование Фурье [26–28] и вейвлет-преобразования [29] вибрационных последовательностей, авторегрессионный спектральный анализ [2, 30–33], различные функционалы над последовательностями, в том числе алгоритмы обучаемых фильтров и самонастраивающиеся алгоритмы [34–36]. Используется также преобразование Гильберта – Хуанга [43]. Эти преобразования определяют первичную обработку информации. В дальнейшем для получения информационной модели используются алгоритмы нейро-нечеткого моделирования [29] и байесовские классификационные правила [14, 37]. Рассматривается повышение эффективности диагностирования за счет комплексирования сигналов различной физической природы [38–42]. Здесь широкое распространение получили системы совместной обработки информации о силах и ВАЭ [38, 39], а также о температуре и ВАЭ [40, 41].

Во всех случаях при разработке систем виброакустической диагностики рассматрива-

ются две проблемы. Первая проблема связана с построением информационного пространства, вторая – с определением правил, с помощью которых в информационном пространстве можно обеспечить кластеризацию по признаку износа. Поэтому интуитивно или экспериментально анализируется зависимость ДСР от износа. Моделированию ДСР посвящено множество исследований. Она рассматривается как единство взаимодействующих через резание подсистем [44–47]. Взаимодействие моделируется динамической связью, представляющей зависимость сил от координат состояния [45, 46], прежде всего от упругих деформаций [6, 17, 24, 25]. При этом учитывается регенерация следа от деформаций, оставленного на предыдущем обороте заготовки [48–50], запаздывание сил по отношению к деформациям [45, 51, 52] и нелинейная зависимость сил от координат состояния [52–54]. Приведенный перечень далеко не исчерпывает исследования в области ДСР. Отметим, что в этих исследованиях основное внимание уделено проблеме устойчивости, формированию притягивающих множеств деформаций, их бифуркациям и др. Однако при решении проблем диагностирования необходимо рассматривать ДСР как канал для передачи информации о силовых взаимодействиях, в которых проявляются свойства возмущения, зависящего от износа. Причем свойства этого канала также зависят от износа, поскольку изменение износа вызывает изменение параметров формируемой резанием динамической связи. Имеется работа, в которой описано влияние флуктуации параметров на устойчивость ДСР [55]. Однако изменения этих параметров рассматриваются в квазистатике, и не раскрывается их связь с износом. Анализ показывает, что следующий этап изучения методов динамического мониторинга износа связан с решением двух проблем. Во-первых, необходимо проанализировать частотные свойства ДСР как канала, по которому передается информация о силовых взаимодействиях, например, в области задней грани инструмента. Причем частотные свойства этого канала зависят от износа, они влияют и на помехозащищенность передачи информации об износе. Во-вторых, необходимо привести модели самой силовой эмиссии с учетом ее зависимости от износа. Эти две проблемы и определяют *цель исследований*, приведенных в статье.

Методика исследований

Математическое моделирование. Постановка задачи. Рассмотрим модель ДСР, в основу которой положены полученные нами ранее представления [17, 24, 25]. В отличие от ранее выполненных исследований будем рассматривать ее возмущенной аддитивным силовым шумом $\mathbf{f}(t) = \{f_1, f_2, f_3\}^T$:

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

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 инструмента, рассматриваемых в подвижной системе координат траекторий исполнительных элементов станка (ТИЭС); $\mathbf{F}_\Sigma = \mathbf{F} + \mathbf{\Phi}$ – вектор-функция сил на передней \mathbf{F} и задней $\mathbf{\Phi}$ гранях, формируемых в координатах состояния ДСР; $\mathbf{F} = \{F_1, F_2, F_3\}^T \in \mathfrak{R}_X^{(3)}$; $\mathbf{\Phi} = \{\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3\}^T \in \mathfrak{R}_X^{(3)}$. ТИЭС представлены перемещениями $\mathbf{L} = \{L_1, L_2, L_3\}^T \in \mathfrak{R}_L^{(3)}$ и скоростями $d\mathbf{L} / dt = \mathbf{V} = \{V_1, V_2, V_3\}^T \in \mathfrak{R}_L^{(3)}$. Введем в рассмотрение также скорости деформаций $\mathbf{V}_X = d\mathbf{X} / dt = \{V_{X,1}, V_{X,2}, V_{X,3}\}^T \in \mathfrak{R}_X^{(3)}$.

Таким образом, $\mathfrak{R}_L^{(3)}$ есть рабочее пространство ТИЭС, а пространство упругих деформаций $\mathfrak{R}_X^{(3)}$ является подвижным. Оно определяет

ся траекториями \mathbf{L} и \mathbf{V} (рис. 1). В дальнейшем будем опираться на метод разделения движений [56, 57], позволяющий независимо рассматривать «медленные» движения, лежащие в пределах полосы пропускания серводвигателей. Они также включают в себя смещения точки равновесия упругих деформаций. В реальных системах частотный диапазон «медленных» движений ограничен сверху частотой, не превышающей 10,0 Гц. Это частотный диапазон, в котором движения вершины инструмента являются управляемыми ТИЭС. «Быстрые» движения рассматриваются в вариациях относительно «медленных» [58]. Они лежат в пределах полосы пропускания подсистемы инструмента – в диапазоне от 10,0 Гц до 2,0 кГц. Эти движения не управляемы с помощью ТИЭС, но можно управлять их свойствами. Колебания, лежащие в указанном диапазоне, рассматриваются как ВАЭ процесса резания. Рассмотрим также «супербыстрые» движения, лежащие за пределами полосы пропускания подсистемы (1). Такие колебания характеризуются как акустическая эмиссия. Подсистемы «быстрых» и «супербыстрых» движений подлежат рассмотрению. При изучении связи «быстрых» движений с износом рассматриваются АЧХ ДСР. Они изменяются в ходе развития износа. При изучении «супербыстрых» движений рассматривается сигнал силовой эмиссии как случайной импульсной последовательности (СИП) силовых воздействий.

Вначале рассмотрим подсистему «быстрых» движений. Система (1) имеет априорно заданные и неизменные параметры. Поэтому в частотных характеристиках деформаций «высвечиваются» собственные частоты подсистемы инструмента.

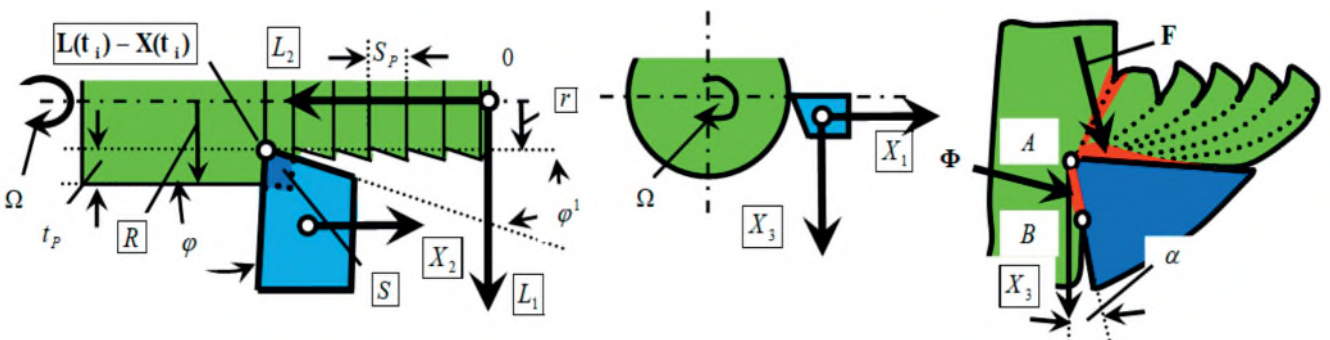


Рис. 1. Схема формирования сил, деформаций и траекторий исполнительных элементов

Fig. 1. Formation of forces, deformations and trajectories of actuators

По мере увеличения частоты силовых возмущений в системе (1) наблюдаются пики на собственных частотах и затухания на антирезонансах. Свойства подсистемы «быстрых» движений меняются, если силы выразить через координаты состояния следующим образом [17, 24, 25]:

$$T^{(0)} dF^{(0)} / dt + F^{(0)} = \rho(V_3, V_{X_3}) \left\{ t_P^{(0)} - [X_1 - k_p X_1(t - T)] \right\} \times \int_{t-T}^t \{V_2(\xi) - V_{X_2}(\xi)\} d\xi, \quad (2)$$

где $\rho = \rho_0 \{1 + \mu \exp[-\varsigma(V_3 - V_{X_3})]\}$ – давление стружки, кг/мм²; ρ_0 – давление в области малых скоростей резания; μ – безразмерный параметр; ς – коэффициент наклона, м; $T^{(0)}$ – постоянная времени стружкообразования, с; k_p – безразмерный коэффициент регенерации следа, $0 < k_p \ll 1$. Технологические режимы, лежащие в основе построения программы ЧПУ, есть

$$\begin{cases} t_P(t) = t_P^{(0)}(t) - [X_1(t) - k_p X_1(t - T)]; \\ S_P(t) = \int_{t-T}^t \{V_2(\xi) - V_{X_2}(\xi)\} d\xi; \\ V_P(t) = \text{Mod} \left\{ [V_1(t) - V_{X_1}(t)], [V_2(t) - V_{X_2}(t)], [V_3(t) - V_{X_3}(t)] \right\}^T, \end{cases} \quad (3)$$

где $t_P(t)$, $S_P(t)$, $V_P(t)$ – глубина, подача и скорость резания; $t_P^{(0)}(t) = R(t) - L_1(t)$.

Ограничимся продольным точением вала постоянного диаметра ($R = \text{const}$) на режимах $L_1(t) = L_1(0) = \text{const}$, $L_2(t) = V_2 t$, $L_3(t) = V_3 t$.

Рассматривается точение инструментом с углом в плане $\varphi = \pi/2$ (рис. 1). Угол $\varphi^1 \rightarrow 0$. Малым также является задний угол $\alpha \rightarrow 0$, обычно $\alpha < 6^\circ$. Для точения на постоянных режимах при условии устойчивости равновесия $\mathbf{X} = \{X_1^*, X_2^*, X_3^*\}^T = \text{const}$ справедливо

$$t_P^* = t_P^{(0)} - X_1^*(1 - k_p); \quad S_P^* = V_2 T; \quad (4)$$

$$V_P^* \approx V_3,$$

где $t_P^{(0)}(t) = R(t) - L_1(0)$; в точке равновесия справедливо $X_2(t) = X_2(t - T)$, поэтому $S_P^* = V_2 T$; кроме этого в выражении (4) принято во внимание, что $V_3 \gg V_2$.

Таким образом, в установившемся состоянии вершина инструмента движется вдоль поверхности заготовки по направлению «А-В», это направление под углом $\varphi = \arctg(V_3 / V_2)$. Траектория сдвинута на $\mathbf{X}^* = \text{const}$ (рис. 2), она обозначена красным цветом. Рассматривается типичный случай: $S_P^{(0)} \ll t_P^{(0)}$. Тогда $\Phi_1 \rightarrow 0$.

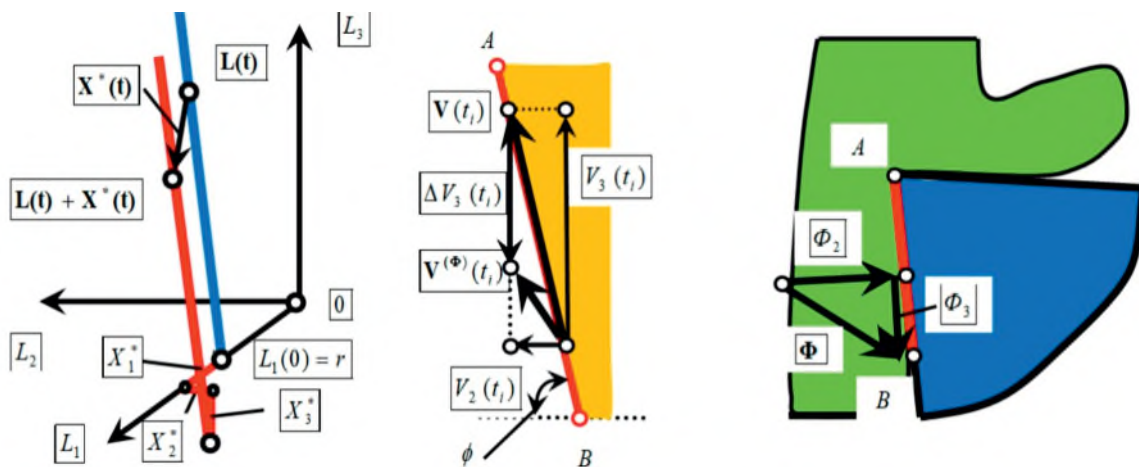


Рис. 2. Схема изменения направления движений в области контакта задней грани инструмента и заготовки

Fig. 2. Changing the direction of motion in the contact area between the rear edge of the tool and the workpiece

Для дальнейшего анализа удобно ввести агрегированные координаты

$$v = (V_2 - dX_2 / dt) / (V_3 - dX_3 / dt); \quad (5)$$

$$v^* = V_2 / V_3.$$

Ранее было показано [24, 25], что силы Φ_2 и Φ_3 представимы как

$$\Phi_2 = k_\Phi F_0 + \rho_0 [t_P^{(0)} - X_1(t)] \exp[\zeta(v - v^*)];$$

$$\Phi_3 = k_\Phi k_T F_0 + k_T \rho_0 \times$$

$$\times \left\{ (t_P^{(0)} - X_1(t)) \exp[\zeta(v - v^*)] \right\}, \quad (6)$$

где ρ_0 – сила, приведенная к длине контакта режущего лезвия, кг/мм; ζ – параметр, зависящий от заднего угла α и износа; k_T – коэффициент трения; k_Φ – безразмерный коэффициент упругого восстановления.

Уравнения (1–3) характеризуют подсистему инструмента с нелинейной обратной связью. Поскольку система является нелинейной, то ее реакция зависит от частоты и амплитуды. Вначале проанализируем АЧХ при малых возмущениях.

Линеаризованные реакции системы. При малых возмущениях сил и вариаций площади

среза S (рис. 1) в окрестности равновесия справедливо линеаризованное представление. Тогда динамика системы, возмущенной силами $\mathbf{f}(t)$ может быть представлена исключительно в функции частоты, причем силовые возмущения удобно рассматривать в виде «белого» шума. При этом можно воспользоваться методами преобразования Лапласа. Для малых деформаций в окрестности равновесия силами, действующими на задние грани, можно пренебречь. Тогда вместо уравнения (2) справедливо

$$T^{(0)} dF^{(0)} / dt + F^{(0)} =$$

$$= \bar{\rho} \left\{ t_P^{(0)} S_P^{(0)} - [X_1 - k_p X_1(t - T)] S_P^{(0)} - \right.$$

$$\left. - [X_2(t) - X_2(t - T)] t_P^{(0)} + \varepsilon \right\}, \quad (7)$$

где $\bar{\rho} = \Omega_F \int_{t - (\Omega_f)^{-1}}^t \rho_0 \left\{ 1 + \mu \exp[-\zeta(V_3 - V_{X_3}(\xi))] \right\} \times$
 $\times d\xi \Rightarrow \rho_0 \left\{ 1 + \mu \exp[-\zeta V_3] \right\} = \text{const}$, так как $V_{X_2}(t) \rightarrow 0$; $\varepsilon = [X_1 - k_p X_1(t - T)][X_2(t) - X_2(t - T)] = 0$, поскольку ε есть произведение малых величин. Вместо уравнений (1) и (7) в изображениях по Лапласу имеем

$$\left\{ \begin{array}{l} X_i(p) = W_{F_0, X_i}(p) F_0(p), \quad i = 1, 2, 3; \\ F^{(0)} = \frac{\bar{\rho} \{ t_P^{(0)} S_P^{(0)} - X_1(p) S_P^{(0)} [1 - k_p \exp(-Tp)] - X_2(p) [1 - \exp(-Tp)] t_P^{(0)} \}}{(1 + T^{(0)} p)} \end{array} \right\}, \quad (8)$$

где p – символ изображения по Лапласу; $W_{F_0, X_i}(p) = \Delta_{X_i}(p) / \Delta(p)$, $i = 1, 2, 3$;

$$\Delta(p) = \begin{bmatrix} (mp^2 + h_{1,1}p + c_{1,1}) & (h_{2,1}p + c_{2,1}) & (h_{3,1}p + c_{3,1}) \\ (h_{1,2}p + c_{1,2}) & (mp^2 + h_{2,2}p + c_{2,2}) & (h_{3,2}p + c_{3,2}) \\ (h_{1,3}p + c_{1,3}) & (h_{2,3}p + c_{2,3}) & (mp^2 + h_{3,3}p + c_{3,3}) \end{bmatrix};$$

$$\Delta_{X_1}(p) = \begin{bmatrix} \chi_1 & (h_{2,1}p + c_{2,1}) & (h_{3,1}p + c_{3,1}) \\ \chi_2 & (mp^2 + h_{2,2}p + c_{2,2}) & (h_{3,2}p + c_{3,2}) \\ \chi_3 & (h_{2,3}p + c_{2,3}) & (mp^2 + h_{3,3}p + c_{3,3}) \end{bmatrix};$$

$$\Delta_{X_2}(p) = \begin{bmatrix} (mp^2 + h_{1,1}p + c_{1,1}) & \chi_1 & (h_{3,1}p + c_{3,1}) \\ (h_{1,2}p + c_{1,2}) & \chi_2 & (h_{3,2}p + c_{3,2}) \\ (h_{1,3}p + c_{1,3}) & \chi_3 & (mp^2 + h_{3,3}p + c_{3,3}) \end{bmatrix};$$

$$\Delta X_3(p) = \begin{bmatrix} (mp^2 + h_{1,1}p + c_{1,1}) & (h_{2,1}p + c_{2,1}) & \chi_1 \\ (h_{1,2}p + c_{1,2}) & (mp^2 + h_{2,2}p + c_{2,2}) & \chi_2 \\ (h_{1,3}p + c_{1,3}) & (h_{2,3}p + c_{2,3}) & \chi_3 \end{bmatrix}$$

Выражения $W_{F_0, X_i}(p) = \Delta X_i(p) / \Delta(p)$, $i = 1, 2, 3$, имеют смысл динамической податливости в i -м направлении. В соответствие системе (8) можно поставить структурную схему (рис. 3), на которой видно, что ДСР можно представить в виде объекта (подсистемы инструмента), охваченного отрицательной обратной связью (динамической связью, формируемой резанием). Во внутреннем регуляторе можно выделить два основных канала, которые имеют в разомкнутом состоянии общие коэффициенты усиления: $k_{\Sigma, 1} = \rho W_{F_0, X_1}(0) S_P^{(0)}$ и $k_{\Sigma, 2} = \rho W_{F_0, X_2}(0) t_P^{(0)}$. От них зависит влияние динамической связи на

частотные характеристики. Нетрудно видеть, что $k_{\Sigma, 2} \gg k_{\Sigma, 1}$, так как $t_P^{(0)} \gg S_P^{(0)}$.

Основное внимание сосредоточим на преобразовании силовой эмиссии $f(t)$ в деформационные смещения инструмента. Для выяснения других возмущений достаточно их привести к силам, добавив соответствующее динамическое звено. На структурной схеме (рис. 3) пунктиром показано преобразование воздействия $\Delta S(t)$ к силам. Вычислим $W_{f, X_i}(p)$, $i = 1, 2, 3$, которая определяет преобразование силовой эмиссии в деформации инструмента:

$$W_{f, X_i}(p) = \frac{W_{F_0, X_i}(p)}{1 + \frac{\rho^{(v)}}{1 + T_0 p} \{S_P^{(0)} W_{F_0, X_1}(p) + t_P^{(0)} W_{F_0, X_2}(p) [1 - \exp(-Tp)]\}}, \quad i = 1, 2, 3. \quad (9)$$

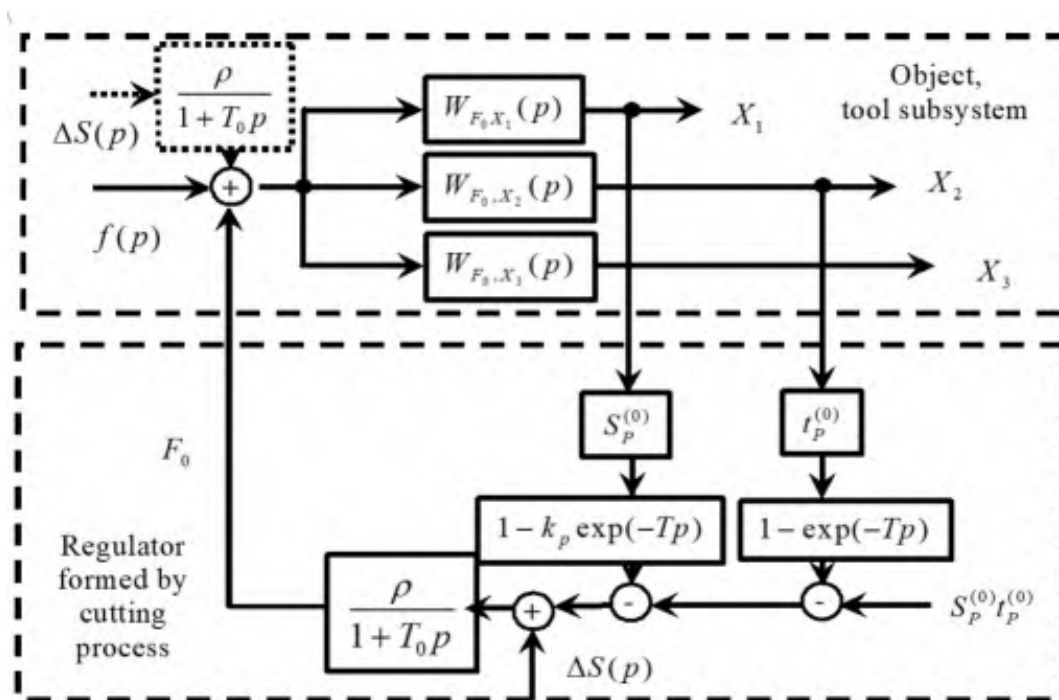


Рис. 3. Структурная схема линеаризованной динамической системы, возмущенной силами $f(p)$ и вариациями площади срезаемого слоя $\Delta S(p)$

Fig. 3. Block diagram of a linearized dynamic system perturbed by forces $f(p)$ and variations in the area of the cut layer $\Delta S(p)$

Во внутреннем регуляторе можно выделить два основных канала. Главное значение имеет контур, включающий передаточную функцию в разомкнутом состоянии $\frac{\rho^{(v)} \{t_P^{(0)} W_{F_0, X_2}(p) [1 - \exp(-Tp)]\}}{1 + T_0 p}$. Из выраже-

ния (9) следует, что за счет динамической связи частотные свойства преобразования сил в деформации изменяются. Изменения зависят от режимов и от параметров $\rho^{(v)}$ и $T^{(0)}$.

Рассмотрим три случая.

1. Пусть $\rho^{(v)} = 0$, тогда $W_{f, X_i}(p) = W_{F_0, X_i}(p)$, и $\text{Mod}\{W_{F_0, X_i}(p)\}$ имеет три резонанса $\omega_{0, i}$, $i = 1, 2, 3$, и два антирезонанса. Эффект приближения частотных характеристик ДСР к характеристикам подсистемы инструмента наблюдается и при малых значениях $S_P^{(0)}$ и $t_P^{(0)}$. Таким образом, по изменению частотных характеристик подсистемы инструмента можно судить об изменениях параметров формируемой резанием динамической связи. При малых колебаниях главное значение имеет параметр $\rho^{(v)}$.

2. Будем мысленно увеличивать $\rho^{(v)}$. Из выражения (9) вытекает, что свойства системы будут принципиально меняться. В частности, на резонансах всплески амплитуд будут уменьшаться. К тому же $\rho < \rho_{\max}$, где ρ_{\max} – максимально допустимое значение, при котором система устойчива. Значение ρ_{\max} зависит от технологических режимов и параметров системы. При увеличении $t_P^{(0)}$ значение ρ_{\max} уменьшается. Его значение зависит также от $T^{(0)}$ и $W_{F_0, X_1}(j\omega)$.

3. Если выполняется обычное для точения условие $t_P^{(0)} \gg S_P^{(0)}$, то главное влияние на АЧХ оказывает $\text{Mod}\left\langle \frac{\rho^{(v)}}{1 + T_0 j\omega} \{t_P^{(0)} W_{F_0, X_2}(j\omega) \times [1 - \exp(-Tj\omega)]\} \right\rangle$. Тогда существует такое множество частот $\omega \in \Delta\omega$, в котором $[1 - \exp(-Tj\omega)]_{\omega \in \Delta\omega} = 0$. Это связано с тем, что

оператор $[1 - \exp(-Tj\omega)]$ по мере увеличения частоты периодически обращается в ноль. Таким образом, множество $\omega \in \Delta\omega$ определяется частотой вращения заготовки и кратными ей частотами. Это свойство приводит к преобразованию монотонно изменяющихся частотных характеристик к характеристикам типа гребенчатого фильтра.

Мы можем сделать важный для дальнейшего анализа вывод: вариации параметров формируемой резанием динамической связи отображаются в изменениях частотных характеристик ДСР, т. е. канала, по которому передается информация о силовых взаимодействиях в зоне резания.

Пример частотных характеристик. Рассмотрим изменение АЧХ при вариации $\bar{\rho}$ и $T^{(0)}$ для точения вала $R = 42,0$ мм из стали 10ГН2МФА. Будем изучать АЧХ на основе численного моделирования в программном комплексе MATLAB – Simulink, а также экспериментально на основе прямого измерения ВАЭ в процессе резания (рис. 4, 5). При моделировании рассматривается силовое возмущение в виде «белого» шума. Технологические режимы без учета деформаций и возмущений: подача $S_P^{(0)} = 0,1$ мм; глубина резания $t_P^{(0)} = 2,0$ мм и скорость резания $V_P^{(0)} = (0,5 \dots 3,8)$ м/с. 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.

Рассмотрим АЧХ, полученные на основе вычисления автоспектров деформаций (рис. 4) при силовом возмущении в виде «белого» шума. Светлыми круглыми точками обозначены резонансы, темными – антирезонансы. Отметим следующие особенности изменения АЧХ.

1. При малых ρ в спектре заметны три всплеска, которым соответствуют резонансы $\omega_{0, i}$ подсистемы. Между ними расположены антирезонансы. При $\rho > 30 \dots 50$ кг/м² на изменение амплитуды накладываются гребенчатые спек-

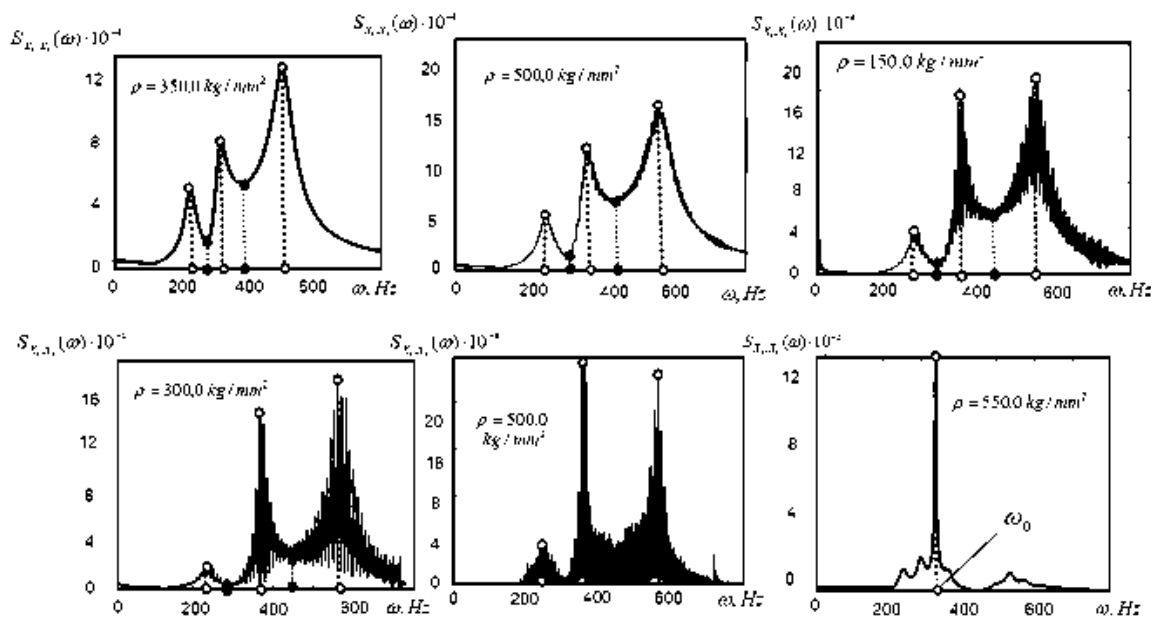


Рис. 4. Примеры изменения автоспектров деформаций в зависимости от давления стружки на переднюю грань инструмента

Fig. 4. Examples of changes in auto-spectra of strain depending on the pressure of chips on the leading edge of the tool

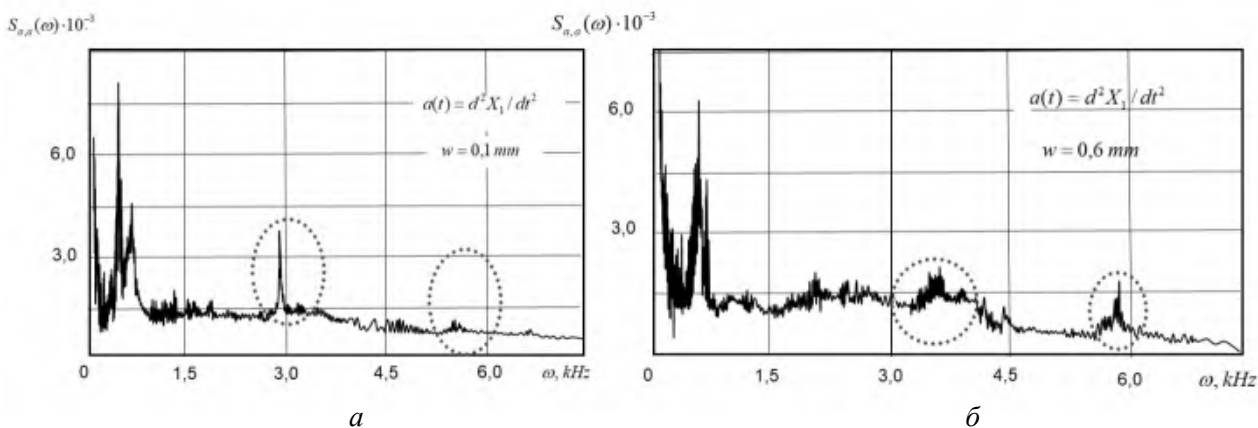


Рис. 5. Пример спектра ВАЭ, полученного на основе измерения виброускорений в направлении X_1 :
 а – износ $w = 0,1$ мм; б – износ $w = 0,6$ мм

Fig. 5. An example of a VAE spectrum obtained from measuring vibration accelerations in the X_1 direction:
 а – wear $w = 0.1$ mm; б – wear $w = 0.6$ mm

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

Параметры динамической связи
Dynamic link options

ρ , КГ/ММ ²	ρ_0 , КГ/ММ	Ω , с ⁻¹	$T_0^{(0)}$, с	ζ	k_T	$k^{(T)}$, с/М	$k^{(S)}$	χ_1	χ_2	χ_3
100...1000	20	5...50	0,0001	1...7	0,2	5,0	0,1	0,4	0,51	0,76

тры, расстояние между всплесками которых равно частоте вращения заготовки 10 Гц. Их уровень возрастает при увеличении ρ . При $\rho > 400$ кг/мм² расстояния между всплесками начинают нивелироваться и возрастает дисперсия спектра. При $\rho = 550$ кг/мм² система теряет устойчивость. В ней формируются автоколебания, и S_X , $X(\omega)$ трансформируется в $\delta(\omega - \omega_0)$ -образный спектр с частотой $\omega_0 = \text{const}$. При дальнейшем увеличении ρ независимо от возмущения формируются различные притягивающие множества деформаций, частотные свойства которых не зависят от малых возмущений. Их анализ в невозмущенной системе выполнен нами ранее [17, 24, 25, 51, 52, 60].

2. Наблюдается перераспределение всплесков амплитуд на резонансах, изменение их добротности и некоторое смещение частот. На их изменения оказывают влияние исходные параметры. Заметное влияние на АЧХ оказывает постоянная времени $T^{(0)}$, определяющая инерционность процесса резания. При увеличении $T^{(0)}$ возрастает затухание колебаний по мере роста частоты. Следовательно, чувствительность частотных свойств к вариациям параметров зависит от скорости резания и объема пластической деформации. Поэтому в высокочастотной области при $\omega \in [T^{(0)^{-1}}, \infty)$ влияние изменения динамической связи на преобразование сил в деформации нивелируется.

Экспериментальные исследования сигналов ВАЭ, измеренные с помощью виброакселерометров фирмы Brüel & Kjær, подтвердили особенности влияния износа на частотные свойства сигнала и позволили выявить его дополнительные особенности в высокочастотной области. Интенсивность ускорений по сравнению со смещени-

ями в квадратичной зависимости возрастает при увеличении частоты, что позволяет исследовать ВАЭ в высокочастотной области. Рассматриваются автоспектры как Фурье-изображения от автокорреляционной функции. Поэтому эффект возрастает в еще большей степени.

Если в вычисленных спектрах на рис. 4 колебательные смещения после резонансных частот практически обнуляются, то при измерении колебательных ускорений в высокочастотной области обнаруживаются всплески, которые мы интерпретируем как реакцию на формируемую резанием силовую эмиссию (выделены пунктиром). Рассмотрим моделирование эмиссии.

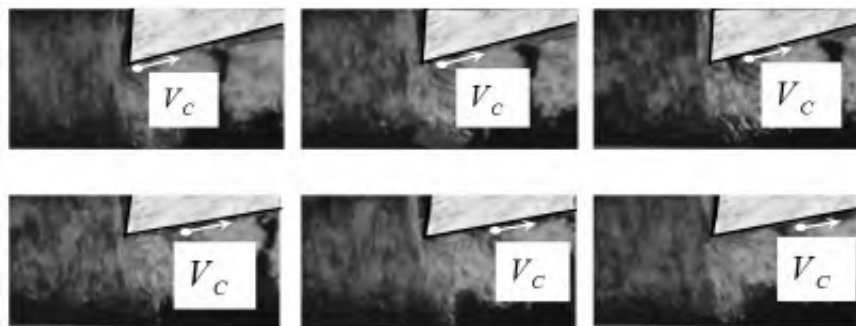
Силовая эмиссия и износ. Представим силовую эмиссию в виде случайной импульсной последовательности [59]. Она зависит от двух процессов.

1. При формировании суставчатой и (или) элементной стружки образуются периодические сближения задней грани с заготовкой (рис. 6).

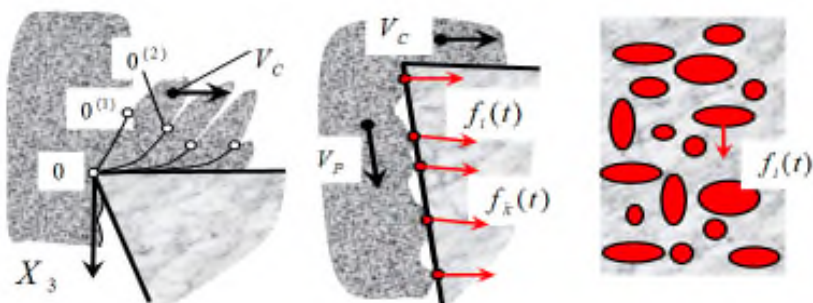
2. По мере развития износа увеличивается площадь контакта задней грани и заготовки, в которой формируются силовые взаимодействия.

Каждое элементарное взаимодействие на площадке контакта задней грани (рис. 6), имеющее молекулярно-механическую природу, может быть охарактеризовано двумя этапами. На первом этапе наблюдается накопление энергии (временной отрезок $\tau_i^{(1)}$), на втором – ее выделение

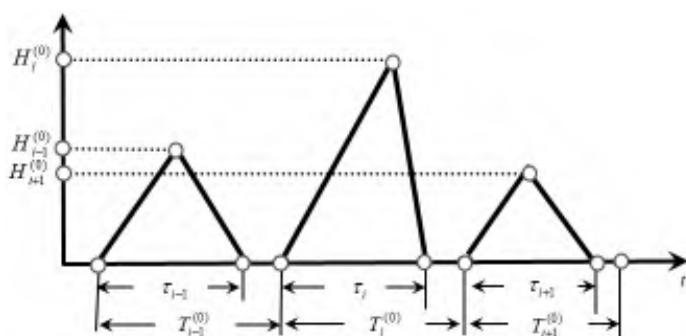
(временной отрезок $\tau_i^{(2)}$). Свойства импульса можно раскрыть, если представить его в треугольной форме. Тогда он будет характеризоваться тремя параметрами: расстоянием между импульсами $T_i^{(0)}$, их длительностью τ_i и высотой $H_i^{(0)}$. При моделировании последовательности можно ввести гипотезы: параметры $T_i^{(0)}$, τ_i



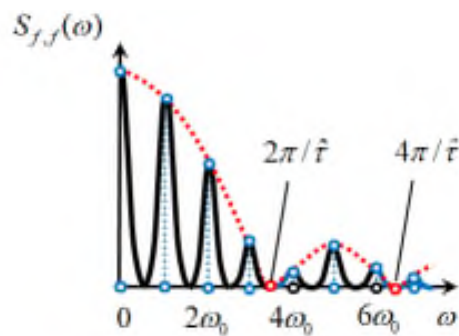
a



б



в



z

Рис. 6. Модель силовой эмиссии как случайной импульсной последовательности:

a – фрагменты скоростной кинесъемки формирования элементов стружки; б – схема формирования фрагментов силовых импульсов; в – модель случайной силовой последовательности; z – пример спектрального разложения случайной последовательности

Fig. 6. Model of force emission as a random pulse sequence:

a – fragments of high-speed filming of the formation of chip elements; б – diagram of the formation of fragments of power impulses; в – random force sequence model; z – example of spectral decomposition of a random sequence

и $H_i^{(0)}$ являются статистически независимыми;

их вариации подчиняются закону нормального распределения; известны параметры их распределения, и они равны. Для выяснения основных свойств сигнала положим, что ориентация его в пространстве остается неизменной и направленной по силе резания, а его модуль равен $f(t)$. Для такого процесса известно его спектральное представление [49]:

$$S_{f,f}(\omega) =$$

$$\frac{2\pi n}{\Delta T} \left\{ (\sigma^2 + a^2) K(\omega) + 2a^2 |H(\omega)|^2 \operatorname{Re} \left[\frac{\varphi(\omega)}{1 - \varphi(\omega)} \right] \right\},$$

$$i = 1, 2, 3, \quad (10)$$

где n – число импульсов на отрезке ΔT ; σ – среднеквадратическое отклонение амплитуд $H_i^{(0)}$; a – их математическое ожидание $H_i^{(0)}$; $p(\tau)$ –

функция распределения интервалов $T_i^{(0)}$;

$$\varphi(\omega) = \int_0^{\infty} e^{j\omega\tau} p(\tau) d\tau - \text{характеристическая функция интервалов.}$$

В формулу (10) входят $K(\omega)$ и $H(\omega)$, которые зависят от спектра стандартного единичного импульса:

$$K(\omega) = \int_0^{\infty} (\hat{T}^{(0)})^2 \times$$

$$\times \left| S(\omega, \hat{T}^{(0)}) \right|^2 p(\hat{T}^{(0)}) d(\hat{T}^{(0)}), \text{ где } S(\omega, \hat{T}^{(0)}) -$$

спектральная плотность стандартного импульса;

$p(\hat{T}^{(0)})$ – функция распределения вероятностей

длительности импульса; $\hat{T}^{(0)}$ – математическое

$$\text{ожидание расстояний; } H(\omega) = \int_0^{\infty} (\hat{\tau}) S(\omega, \hat{\tau}) p(\hat{\tau}) d(\hat{\tau}).$$

Знак «крышечка» над переменной означает, что рассматривается математическое ожидание.

Функции $K(\omega)$ и $H(\omega)$ «окрашивают» спектры, не изменяя структуру спектрального представления. Главное значение имеют математические ожидания и дисперсии импульсов. Спектр (10) преобразуется динамической систе-

мой в сигнал ВАЭ, являющийся измеримым после усиления.

Отметим свойства ВАЭ.

1. Математическое ожидание расстояний между импульсами определяет частоту всплеска.

2. Дисперсия расстояний между ними вызывает уширение спектральной линии (рис. 6).

3. Развитие износа вызывает увеличение актов контактного взаимодействия и увеличивает неопределенность импульсов. Поэтому развитие износа вызывает смещение частоты всплеска и уширение его спектра.

4. Уровень сигнала также свидетельствует о развитии износа. По мере увеличения износа, особенно при приближении к его критическому значению, наблюдается низкочастотная амплитудная модуляция ВАЭ.

На рис. 7 приведены примеры преобразования последовательности в спектр $S_f, f(\omega)$. Заметно уширение спектральной линии при увеличении σ_f . Аналогичны и их отображения в ВАЭ. Экспериментально измеренные и приведенные на рис. 7 спектры качественно совпадают, но количественные оценки меняются в зависимости от технологических режимов. Основные частоты ВАЭ смещаются в высокочастотную область

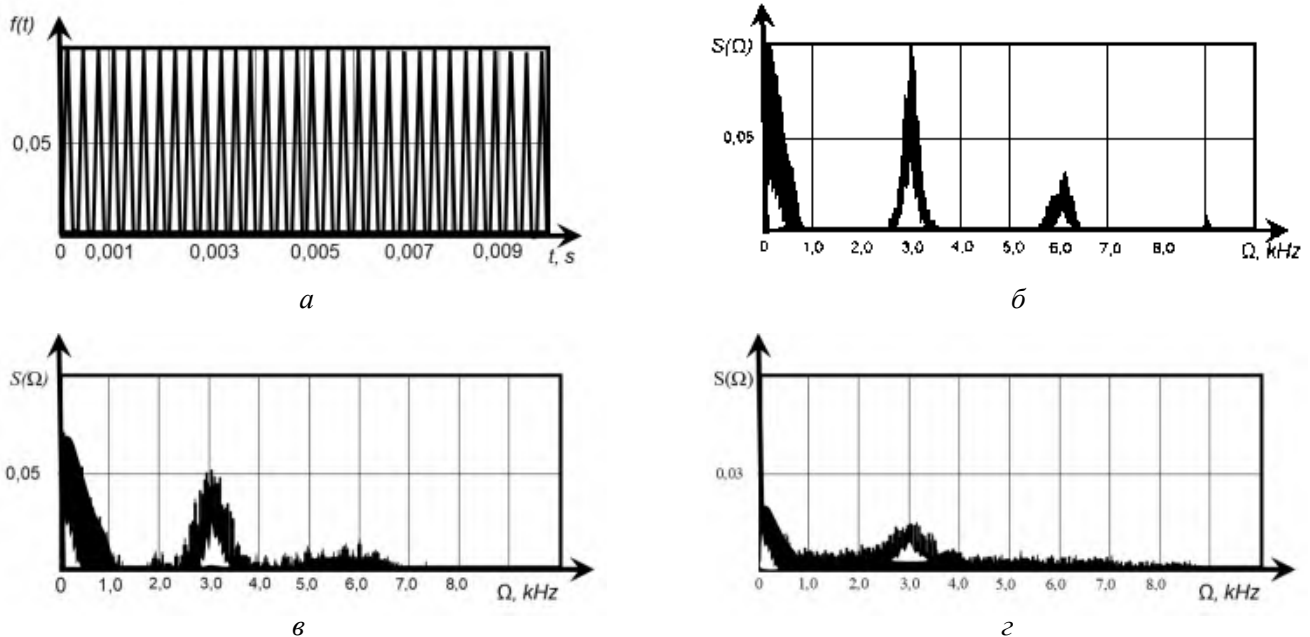


Рис. 7. Преобразование импульсной последовательности (а) в ее спектр (б, в, з):

$$a - \sigma_f = 0,01; \text{ б} - \sigma_f = 0,1; \text{ в} - \sigma_f = 0,2; \text{ з} - \sigma_f = 0,3$$

Fig. 7. Converting the pulse sequence (a) into its spectrum (b, v, z):

$$a - \sigma_f = 0.01; \text{ б} - \sigma_f = 0.1; \text{ в} - \sigma_f = 0.2; \text{ з} - \sigma_f = 0.3$$

по мере роста скорости резания. Это связано с тем, что расстояния между импульсами в основном зависят от пути. Они зависят и от текущей площади среза, причем вариации глубины и подачи практически не изменяют их частотный состав. Во всех случаях имеет место проблема оценивания помехозащищенности измеряемого сигнала. Помехи, обусловленные дополнительными возмущениями, лежат в низкочастотной области, и их можно привести к вариациям площади среза $\Delta S(t)$ [60].

Помехозащищенность сигнала можно оценить функцией когерентности $k_{f, X_2}^2(\omega)$ между силовой эмиссией $f(t)$ и измеряемой последовательностью. Для вычисления $k_{f, X_2}^2(\omega)$ удобно перенести точку возмущения $\Delta S(t)$ к силам, как показано пунктиром на рис. 3. Тогда имеем

$$k_{f, X_2}^2(\omega) = [1 + \Delta_k(\omega)]^{-1}, \quad (11)$$

где $\Delta_k(\omega) = \frac{S_{\Delta S, \Delta S}(\omega)}{S_{f, f}(\omega)} \frac{\rho^2}{[1 + (T^0 \omega)^2]}$; $S_{\Delta S, \Delta S}(\omega)$ – спектр возмущений; $S_{f, f}(\omega)$ – спектр эмиссии.

Анализ $k_{f, X_2}^2(\omega)$ показывает, что по мере увеличения частоты обусловленность деформационных смещений силовой эмиссией возрастает.

Пример виброакустической диагностики.

Приведенные свойства АЧХ могут быть положены в основу построения информационного пространства. Компромисс между сложностью, помехозащищенностью и информативностью позволяет рассматривать следующие признаки. Первый признак учитывает смещение средней частоты спектра ω_C , определяемой по правилу

$$\int_0^{\omega_C} S(\omega) d\omega = \int_{\omega_C}^{\infty} S(\omega) d\omega. \quad \text{Текущее значение}$$

$\omega_C(t)$ измерять сложно. Проще рассматривать следующую оценку:

$$\begin{aligned} \Pi_1(w) = & \left\{ \int_0^{\omega_C} S_w(\omega, w) d\omega - \int_{\omega_C}^{\infty} S_0(\omega) d\omega \right\} \times \\ & \times \left\{ \int_0^{\infty} S_0(\omega) d\omega \right\}^{-1}, \end{aligned} \quad (12)$$

где ω_C определяется на начальной стадии износа и в дальнейшем остается неизменной; $S_0(\omega)$ – спектр на начальном этапе обработки, когда износ $w \rightarrow 0$; $S_w(\omega, w)$ – спектр при износе w . Второй признак $\Pi_2(w)$ определяет эмиссию в контакте задней грани инструмента. Его удобно рассматривать в форме

$$\begin{aligned} \Pi_2(w) = & \left\{ \int_{\omega_{0,1}}^{\omega_{0,2}} S_w(\omega, w) d\omega - \int_{\omega_{0,1}}^{\omega_{0,2}} S_0(\omega) d\omega \right\} \times \\ & \times \left\{ \int_{\omega_{0,1}}^{\omega_{0,2}} S_0(\omega) d\omega \right\}^{-1}, \end{aligned} \quad (13)$$

где $\Delta\omega = \omega_{0,2} - \omega_{0,1}$ – полоса частот анализируемого сигнала, определяемая основной частотой эмиссионного сигнала с учетом уширения его спектральной линии. Оценки $\Pi_1(w)$ и $\Pi_2(w)$ обладают особенностью: $\Pi_i(0) \equiv 0$, $i = 1, 2$. Текущий спектр $S_w(\omega, w)$ изменяется по мере развития износа. Его нестационарность $S_w(\omega, t)$ во времени t возрастает по мере увеличения w . Для ее оценки введем в рассмотрение приращение времени T_w , в течение которого она оценивается как скользящее среднее. Тогда в момент t справедливы оценки типа математического ожидания

$$M \{S(\omega, t)\}_{t \in [(t-T_w), t]} = \frac{1}{T_w} \int_{t-T_w}^t S(\omega, t) dt$$

и дисперсии $\sigma^2 \{S(\omega, t)\}_{t \in [(t-T_w), t]} =$

$$= \frac{1}{T_w} \int_{t-T_w}^t \{S(\omega, t) - M[S(\omega, t)]\}^2 dt. \quad \text{Информатив-}$$

ной является следующая оценка, монотонно возрастающая по мере развития износа:

$$\Pi_3(w) = \frac{\sigma \{S_w[\omega, w(t)]\}}{M \{S_w[\omega, w(t)]\}}. \quad (14)$$

Приведенные информационные признаки обладают следующими особенностями.

1. Признак Π_1 характеризует общее свойство АЧХ, заключающееся в смещении нормированного к дисперсии спектра ВАЭ в низкочастотную область без выявления его особенностей.

Например, без раскрытия смещения собственных частот.

2. Признаки Π_2 и Π_3 ориентированы на анализ высокочастотной части спектра. Для их оценки можно использовать укороченные временные последовательности, так как эти оценки находятся в высокочастотной части спектра.

Информационное пространство является трехмерным. При определении решающих правил разбиения износа на кластеры пользовались байесовским правилом [61]. Для этого определялись центры группирования для каждого значения износа и дисперсия рассеяния относительно центров. Для примера выбраны четыре кластера: $w \in (0, 0 - 0,15)$ мм, $w \in (0,15 - 0,30)$ мм, $w \in (0,30 - 0,45)$ мм и $w \in (0,45 - 0,60)$ мм.

Для каждого кластера определялись эллипсоиды рассеяния с 95%-й вероятностью относительно центров группирования, позволяющие определять разделяющие гиперплоскости, удовлетворяющие байесовскому правилу. Это определяет информационную модель диагностирования. Она позволяет на основе измерения ВАЭ оценивать принадлежность износа к одному из кластеров, пример которых в плоскостях « $\Pi_1 - \Pi_2$ » и « $\Pi_1 - \Pi_3$ » дан на рис. 8. Там же даны проекции эллипсов рассеяния с 95%-й процентной вероятностью, а также следы гиперплоскостей.

Иллюстрации рис. 8 показывают следующее: если в качестве информативного признака рассматривать только Π_1 , то информационная модель может оценивать лишь два класса износа.

Приведенный материал является лишь примером. На основе выявленных особенностей изменения АЧХ по мере развития износа можно строить и более сложные информационные модели, но далеко не всегда повышение сложности дает повышение точности диагностирования.

Информационная модель положена в основу построения внедренной в производство системы диагностирования износа на автоматических линиях по изготовлению валов несущих систем зерноуборочных комбайнов.

Результаты и их обсуждение

При построении систем динамической диагностики процессов обработки резанием, в том числе износа инструмента, рассматриваются две процедуры. Первая включает в себя построение информационного пространства. Вторая рассматривает решающие правила, позволяющие выполнить классификацию по признаку изнашивания. Главное значение имеет построение информационного пространства. Выше показано, что развитие износа изменяет две системы показателей.

1. Развитие износа вызывает вариации параметров динамической связи, что отображается в изменениях АЧХ. Они проявляются в частотном диапазоне, лежащем в пределах полосы пропускания подсистемы инструмента. Это частоты в пределах 100...2000 Гц.

2. Процесс резания сопровождается силовой эмиссией, источники которой связаны с перио-

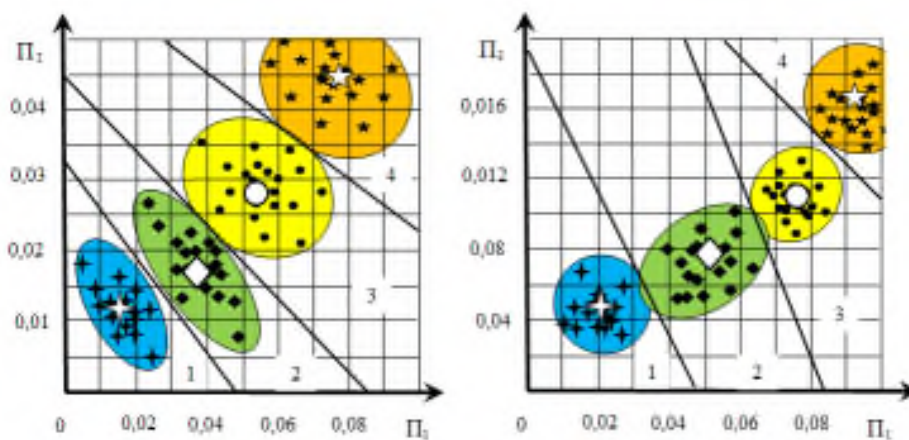


Рис. 8. Распределение информативных признаков в плоскостях « $\Pi_1 - \Pi_2$ » и « $\Pi_1 - \Pi_3$ ». Центры группирования показаны фигурами с белым фоном

Fig. 8. Distribution of informative features in planes (Π_1, Π_2) and (Π_1, Π_3) . Grouping centers are shown by shapes with a white background

дическими взаимодействиями при формировании поверхностей скольжения, а также в зоне сопряжения задних граней инструмента и заготовки. Причем взаимодействия в области задней грани зависят от площади ее контакта, величина которой зависит от износа. Частотный состав силовой эмиссии находится в диапазоне, превышающем полосу пропускания динамической системы резания.

Эти две системы, основанные на выявлении связи износа инструмента с физическими представлениями о его влиянии на частотные свойства ВАЭ, в свою очередь, могут быть положены в основу построения информационных признаков для диагностики износа. Анализ показывает, что развитие износа вызывает изменение спектра ВАЭ. Это позволяет определить следующие информационные признаки отображения износа в сигнале ВАЭ.

1. Развитие износа вызывает необратимые изменения параметров динамической связи, которые обуславливают изменение свойств АЧХ. Среди них отметим смещение собственных частот подсистем, уменьшение их добротности, перераспределение интенсивности колебаний в низкочастотной и высокочастотной областях, образование и развитие периодичностей в спектре сигнала, частота повторения которых равна частоте вращения заготовки, и пр. Отмечается также развитие нестационарности спектров по мере развития износа, особенно в области критического изнашивания, и др.

2. В области, лежащей за пределами полосы пропускания подсистемы инструмента, развитие износа вызывает изменение свойств сигнала силовой эмиссии и его отображения в деформационных смещениях, их скоростях и ускорениях. Сигнал силовой эмиссии можно представить в виде случайной импульсной последовательности. При этом изменяются две основные частоты всплеска эмиссионного сигнала, которые моделируются силовым шумом, обусловленным процессами периодического формирования поверхностей скольжения, а также периодически случайными взаимодействиями в контакте задней грани инструмента и заготовки. При развитии износа наблюдается уширение их спектральных линий и увеличение интенсивности этих сигналов, сопровождаемые их нестабильностью.

Приведенный пример построения внедренной в промышленность системы виброакустической диагностики износа в процессе обработки показал прикладную эффективность использования зависимости частотных свойств сигнала ВАЭ для построения информационных моделей диагностирования. Пример далеко не ограничивает возможности применения выявленных в статье закономерностей для построения систем диагностирования состояния инструментов. Для использования этого метода при обработке на станках с ЧПУ дополнительно необходимо обеспечить информационный обмен между программой ЧПУ и системой диагностики, так как частотные свойства зависят не только от износа, но и от изменяющихся по программе режимов.

Заключение

1. Цель, сформулированная после анализа методов виброакустической диагностики процесса резания, достигнута. В статье изложены теоретические положения, математические модели и исследования, направленные на выяснение изменения частотных характеристик вибраций инструмента в зависимости от его износа. Показано, что частотные свойства вибрационных последовательностей, измеряемых в процессе резания, изменяются по мере развития износа. Исследования позволили выделить две системы показателей. **Первая система** рассматривает частотные свойства в области, включающей полосу пропускания взаимодействующих через резание подсистем. В этой системе развитие износа учитывает его влияние на основные параметры формируемой резанием динамической связи и, следовательно, вызывает изменения частотных свойств сигнала. **Вторая система** рассматривает вибрационную реакцию системы на сигнал силовой эмиссии, представленный случайной импульсной последовательностью.

2. Приведена феноменологическая модель силовой эмиссии, сопровождающей резание, в высокочастотной области, которая расположена за пределами полосы пропускания взаимодействующих подсистем. Модель представлена в виде случайной импульсной последовательности, параметры распределения которой зависят от износа. Развитие износа вызывает увеличение

интенсивности эмиссии, уширение спектральной линии этого сигнала и др.

3. Развитие износа способствует изменению параметров формируемой резанием динамической связи, что вызывает смещение частот резонансов подсистем, уменьшение их добротности, развитие нестационарности спектров и др.

4. Выявленные особенности изменения частотных свойств сигнала ВАЭ по мере развития износа позволяют строить систему информационных признаков в частотном пространстве, которая в совокупности с правилами кластеризации информационного пространства на классы по признаку изнашивания позволяет построить информационную модель износа. Представленный пример показал прикладную эффективность разработанных методов и приведенного математического инструментария на основе созданной и внедренной в промышленность системы диагностики износа.

Список литературы

1. Остафьев В.А., Антонюк В.С., Тымчик Г.С. Диагностика процесса металлообработки. – Киев: Техника, 1991. – 152 с.
2. Заковоротный В.Л., Бордачев Е.В., Алексейчик М.И. Динамический мониторинг состояния процесса резания // СТИН. – 1998. – № 12. – С. 6–13.
3. 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.
4. Astakhov V.P. The assessment of cutting tool wear // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2004. – Vol. 44. – P. 637–647. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2003.11.006.
5. 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.
6. Заковоротный В.Л., Ладник И.В. Построение информационной модели динамической системы металлорежущего станка для диагностики процесса обработки // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1991. – № 4. – С. 75–79.
7. 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.
8. 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.
9. Milfelner M., Cus F., Balic J. An overview of data acquisition system for cutting force measuring and optimization in milling // Journal of Materials Processing Technology Volumes. – 2005. – Vol. 164–165. – P. 1281–1288. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.02.146.
10. 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.
11. Козочкин М.П. Многопараметрическая диагностика технологических систем для обработки материалов резанием // Вестник МГТУ «Станкин». – 2014. – № 1 (28). – С. 13–19.
12. Барзов А.А., Горелов В.А., Игоныкин Б.А. Акустоэлектрическая диагностика процесса резания полимерных композиционных материалов // Авиационная промышленность. – 1986. – № 12. – С. 36.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. Заковоротный В.Л., Флек М.Б. Динамика процесса резания. Синергетический подход. – Ростов н/Д.: Терра, 2005. – 880 с.
18. Astakhov V.P. Tribology of metal cutting. – Elsevier Science, 2006. – 312 p. – ISBN 0080466850.
19. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания. – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.
20. Чувствительность виброакустического сигнала к изменению состояния поверхностного слоя при трении / В.В. Кузин, М.П. Козочкин, С.Н. Григорьев, С. Федоров // Новые огнеупоры. – 2021. – № 5. – С. 141–146. – DOI: 10.17073/1683-4518-2021-5-141-146.
21. 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.

22. Козочкин М.П. Влияние динамических характеристик станочных узлов на вибрации при резании // СТИН. – 2014. – № 2. – С. 4–9.

23. Диагностика и сертификация металлорежущего оборудования / М.П. Козочкин, А.Р. Маслов, Ф.С. Сабиров, А.Н. Порватов. – М.: Инновационное машиностроение, 2017. – 240 с.

24. 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.

25. Zakovorotnyi V.L., Gvindjiliya V.E. Evolution of the dynamic cutting system with irreversible energy transformation in the machining zone // Russian Engineering Research. – 2019. – Vol. 39 (5). – P. 423–430. – DOI: 10.3103/S1068798X19050204.

26. 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.

27. Digital twin-based anomaly detection for real-time tool condition monitoring in machining / Z. Liu, Z.-Q. Lang, Y. Gui, Y.-P. Zhu, H. Laalej // Journal of Manufacturing Systems. – 1995. – Vol. 75. – P. 163–173. – DOI: 10.1016/j.jmsy.2024.06.004.

28. 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.

29. 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.

30. 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.

31. Заковоротный В.Л., Бордачев Е.В. Информационное обеспечение системы динамической диагностики износа режущего инструмента на примере токарной обработки // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1995. – № 3. – С. 95–103.

32. Dolinšek S., Kopac J. Acoustic emission signals for tool wear identification // Wear. – 1999. – Vol. 225. – P. 295–303.

33. 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 Manufac-

ture. – 2000. – Vol. 40 (7). – P. 927–941. – DOI: 10.1016/S0890-6955(99)00093-0.

34. 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.

35. Development of a tool wear-monitoring system for hard turning / C. Scheffer, H. Kratz, P. Heyns, F. Klocke // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2003. – Vol. 43 (10). – P. 973–985. – DOI: 10.1016/S0890-6955(03)00110-X.

36. 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.

37. 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.

38. Azmi A. Monitoring of tool wear using measured machining forces and neuro-fuzzy modelling approaches during machining of GFRP composites // Advances in Engineering Software. – 2015. – Vol. 82. – P. 53–64. – DOI: 10.1016/j.advengsoft.2014.12.010.

39. 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.

40. Chethan Y., Ravindra H., Krishnegowda Y. Optimization of machining parameters in turning Nimonic-75 using machine vision and acoustic emission signals by Taguchi technique // Measurement. – 2019. – Vol. 144. – P. 144–154. – DOI: 10.1016/j.measurement.2019.05.035.

41. Aslan A. Optimization and analysis of process parameters for flank wear, cutting forces and vibration in turning of AISI 5140: A comprehensive study // Measurement. – 2020. – Vol. 163. – DOI: 10.1016/j.measurement.2020.107959.

42. 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.

43. 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.

44. Tobias S.A., Fishwick W. Theory of regenerative machine tool chatter // *The Engineer*. – 1958. – Vol. 205. – P. 199–203.
45. Кудинов В.А. Динамика станков. – М.: Машиностроение, 1967. – 359 с.
46. Thusty J., Ismail F. Basic non-linearity in machining chatter // *CIRP Annals*. – 1981. – Vol. 30 (1). – P. 299–304. – DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60946-9.
47. Selbsterregte Schwingungen an Werkzeugmaschinen / J. Thusty, A. Polacek, C. Danek, J. Spacek. – Berlin: VEB Verlag Technik, 1962. – 340 p.
48. Merritt H.E. Theory of self-excited machine-tool chatter: contribution to machine-tool chatter research – 1 // *Journal of Engineering for Industry*. – 1965. – Vol. 87 (4). – P. 447–454. – DOI: 10.1115/1.3670861.
49. Hanna N.H., Tobias S. A theory of nonlinear regenerative chatter // *Journal of Engineering for Industry*. – 1974. – Vol. 96 (1). – P. 247–255. – DOI: 10.1115/1.3438305.
50. Gousskov A.M., Panovko G.Ya., Shokhin A.E. Dynamics of the rotor system of a vibrational-centrifugal separator with an elastic vibration limiter // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. – 2023. – Vol. 51 (8). – P. 733–745. – DOI: 10.3103/S105261882208009X.
51. Zakovorotnyi V. Bifurcations in the dynamic system of the mechanic processing in metal-cutting tools // *WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics*. – 2015. – Vol. 10. – P. 102–116.
52. Bifurcation of stationary manifolds formed in the neighborhood of the equilibrium in a dynamic system of cutting / V.L. Zakovorotny, A.D. Lukyanov, A.A. Gubanova, V.V. Hristoforova // *Journal of Sound and Vibration*. – 2016. – Vol. 368. – P. 174–190. – DOI: 10.1016/j.jsv.2016.01.020.
53. Rusinek R., Wiercigroch M., Wahi P. Influence of tool flank forces on complex dynamics of a cutting process // *International Journal of Bifurcation and Chaos*. – 2014. – Vol. 24 (9). – P. 189–201. – DOI: 10.1142/S0218127414501156.
54. Rusinek R., Wiercigroch M., Wahi P. Modeling of frictional chatter in metal cutting // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2014. – Vol. 89. – P. 167–176. – DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2014.08.020.
55. Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е. Влияние флуктуаций на устойчивость формообразующих траекторий при точении // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. – 2017. – № 2 (194). – С. 52–61.
56. Понтрягин Л.С. Избранные научные труды. Т. 2. – М.: Наука, 1988. – С. 95–154.
57. Тихонов А.Н. Системы дифференциальных уравнений с малыми параметрами при старших производных // *Математический сборник*. – 1952. – Т. 31, № 3. – С. 231–239.
58. Заковоротный В.Л., Фесенко М.А., Гвинджилия В.Е. Влияние процесса резания на динамические свойства приводов исполнительных элементов станка // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. – 2022. – № 9 (750). – С. 16–29. – DOI: 10.18698/0536-1044-2022-9-16-29.
59. Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику. Ч. 1. – М.: Наука, 1976. – 495 с.
60. Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е. Свойства притягивающих множеств деформационных смещений инструмента в траекториях формообразующих движений при точении изделий // *Известия вузов. Машиностроение*. – 2022. – № 3 (744). – С. 15–30. – DOI: 10.18698/0536-1044-2022-3-15-30.
61. Шлезингер М., Главач В. Десять лекций по статистическому и структурному распознаванию. – Киев: Наукова думка, 2004. – 554 с.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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



Obrabotka metallov -

Metal Working and Material Science





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





Information properties of frequency characteristics of dynamic cutting systems in the diagnosis of 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>,  vvgvindjiliya@donstu.ru;

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

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 22 May 2024

Revised: 14 June 2024

Accepted: 22 June 2024

Available online: 15 September 2024

Keywords:

Diagnostics of the condition of the cutting tool

Vibrations

Information models of dynamic monitoring

Funding

The study was supported by a grant within the framework of the "Nauka-2030".

ABSTRACT

Introduction. One of the directions for increasing the efficiency of cutting is related to the creation of tool wear diagnostic systems. Algorithms and devices have been developed that evaluate wear based on analysis of the vibroacoustic emission signal. These algorithms, as a rule, do not reveal the nature of its formation and the reasons for the change as wear develops. **Subject.** The paper is devoted to the analysis of the reasons for changes in vibration properties with the development of tool wear. **The aim of the work** is to study the changes in the frequency characteristics of a dynamic cutting system caused by the development of wear, and to build diagnostic information models on this basis, as well as its use in industry. **Method and methodology.** The results of mathematical simulation of a perturbed dynamic cutting system are presented, in which the observed vibration sequences are a consequence of disturbances transformed by a dynamic system, the parameters of which depend on wear. Two frequency ranges are considered. **Results and discussions.** The first range includes frequencies that lie within the bandwidth of the instrument subsystem. The second is outside of it. In the first frequency range, it has been analytically and experimentally proven that the development of wear leads to fundamental changes in the frequency properties of the cutting system as a converter of disturbances into tool vibrations. There is a shift in the natural frequencies of the oscillatory circuits formed by the cutting system, a decrease in its quality factor, and as wear develops, some identified features of the vibration spectra appear, including the ratio of the low-frequency and high-frequency parts of the spectrum, etc. In the second frequency range, a model of force emission in the form of a random pulse sequence is considered and wear is displayed in it. The results of studying the coherence function between the forces acting on the tool and vibrational displacement are presented. Information models of wear are proposed, an example of an information model of wear and the results of its use in industry are given.

For citation: 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 (tehnologiya, 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. (In Russian).

References

1. Ostaf'ev V.A., Antonyuk V.S., Tymchik G.S. *Diagnostika protsessa metalloobrabotki* [Diagnostics of the metalworking process]. Kiev, Tekhnika Publ., 1991. 152 p.
2. Zakovorotny V.L., Bordachev E.V., Alekseychik M.I. Dinamicheskii monitoring sostoyaniya protsessa rezaniya [Dynamic monitoring of the state of the cutting process]. *STIN*, 1998, no. 12, pp. 6–13. (In Russian).
3. 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.
4. Astakhov V.P. The assessment of cutting tool wear. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2004, vol. 44, pp. 637–647. DOI: 10.1016/j.ijmactools.2003.11.006.
5. 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.

* 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:** vvgvindjiliya@donstu.ru

6. Zakovorotny V.L., Ladnik I.V. Postroenie informatsionnoi modeli dinamicheskoi sistemy metallovezhushchego stanka dlya diagnostiki protsessa obrabotki [Construction of an information model of the dynamic system of a metal-cutting machine for diagnostics of the machining process]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin = Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 1991, no. 4, pp. 75–79. (In Russian).
7. 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.
8. 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.
9. Milfelner M., Cus F., Balic J. An overview of data acquisition system for cutting force measuring and optimization in milling. *Journal of Materials Processing Technology Volumes*, 2005, vol. 164–165, pp. 1281–1288. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.02.146.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.ijmachtools.2012.02.001.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. Astakhov V.P. *Tribology of metal cutting*. Elsevier Science, 2006. 312 p. ISBN 0080466850.
19. Makarov A.D. *Optimizatsiya protsessov rezaniya* [Optimization of cutting processes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 278 p.
20. Kuzin V.V., Kozochkin M.P., Grigor'ev S.N., Fedorov S.Y. Chuvstvitel'nost' vibroakusticheskogo signala k izmeneniyu sostoyaniya poverkhnostnogo sloya pri trenii [Sensitivity of a vibroacoustic signal to a change in the state of the surface layer of ceramics during friction]. *Novye ognepory = New Refractories*, 2021, no. 5, pp. 141–146. DOI: 10.17073/1683-4518-2021-5-141-146.
21. 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.
22. Kozochkin M.P. Vliyaniye dinamicheskikh kharakteristik stanochnykh uzlov na vibratsii pri rezanii [The influence of the dynamic characteristics of machine components on vibrations during cutting]. *STIN*, 2014, no. 2, pp. 4–9. (In Russian).
23. Kozochkin M.P., Maslov A.R., Sabirov F.S., Porvatov A.N. *Diagnostika i sertifikatsiya metallovezhushchego oborudovaniya* [Diagnostics and certification of metal-cutting equipment]. Moscow, Innovatsionnoe mashinostroenie Publ., 2017. 240 p.
24. 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.2024.01.03.

25. Zakovorotnyi V.L., Gvindjiliya V.E. Evolution of the dynamic cutting system with irreversible energy transformation in the machining zone. *Russian Engineering Research*, 2019, vol. 39 (5), pp. 423–430. DOI: 10.3103/S1068798X19050204.
26. 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.
27. Liu Z., Lang Z.-Q., Gui Y., Zhu Y.-P., Laalej H. Digital twin-based anomaly detection for real-time tool condition monitoring in machining. *Journal of Manufacturing Systems*, 1995, vol. 75, pp. 163–173. DOI: 10.1016/j.jmsy.2024.06.004.
28. 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.
29. 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.
30. 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.
31. 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.
32. Dolinšek S., Kopac J. Acoustic emission signals for tool wear identification. *Wear*, 1999, vol. 225, pp. 295–303.
33. 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.
34. 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.
35. Scheffer C., Kratz H., Heyns P., Klocke F. Development of a tool wear-monitoring system for hard turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2003, vol. 43 (10), pp. 973–985. DOI: 10.1016/S0890-6955(03)00110-X.
36. 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.
37. 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.
38. Azmi A. Monitoring of tool wear using measured machining forces and neuro-fuzzy modeling approaches during machining of GFRP composites. *Advances in Engineering Software*, 2015, vol. 82, pp. 53–64. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2014.12.010.
39. 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.
40. Chethan Y., Ravindra H., Krishnegowda Y. Optimization of machining parameters in turning Nimonic-75 using machine vision and acoustic emission signals by Taguchi technique. *Measurement*, 2019, vol. 144, pp. 144–154. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.05.035.
41. Aslan A. Optimization and analysis of process parameters for flank wear, cutting forces and vibration in turning of AISI 5140: A comprehensive study. *Measurement*, 2020, vol. 163. DOI: 10.1016/j.measurement.2020.107959.
42. 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.

43. 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.
44. Tobias S.A., Fishwick W. Theory of regenerative machine tool chatter. *The Engineer*, 1958, vol. 205, pp. 199–203.
45. Kudinov V.A. *Dinamika stankov* [Dynamics of machine tools]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1967. 359 p.
46. Tlustý J., Ismail F. Basic non-linearity in machining chatter. *CIRP Annals*, 1981, vol. 30 (1), pp. 299–304. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60946-9.
47. Tlustý J., Poláček A., Danek C., Spacek J. *Selbsterregte Schwingungen an Werkzeugmaschinen*. Berlin, VEB Verlag Technik, 1962. 340 p.
48. Merritt H.E. Theory of self-excited machine-tool chatter: contribution to machine-tool chatter research – 1. *Journal of Engineering for Industry*, 1965, vol. 87 (4), pp. 447–454. DOI: 10.1115/1.3670861.
49. Hanna N.H., Tobias S. A theory of nonlinear regenerative chatter. *Journal of Engineering for Industry*, 1974, vol. 96 (1), pp. 247–255. DOI: 10.1115/1.3438305.
50. Gousskov A.M., Panovko G.Ya., Shokhin A.E. Dynamics of the rotor system of a vibrational-centrifugal separator with an elastic vibration limiter. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2023, vol. 51 (8), pp. 733–745. DOI: 10.3103/S105261882208009X.
51. Zakovorotnyi V. Bifurcations in the dynamic system of the mechanics processing in metal-cutting tools. *WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics*, 2015, vol. 10, pp. 102–116.
52. Zakovorotny V.L., Lukyanov A.D., Gubanov A.A., Hristoforova V.V. Bifurcation of stationary manifolds formed in the neighborhood of the equilibrium in a dynamic system of cutting. *Journal of Sound and Vibration*, 2016, vol. 368, pp. 174–190. DOI: 10.1016/j.jsv.2016.01.020.
53. Rusinek R., Wiercigroch M., Wahi P. Influence of tool flank forces on complex dynamics of a cutting process. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2014, vol. 24 (9), pp. 189–201. DOI: 10.1142/S0218127414501156.
54. Rusinek R., Wiercigroch M., Wahi P. Modeling of frictional chatter in metal cutting. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2014, vol. 89, pp. 167–176. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2014.08.020.
55. Zakovorotnyi V.L., Gvindziliya V.E. Vliyanie fluktuatsii na ustoychivost' formoobrazuyushchikh traektorii pri tochenii. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Tekhnicheskie nauki = University News. North-Caucasian Region. Technical Sciences Series*, 2017, no. 2 (194), pp. 52–61.
56. Pontryagin L.S. *Izbrannye nauchnye trudy. T. 2* [Selected works. Vol. 2]. Moscow, Nauka Publ., 1988, pp. 95–154.
57. Tikhonov A.N. Sistemy differentsial'nykh uravnenii s malymi parametrami pri starshikh proizvodnykh [Systems of differential equations with small parameters with higher derivatives]. *Matematicheskii sbornik*, 1952, vol. 31, no. 3, pp. 231–239. (In Russian).
58. Zakovorotny V.L., Fesenko M.A., Gvindzhilia V.E. Vliyanie protsessa rezaniya na dinamicheskie svoystva privodov ispolnitel'nykh elementov stanka [Effect of the cutting process on the dynamic properties of machine actuator drives]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 9, pp. 16–29. DOI: 10.18698/0536-1044-2022-9-16-29.
59. Rytov S.M. *Vvedenie v statisticheskuyu radiofiziku. Ch. 1* [Introduction to statistical radiophysics. Pt. 1]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 495 p.
60. Zakovorotny V.L., Gvindzhiliya V.E. Svoystva prityagivayushchikh mnozhestv deformatsionnykh smeshchenii instrumenta v traektoriyakh formoobrazuyushchikh dvizhenii pri tochenii izdelii [The properties of attracting sets of tool deformation displacements in the trajectories of the shape-generating movements in turning]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 3 (744), pp. 15–30. DOI: 10.18698/0536-1044-2022-3-15-30.
61. Shlesinger M., Glavach V. *Desyat' lektsii po statisticheskomu i strukturnomu raspoznavaniyu* [Ten lectures on statistical and structural recognition]. Kiev, Naukova dumka Publ., 2004. 554 p.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.