

# Моделирование процесса фрезерования по сигналу виброакустической эмиссии с помощью анализирующих вейвлетов Морле

А.И. Хаймович<sup>а</sup>, С.А. Прохоров<sup>а</sup>, А.А. Столбова<sup>а</sup>, А.И. Кондратьев<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 443086, Московское шоссе, 34, Самара, Россия

## Аннотация

В статье рассматривается метод идентификации критического состояния режущего инструмента по износу при онлайн мониторинге процесса фрезерования ответственных деталей из труднообрабатываемых материалов по сигналу виброакустической эмиссии. Метод базируется на моделировании процесса резания с помощью анализирующих вейвлетов Морле. По сравнению с существующими методами, основанными на модификациях быстрого преобразования Фурье и вейвлет-преобразования Хаара, вейвлеты Морле обладают более гибкой настройкой под процесс в частотно-временной области. На основе скейлограмм полученных вейвлет образов процесса авторами предложен и экспериментально апробирован новый критерий диагностики износа многозубого режущего инструмента, который показал хорошую идентифицирующую способность.

*Ключевые слова:* моделирование фрезерования; акустическая эмиссия; диагностика износа; вейвлет-преобразование Морле

## 1. Введение

Растущие требования к характеристикам современных газотурбинных двигателей вызывают необходимость повышения точности и надежности их изготовления, увеличения долговечности критически важных компонентов, например, таких как вращающиеся диски турбины с акцентом на состояние поверхностного слоя обрабатываемых заготовок. Высокая механическая прочность при повышенных температурах и низкая теплопроводность обрабатываемость сплавов на Ti/Ni основе резко ухудшает обрабатываемость, снижение которой проявляется в виде повышенной силы и температуры резания на передней поверхности инструмента [1-5]. Обработка деталей из жаропрочных сплавов на никелевой основе (например, Inconel 718, Udimed 720) не только приводит к скорому износу режущего инструмента, но, что более важно к возможному образованию поверхностных дефектов (например, отбеленных слоев, наклепа, борозд (скоринга) и вырыванию макро и микро-фрагментов материала) [1,11-16], что обобщенно можно назвать поверхностными аномалиями. Независимо от видов операций обработки – точения [14,16-19], сверления [11,15,20,21], фрезерования [12,22], эти поверхностные аномалии являются результатом низкой обрабатываемости сплавов на никелевой основе в сочетании с тенденцией быстрого износа инструмента при резании.

Для гарантированной для этой группы материалов обработки в пределах области рациональных условий для качества поверхности заготовки и надежной производительности инструмента некоторые производители авиационных двигателей разрабатывают решения для мониторинга процессов на чистовых операциях. Успешное решение задачи мониторинга зависит от способности системы выявлять отклонения производственного процесса и реагировать в критические моменты соответствующими реакциями обратной связи.

Большинство систем мониторинга построены по следующему принципу [35]: измеряются в реальном масштабе времени несколько параметров процесса резания, имеющих корреляционную связь с процессом резания и износом инструмента (такие как компоненты силы резания, вибрация, сигналы акустической эмиссии, мощности привода главного движения), фильтруются, усиливаются, извлекаются полезные характеристики сигналов (амплитуда, спектр, статистические оценки, коэффициенты вейвлетов) и подаются на вход нейронной сети, которые отличаются структурой и алгоритмами обучения/адаптации.

В последнее время значительное количество исследований было опубликовано в связи с использованием акустической эмиссии (АЭ).

Явления, приводящие к АЭ, объясняются дислокационной теорией деформации, возникновением искажений в кристаллографических плоскостях решетки, трением, образованием и распространением трещин, фазовыми превращениями. В резании металла, наиболее важными источниками АЭ являются процессы на границах раздела заготовка – инструмент, связанные с трением (передней и боковой поверхности), с пластической деформацией в области условной плоскости сдвига, ломкой стружки, трением между стружкой и поверхностью заготовки (режущей кромкой) [23].

Для точного диагноза процесса обработки системы мониторинга базируются на синхронном использовании датчиков и передовых технологий обработки сигналов.

Целью настоящей статьи является описание способа понижения информационной размерности регистрируемого сигнала АЭ при фрезерной обработке путем выделения ключевых характеристик сигнала в частотно-временной области. Эти характеристики являются базой для решения задачи идентификации нестационарных режимов и износа инструмента при мониторинге процесса фрезерования ответственных деталей.

## 2. Обзор существующих методов частотно-временного анализа сигналов АЭ для процесса фрезерования

При быстром преобразовании Фурье (STFT) сигнал разделяется на небольшие последовательные промежутки времени, и умножается на ненулевую оконную функцию в результате чего Фурье-образ представляется в форме «движущихся спектров». STFT основывается на предположении, что в течение выбранного интервала времени, сигналы являются стационарными [19-22]. Для сигнала  $f(t)$  STFT можно выразить через уравнение (1), где  $h(t)$  – оконная функция в текущий момент времени  $t$ ,  $\tau$  – время:

$$w(\tau, \omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j\omega t} f(t) h(t-\tau) dt. \quad (1)$$

Оконная функция выбирается таким образом, чтобы избежать искажения сигнала. В работе [28]  $h(t)$  представляет собой окно Хеннинга. Основным недостатком STFT является допущение стационарности (неизменности) сигнала во временном интервале окна, что для таких динамических процессов как фрезерование приводит к погрешностям при анализе.

Вигнер [29], а позже Коэн [21] улучшили классическое преобразование Фурье (Т-Ф). Общий класс функции распределения в Т-Ф был введен Коэном (уравнение (2)), где  $f(m)$  – сигнал во временной области,  $f^*(m)$  – комплексно-сопряженная величина  $\phi(\theta, \tau)$  – это, так называемая, функция ядра,  $\theta$  – параметр распределения с размерностью частоты:

$$w(t, \omega) = \frac{1}{2\pi} \iint \int e^{-j(\theta t + \tau \omega + \theta \omega)} f(\mu + \tau/2) f^*(\mu - \tau/2) \phi(\theta, \tau) d\mu d\tau d\theta. \quad (2)$$

С некоторой осторожностью, при  $\phi(\theta, \tau) = 1$  (распределение Вигнера [29]) последняя зависимость может быть интерпретирована как распределение энергии сигнала по времени и частоте [30]. Тем не менее, из-за своей квадратичной природы распределение Вигнера страдает кросс помехами, вызванным взаимным влиянием составляющих многокомпонентного сигнала, что приводит к «загрязнению» и неправильной интерпретации физических свойств сигнала. Choi и Williams [31] направлены улучшить распределения Вигнера (WD).

Подставляя ядро  $\phi(\theta, \tau) = e^{-\theta^2 \tau^2 / \sigma}$  в общий класс Коэна (2) и интегрируя по  $\theta$  получаем частотно-временное распределение Чои-Вильямса (CWD) в форме выражения (3):

$$w(t, \omega) = \frac{1}{4\pi^{3/2}} \iint \frac{1}{\sqrt{\tau^2 / \sigma}} e^{[-(u-t)^2 / 4r^2 / \sigma - j\tau \omega]} f(\mu + \tau/2) f^*(\mu - \tau/2) d\mu d\tau. \quad (3)$$

Если  $\sigma$  очень велико, то CWD приближается к «плоскому» распределению Вигнера. Как только  $\sigma$  снижается, кросс помехи уменьшаются [32].

Распределение Чжао-Атлас-Маркса Zhao–Atlas–Marks (ZAMD) [33] уменьшает кросс помехи, присутствующие в многокомпонентных сигналах. Оно имеет ядро, представленное уравнением (4), причем  $q$  является постоянным.

$$\phi(\theta, \tau) = g(\tau) \left| \tau \right| \frac{\sin(q\theta\tau)}{q\theta\tau}. \quad (4)$$

В результате спектр плотности мощности определяется зависимостью (5):

$$w(t, \omega) = \frac{1}{4\pi a} \int_{-\infty}^{+\infty} g(\tau) e^{-j\tau\omega} \int_{1-|\tau|a}^{1+|\tau|a} f(\mu + \tau/2) f^*(\mu - \tau/2) d\mu d\tau. \quad (5)$$

ZAMD полезен при моделировании небольших спектральных пиков и захвата нестационарных и многокомпонентных сигналов [32].

Formant анализ [33]. Формант представляет собой концентрацию акустической энергии вокруг определенной частоты акустической волны. Для анализируемой акустической волны, форманты распределены по частотным составляющим в спектрограмме. Известно [35,6], что при резке металла сигналы АЭ имеют мульти-частотные компоненты, либо связанные с самим процессом резки либо являются следствием различных аномальных событий при резании. Производительность частотно-временных методик, представлена на рис. 1 [7].

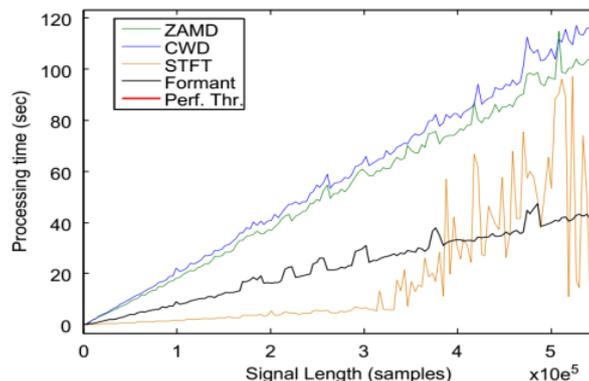


Рис. 1. Сравнительная производительность методов STFT, CWD, ZAMD и формант-анализа [31].

Одним из эффективных методов спектрального анализа является вейвлет-преобразование, преимущество которого заключается в возможности исследования нестационарных сигналов.

Коэффициенты вейвлет-преобразования имеют следующий вид [10,36,37]:

$$W_{\psi}(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (6)$$

где  $f(t)$  – случайный процесс,  $\psi(t)$  – выбранный анализирующий вейвлет,  $a \neq 0$  – параметр масштаба,  $b \geq 0$  – параметр сдвига.

В работах [8, 34, 37] приведены часто используемые на практике вейвлеты. Одним из первых и наиболее простых вейвлетов является дискретный вейвлет Хаара:

$$\psi(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < 1/2, \\ -1, & 1/2 \leq t < 1, \\ 0, & t \notin [0,1). \end{cases} \quad (7)$$

Исследованиями Сидорова [34] для токарной обработки установлено, что информативным параметром, характеризующим износ РИ, является дисперсия детализирующих коэффициентов вейвлет-разложения Хаара сигнала АЭ. Данный параметр является нечувствительным к изменениям режимов обработки. Минимальная длительность анализируемой выборки составляет 0,1 с. Идентификация износа РИ осуществляется по значению энергии детализирующих коэффициентов  $j$ -го порядка. Для разложения в базисе вейвлета Хаара целесообразно принять  $3 < j < 6$ . Прогноза износа РИ в реальном масштабе времени заключается в коррекции оценки базовой модели по результатам текущих измерений параметров сигнала АЭ путем добавления аддитивной составляющей, полученной на основе экстраполяции функции невязки. В работе [35] приводится адаптация предложенного метода для условий фрезерования путем автоматического оконного выделения фрагмента сигнала АЭ, приходящегося на зуб фрезы.

Основной недостаток вейвлета Хаара заключается в том, что он несимметричный и негладкий, а, следовательно, в частотной области возникает бесконечное чередование «лепестков» из-за резких границ во временной области.

Подобные недостатки отсутствуют у комплексного вейвлета Морле, имеющего хорошую разрешающую способность как по времени, так и по частоте.

$$\psi(t) = \exp(jkt) \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right), \quad (8)$$

где  $j$  – мнимая единица. При увеличении параметра  $k$  улучшается частотная разрешающая способность, а временная ухудшается и наоборот. Как правило, параметр  $k$  выбирают равным  $2\pi$  [37].

### 3. Экспериментальная апробация алгоритма моделирования износа инструмента при фрезеровании на основе вейвлетов Морле

В процессе эксперимента регистрировалась акустическая эмиссия и силовые параметры резания при попутном фрезеровании, боковой и торцевой поверхностью фрезы. Основными элементом измерительной системы для измерения усилий резания является пьезо-многокомпонентный динамометр фирмы Kistler (Швейцария), модель 9257B, установленный базе обрабатывающего центра Micron UCP 800. Аналогово частотный преобразователь LTR22 использовался для регистрации виброакустических сигналов с помощью датчика-микрофона ОКТАФОН-110.

Схема подключения экспериментальной установки для сбора данных представлена на рис. 3.

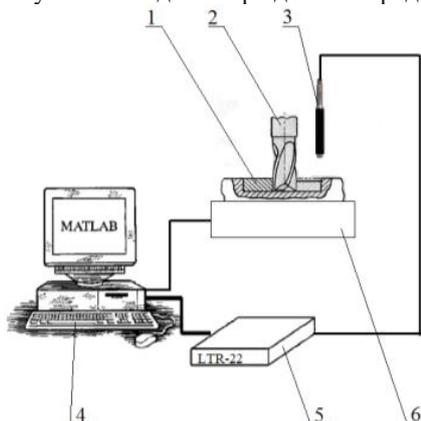


Рис. 2. Схема измерения параметров АЭ: 1 – образец, 2 – фреза, 3 – микрофон-виброметр, 4 – ПК с программным обеспечением, 5 – крейтовая система LTR22, 6 – динамометрический стол смонтированный на столе станка.

Инструментом являлась концевая 4-х зубая твёрдосплавная монолитная фреза фирмы Seco JHP 780120E2R15Q0Z4 – МБ4 диаметром 12 мм. В экспериментах использовались новые фрезы без износа и фрезы с изношенными зубьями, рис. 4.

Для исследования влияния глубины резания на параметры акустической эмиссии и стабильность методики идентификации износа, моделировался процесс обработки с переменным припуском. Обрабатываемый образец из

стали 45 представлял собой заготовку со ступенчатым увеличением припуска в процессе фрезерования (рис. 5). Специальная канавка на поверхности заготовки предназначена для имитации прерывистого резания.



Рис. 3. Фрезы для проведения исследования.

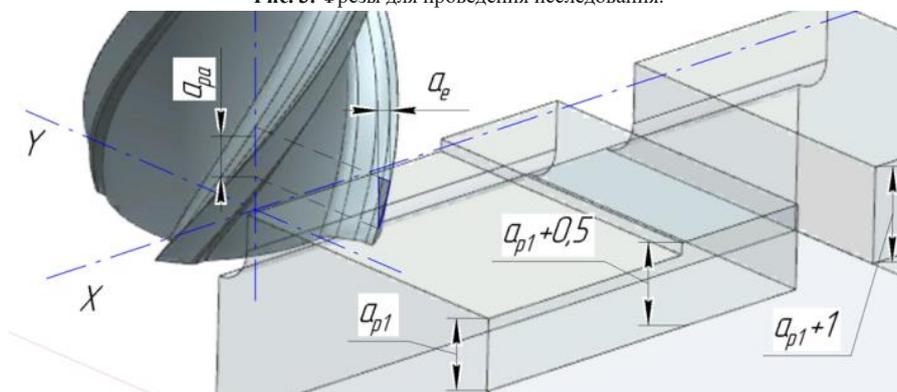


Рис. 4. Экспериментальный образец.

Режимы резания для проводимых опытов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Технологические параметры резания для материала Сталь 45

Скорость резания 50 м/мин

№ опыта	F, мм/зуб	$A_p$ , мм	$A_e$ , мм
1	0,05	2	0,2
2			0,3
3			0,4

#### 4. Результаты моделирования и их обсуждение

Пример ссылки на рисунок: рис. 1.

Для анализа процесса резания многозубым инструментом были использованы 6 различных сигналов АЭ. Сигналы, обозначенные номерами 1, 2, 3 и 28, 29, 30 соответствуют режимам таблицы 1 и получены при исследовании нового инструмента (а, б, в) и изношенного (г, д, е). На рис. 6 показан вейвлет-спектр, вычисленный по формуле (9):

$$w_{i,j} = |W_w(a_i, b_j)|^2, \quad (9)$$

где  $i = 0, \dots, N_a - 1$ ,  $j = 0, \dots, N_b - 1$ ,  $N_a$  – число масштабов,  $N_b$  – число сдвигов.

По оси X на графике вейвлет-спектра откладывается время в секундах, а по оси Y – частота в рад/с. Чем больше значение спектра, тем светлее рисунок.

На рис. 7 изображены скейлограммы анализируемых сигналов, которые были получены на основании вейвлет-спектра по зависимости:

$$y_i = \frac{1}{N_b} \sum_{j=0}^{N_b-1} w_{i,j}, \quad (10)$$

Синим цветом отображены скейлограммы сигналов, соответствующих состоянию нового инструмента, а красным – изношенного.

Анализ скейлограммы акустического сигнала показывает, что можно выделить 3 характерных максимума, локализованных в следующих частотных областях (в рад/с):  $\Delta\omega_{max} = [550, 750]$ ,  $\Delta\omega_{max} = [1200, 1500]$ .

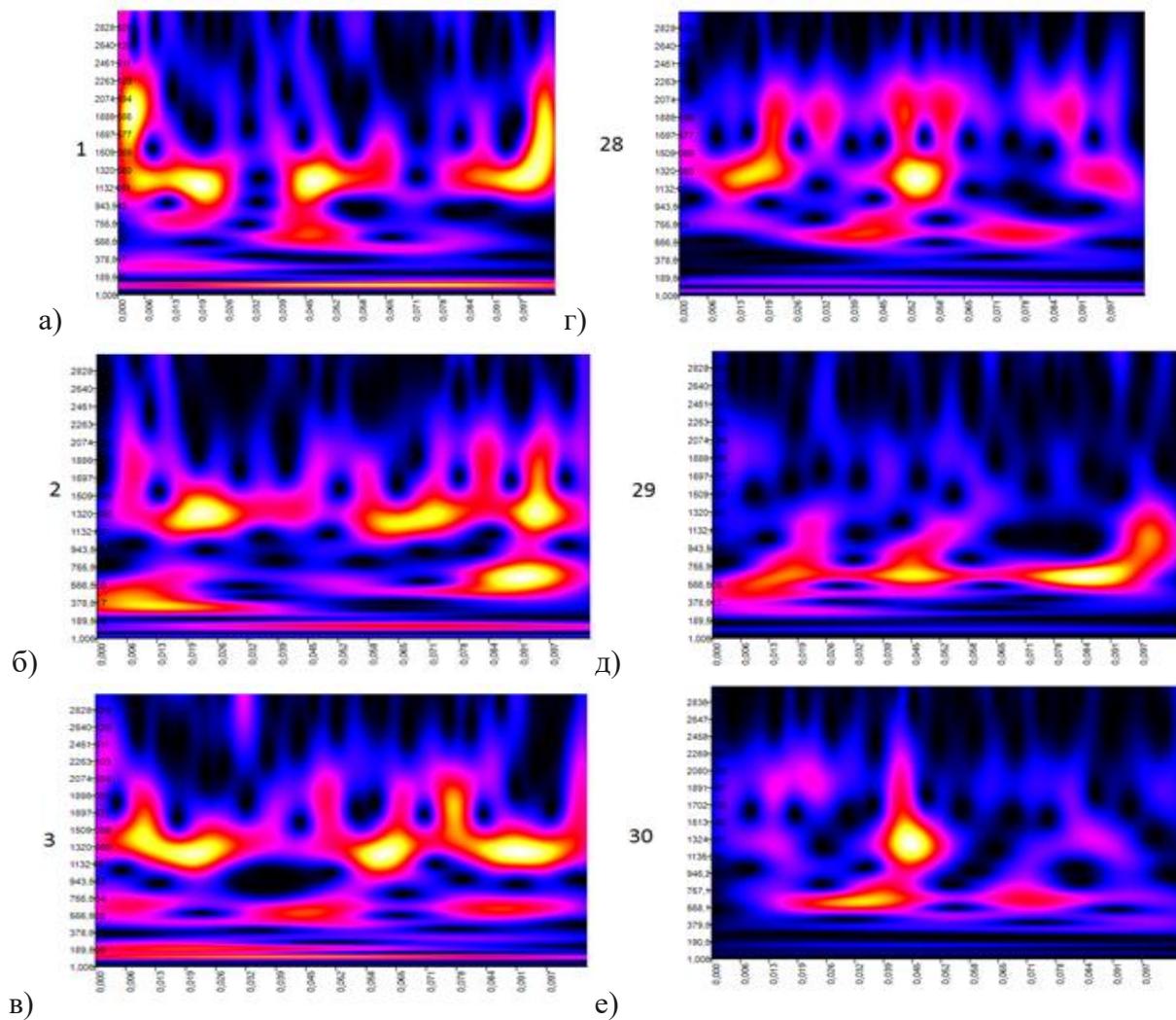


Рис.6. Вейвлет-спектр исследуемых сигналов.

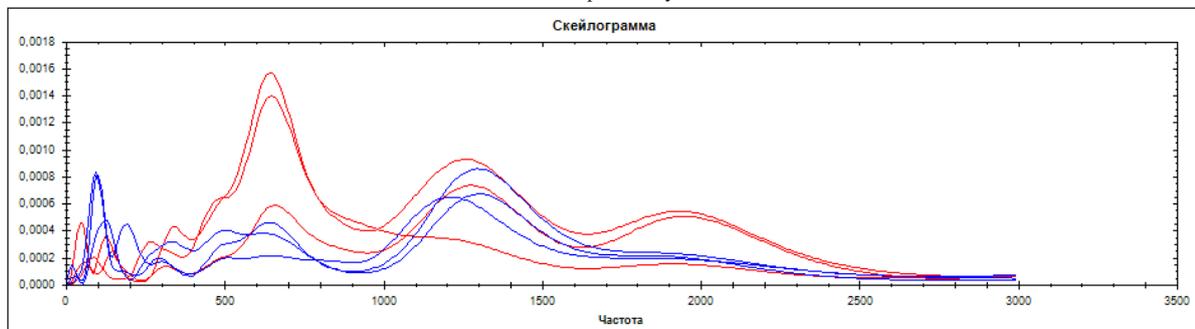


Рис.7. Скейлограммы исследуемых сигналов.

Для дальнейшего анализа по зависимости (9) были вычислены площади под кривыми скейлограмм  $S_{\Sigma}$  и площади локальных максимумов  $S_{\Delta\omega_{\max}}$ :

$$s = \Delta\omega \left( \frac{y_0 + y_{N-1}}{2} + \sum_{i=1}^{N-2} y_i \right), \quad (9)$$

где  $\Delta\omega$  – интервал дискретизации частоты,  $y$  – скейлограмма,  $N$  – число отсчетов скейлограммы.

Расчитанные величины сведены в таблицу 2.

Для анализа параметров обработки, в частности износа, авторами был применен новый критерий идентификации (10), представляющий собой крест-фактор  $CF_{\Delta\omega}$  спектральной плотности энергии в частотном диапазоне  $\Delta\omega_{\max} \subset \Delta\omega_{\Sigma}$  каждого локального максимума скейлограммы, построенной на интервале частот  $\Delta\omega_{\Sigma}$ .

$$CF_{\Delta\omega_{\max}} = \frac{\Delta\omega_{\Sigma}}{\Delta\omega_{\max}} \frac{\int_{\Delta\omega_{\max}} w_{i,j} d\omega}{\int_{\Delta\omega_{\Sigma}} w_{i,j} d\omega}. \quad (10)$$

**Таблица 2.** Площади локальных максимумов скейлограммы

Диапазон частот локальных максимумов $\Delta\omega_{\max}$ , рад/с	$S_{\Delta\omega_{\max}}(t_0)$ - новый инструмент			$S_{\Delta\omega_{\max}}(t_d)$ - изношенный инструмент		
	Режим 1	Режим 2	Режим 3	Режим 1	Режим 2	Режим 3
550-750	0,06213	0,0823	0,13359	0,17766	0,62313	0,44226
1200-1500	0,44037	0,31129	0,54264	0,32205	0,09416	0,44105
1950-2100	0,10634	0,09448	0,12908	0,31057	0,09919	0,351
Суммарная площадь скейлограммы $S_{\Sigma}$	0,62765	0,65945	0,77467	0,88101	0,80046	1,32121

Для идентификации износа рассматривались отношения (11):

$$k_{\Delta\omega_{\max}} = \frac{CF_{\Delta\omega_{\max}}(t_0)}{CF_{\Delta\omega_{\max}}(t_d)}, \quad (11)$$

где  $t_0$  – время, соответствующее работе инструмента без износа,  $t_d$  – время, соответствующее работе изношенным инструментом.

В соответствии с данными таблицы 2 и зависимостями (9-11) расчет коэффициента идентификации износа можно производить по формуле:

$$k_{\Delta\omega_{\max}} = \frac{s_{\Sigma}(t_d) \cdot s_{\Delta\omega_{\max}}(t_0)}{s_{\Sigma}(t_0) \cdot s_{\Delta\omega_{\max}}(t_d)}. \quad (12)$$

Значения коэффициента износа  $k_{\Delta\omega_{\max}}$  для 3-х исследованных режимов представлены в таблице 3.

**Таблица 3.** Значения коэффициента износа

Диапазон частот локальных максимумов, $\Delta\nu_{\max}$ рад/с	Режим 1	Режим 2	Режим 3
	$\Delta\omega_{low}$ 550-750	0,491	0,160
$\Delta\omega_{mid}$ 1200-1500	1,919	4,013	1,626
$\Delta\omega_{hi}$ 1950-2100	0,481	1,156	0,486

Анализ данных, представленных в таблице 3, позволят увидеть характерную особенность: В области низких частот (550-750 рад/с) по мере износа инструмента  $k_{\Delta\omega_{\max}}$  уменьшается, а в области условно средних частот (1200-1500 рад/с) – увеличивается.

Выявленная закономерность позволяет сформулировать условие возникновения критической величины износа при обработке многозубым инструментом:

$$\begin{cases} k_{\Delta\omega_{\max}}(t) \leq k_{low}, & \Delta\nu_{\max} = \Delta\nu_{low}, \\ k_{\Delta\omega_{\max}}(t) \geq k_{mid}, & \Delta\nu_{\max} = \Delta\nu_{mid}, \end{cases} \quad t < t_d, \quad (13)$$

где  $k_{low}, k_{mid}$  – предельные значения коэффициента идентификации износа соответственно для низкого и среднего частотного диапазона.

Иными словами, по мере износа режущего инструмента спектральная плотность энергии вейвлет-образа Морле в области низких частот  $\Delta\omega_{low}$  увеличивается ( $k_{\Delta\omega_{\max}}$  убывает), а в области средних частот  $\Delta\omega_{mid}$  – уменьшается ( $k_{\Delta\omega_{\max}}$  возрастает).

## 5. Заключение

Апробирован метод идентификации износа многозубого режущего инструмента по по сигналу виброакустической эмиссии с помощью анализирующих вейвлетов Морле. Анализ скейлограмм вейвлет-образов сигнала на различных режимах обработки выявил устойчивые частотные области локальных максимумов – 550-750 рад/сек, 1200-1500 рад/сек и 1950-2100 рад/сек. Для первого и второго частотного диапазона выявлены тренды к изменению спектральной плотности энергии по мере износа инструмента. Численной характеристикой этого изменения может служить кросс-фактор  $CF_{\square\omega_{\max}}$ , определяемый зависимостью (10) и равный отношению средней спектральной плотности энергии сигнала в частотном диапазоне локального максимума скейлограммы к средней спектральной плотности энергии во всем частотном диапазоне разрешения скейлограммы. Для идентификации величины износа был предложен новый коэффициент  $k_{\square\omega_{\max}}$  (11, 12) равный отношению кросс-факторов сигналов акустической эмиссии для нового и изнашиваемого инструмента соответственно. В области низких частот значение коэффициента идентификации износа с

ростом размерного износа также возрастает, в области средних частот – убывает. Выявленная экспериментально закономерность изменения величины коэффициента идентификации износа, позволила формализовать модель износа инструмента, с критериальными ограничениями по зависимости (13).

## Литература

- [1] Machining Data Handbook, Machinability Data Center, Cincinnati, OH, 1980.
- [2] Armarego, E.J.A., Brown, R.H. The Machining of Metals, Prentice-Hall Inc., New Jersey, 1969.
- [3] M. RahmanSeah, W.K.H., Teo, T.T. The machinability of Inconel 718, Journal of Materials Processing Technology 63 (1997) 199–204.
- [4] Shaw, M.C. Metal Cutting Principles, Oxford University Press, Oxford, 2005.
- [5] Trent, E.M. Metal Cutting, second ed., Butterworths, London, 1984.
- [6] Астафьева, Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения / Н.М. Астафьева // Успехи физических наук. – 1996. – Том 166, № 11. – С. 1145-1170.
- [7] Витязев, В.В. Вейвлет-анализ временных рядов: учебное пособие / В.В. Витязев. – СПб: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2001. – 58 с.
- [8] Добеши, И. Десять лекций по вейвлетам / И. Добеши. – Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 464 с.
- [9] Короновский, А.А. Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения / А.А. Короновский, А.Е. Храмов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 176 с.
- [10] Малла, С. Вейвлеты в обработке сигналов : пер. с англ / С. Малла. – М. : Мир, 2005. – 671 с.
- [11] Axinte, D.A., Andrews, P. Some considerations on tool wear and workpiece surface quality of holes finished by reaming or milling in a nickel base superalloy, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 221 (2007) 591–603.
- [12] Axinte, D.A., Dewes, R.C. Surface integrity of hot work tool steel after highspeed milling-experimental data and empirical models, Journal of Materials Processing Technology 127 (2002) 325–335.
- [13] Axinte, D.A., Gindy, N., Fox, K., Unanue, I. Process monitoring to assist the workpiece surface quality in machining, International Journal of Machine Tools and Manufacture 44 (2004) 1091–1108.
- [14] Beggan, C., Woulfe, M., Young, P., Byrne, G. Using acoustic emission to predict surface quality, International Journal of Advanced Manufacturing Technology 15 (1999) 737–742.
- [15] Mantle, A.L., Aspinwall, D.K. Surface integrity of a high speed milled gamma titanium aluminide, Journal of Materials Processing Technology (2001) 143–150.
- [16] Sharman, A.R.C., Aspinwall, D.K., Dewes, R.C., Bowen, P. Workpiece surface integrity considerations when finish turning gamma titanium aluminide, Wear 249 (2001) 473–481.
- [17] Choudhury, I.A., El-Baradie, M.A. Machinability assessment of Inconel 718 by factorial design of experiment coupled with response surface methodology, Journal of Materials Processing Technology 95 (1999) 30–39.
- [18] Everson, C.E., Cheraghi, S.H. Application of acoustic emission for precision drilling process monitoring, International Journal of Machine Tools and Manufacture 39 (1999) 371–387.
- [19] Axinte, D., Axinte, M., Tannock, J.D.T. A multicriteria model for cutting fluid evaluation, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 217 (2003) 1341–1353.
- [20] Aspinwall, D., Dewes, R., Ng, E., Sage, C., Soo, S. The influence of cutter orientation and workpiece angle on machinability when high-speed milling Inconel 718 under finishing conditions, International Journal of Machine Tools and Manufacture 47 (2007) 1839–1846.
- [21] Toenshoff, H.K., Ianasaki, I. Sensors in Manufacturing, Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim, 2001.
- [22] Menon, A.K., Boutaghou, Z.-E. Time–frequency analysis of tribological systems—part II: tribology of head-disk interactions, Tribology International 31 (1998) 511–518.
- [23] Menon, A.K., Boutaghou, Z.-E. Time–frequency analysis of tribological systems—part I: implementation and interpretation, Tribology International 31 (1998) 501–510.
- [24] Cohen, L. Time–Frequency Analysis, Prentice-Hall, New Jersey, 1995.
- [25] Lee, S.U., Robb, D., Besant, C. The directional Choi–Williams distribution for the analysis of rotor-vibration signals, Mechanical Systems and Signal Processing 15 (2001) 789–811.
- [26] Wigner, E.P. On the quantum correlation for thermodynamic equilibrium, Physics Review 40 (1932) 749–759.
- [27] W, P.R., Hammond, J.K. The analysis of non-stationary signals using time–frequency methods, Journal of Sound and Vibration (1996).
- [28] Choi, H.-I., Williams, W.J. Improved time–frequency representation of multicomponent signals using exponential kernels, IEEE/ASME Transactions on Acoustics, Speech and Signal processing 37 (1989) 862–871.
- [29] Хвостиков, А.С., Щетинин, В.С. Диагностирование процессов резания с помощью Вейвлет-анализа сигнала акустической эмиссии. / А.С. Хвостиков // Цифровая обработка сигналов. – 2007. – Том №4. – С. 40-43.
- [30] Yunxin Zhao, L.E.A., Robert, J. Marks, II. The use of cone-shaped kernels for generalized time–frequency representations of nonstationary signals, IEEE/ASME Transactions on Acoustics, Speech and Signal processing 38 (1990) 1084–1091.
- [31] Weston, R.H. A formant detection system in which signal coding properties of a neuron network are used, Journal of Sound and Vibration 40 (1975) 191–217.
- [32] Sidorov, A.S. Monitoring i prognozirovanie iznosa rezhushchego instrumenta v mekhatronnykh stanochnykh sistemakh [Monitoring and forecasting tool wear in mechatronic machine systems], Abstract of dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences, Ufa, 2007.
- [33] Pechenin, V.A. et al. Method of controlling cutting tool wear based on signal analysis of acoustic emission for milling, Dynamics and Vibroacoustics of Machines (DVM2016)
- [34] Ramakrishna Rao, P.K., Prasad, P., Srinivasa Pai P., Shantha V. Acoustic emission technique as a means for monitoring single point cutting tool wear, 2000
- [35] Marinescu, D. Axinte A time–frequency acoustic emission-based monitoring technique to identify workpiece surface malfunctions in milling with multiple teeth cutting simultaneously / International Journal of Machine Tools & Manufacture 49 (2009) 53–65
- [36] Richard, Y., Chiou, A., Steven, Y. Liang, B. Analysis of acoustic emission in chatter vibration with tool wear effect in turning //International Journal of Machine Tools & Manufacture 40 (2000)
- [37] Постников, Е.Б. Вейвлет-преобразование с вейвлетом Морле: методы расчета, основанные на решении диффузионных дифференциальных уравнений / Е.Б. Постников // Компьютерные исследования и моделирование. – 2009. – Том 1, №1. – С. 5-12.
- [38] Яковлев, А.Н. Введение в вейвлет-преобразования: Учеб. Пособие / А.Н. Яковлев. – Новосибирск: Издательство НГТУ, 2003. – 104 с.