УДК 621.9

И.Л. Лаптев[1], Д.А. Шатагин[1], С. В. Серый[2], Е.Н. Бурдасов[2]

ФРАКТАЛЬНЫЙ И ВЭЙВЛЕТ-АНАЛИЗ ПРИ ДИАГНОСТИКЕ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ И ИЗНОСА ИНСТРУМЕНТА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева[1],
Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет[2]

Разработана методика диагностики износа инструмента и устойчивости процесса резания на основе фрактального анализа виброакустического сигнала. Выявлена связь степени износа инструмента с величиной фрактальной размерности акустического сигнала при резании.

Ключевые слова: резание, износ инструмента, диагностика, фрактальная размерность.

Динамические процессы при резании существенно определяют износ режущего инструмента, точность и качество механообработки. Изнашивание инструмента, в свою очередь, инициирует рост амплитуды автоколебаний при резании [1–2].

В работе [1] изложен новый подход к моделированию динамических процессов при резании, на основе качественной теории дифференциальных уравнений и фрактального анализа. В результате предложена новая характеристика процесса резания, характеризующая ее динамическую устойчивость в контексте эволюции – фрактальная размерность. Теория фракталов, наряду с качественной теорией динамических систем, является основой нового направления в теории синергетики – нелинейной динамики.

Моделирование и нелинейная динамика

Наиболее распространенным способом моделирования уравнений, описывающих реальные динамические системы, ее эволюционное развитие, является так называемый «прямой подход», изложенный в работах [4, 5].

Применяя этот подход к моделированию динамических процессов или систем, разрабатывается обобщенная математическая модель. Затем составляются уравнения (обычно дифференциальные), определяющие взаимосвязь динамических характеристик исследуемого процесса. Учитывая параметры (физические, механические, термодинамические, структурные и т.д.) моделируемого процесса, определяются условия адекватности уравнений и налагаются соответствующие ограничения. Важно также максимально точно и подробно описать физику процесса при помощи системы уравнений, отразить все взаимосвязи множества динамических параметров, участвующих в процессе.

В результате этим способом моделирования получают математическую модель. Как показывает практика такого моделирования, предполагаемая модель получается громоздкой и мало удобной в практическом применении. При этом результат использования такой модели не обязательно точен в силу того, что приходится пренебрегать многими, малозначащими на первый взгляд параметрами, или упрощать их описание, основываясь на собственной интуиции.

Дополнительные неточности возникают также потому, что абсолютно все величины, участвующие в динамическом процессе и влияющие на работу системы, учесть невозможно. В этом состоит главная проблема данного подхода к моделированию. Также дополнительные проблемы использования модели создает тот факт, что идентичные по начальным параметрам динамические процессы, запущенные на одинаковом оборудовании, на практике ведут себя по-разному. Это связано с тем, что в реальности не существует двух абсолютно одинаковых динамических систем, они различаются и эти небольшие различия приводят к разнице в поведении [4].

Кроме того, существует проблема практического применения таких моделей, так как их программная реализация зачастую сложна [4], что связано в основном с неинтегрируемостью таких систем дифференциальных уравнений, входящих в модель. Последнее обстоятельство обусловило разработку Пуанкаре и Андроновым [4] качественной теории дифференциальных уравнений.

Изучение эволюционного поведения системы при моделировании можно проводить вне зависимости от их физического содержания. Как уже отмечалось ранее, отличительные черты поведения таких систем – это свойства универсальности и самоподобия, наличие параметров порядка и их смена при самоорганизации системы, т.е. при образовании новых структур (неоднородностей), возникающих вследствие потери системой устойчивости в некоторых локальных областях. Дальнейшая эволюция системы в этих локальных областях, а также потеря устойчивости развиваются по бифуркационному сценарию, переход системы через динамический хаос ведет к возникновению неоднородности и самоорганизации ее отдельных частей.

Принципиальным для эволюции большинства динамических систем является наличие диссипативных процессов: вязкости, диффузии, теплопроводности (добавим, пластичности и накопления повреждений и разрушения). Они позволяют системам «забывать» начальные данные и независимо от их «деталей» формировать с течением времени одни и те же или похожие стационарные распределения изучаемых переменных. Но также именно наличие нелинейных диссипативных процессов обеспечивает, с одной стороны, нелинейные связи в системе, а с другой стороны, регулирует либо развитие в среде неустойчивостей, либо переход к устойчивому равновесному состоянию в зависимости от конкурирующего воздействия извне.

Согласно работам И. Пригожина [5], поток тепла или вещества в открытой системе, т.е. внешнее воздействие, заставляющее систему более интенсивно диссипировать подводимую энергию, «является связью в том смысле, что без него система бы эволюционировала к равновесию».

Одним из центральных вопросов нелинейной динамики является проблема параметров порядка [6]. Ответ на вопрос о том, какие именно переменные для исследуемой системы будут параметрами порядка и каков алгоритм их смены – важнейший этип при ее моделировании. Сценарий проникновения в хаос через последовательности бифуркаций определяется особыми свойствами нелинейных уравнений, что составляет другую важную отличительную черту нелинейной динамики.

Для выявления сути нелинейных явлений, а также и нелинейных уравнений бифуркационный сценарий приобретает фундаментальное значение. Сама возможность динамического хаоса, сценарии, по которому порядок переходит в хаос, выявили общие универсальные свойства сложных динамических систем и процессов. Конкретный вид перехода к хаосу не является принципиальным. Фундаментальное значение здесь имеет природа границ между областями притяжения – различными зонами притяжения аттракторов.

Центры этих зон притяжения – аттракторы – ведут борьбу за влияние на плоскости (любая начальная точка X_0 в течение процесса либо приходит к тому или другому центру, либо «лежит» на границе области и не может принять определенное значение). С изменением управляющего параметра меняются как сами области притяжения, так и границы. В случае фрактальной структуры границ областей притяжения соответствующий аттрактор называется *странным*. Важно здесь иметь в виду, что в любой системе всегда идет борьба, своеобразная конкуренция, между равновесием и бифуркационным, хаотическим неустойчивым поведением. Следовательно, определяющие нелинейные уравнения должны быть записаны как эволюционные уравнения – в релаксационной форме.

Из изложенного ясно, что моделирование, воспроизводящее эволюцию систем по законам синергетики, т.е. нелинейной динамики, должно опираться на систему нелинейных уравнений, учитывающих диссипацию. Определяющие уравнения, записанные в релаксационной форме, должны ввести в рассмотрение конкурирующие процессы во временном аспекте.

В динамических системах различие пространственно-временных масштабов слишком велико. Достаточно сравнить характерные времена и масштабы микроскопических процессов, ограниченные временами порядка $10^{-3} \div 10^{-7}$ с.

Характерные времена релаксации в станочной системе могут меняться уже на порядки и необходимое время расчетов эволюции системы катастрофически возрастает.

Эволюция системы во времени обеспечивается также взаимодействиями – положительными и отрицательными обратными связями – между макроскопическими переменными X_i и так называемыми управляющими параметрами λ [5], которые входят в эволюционные уравнения вида

$$\frac{\partial X_i}{\partial t} = F_i(\{X\},\lambda). \tag{1}$$

Управляющие параметры в уравнении (1) связаны с «внешним миром». Другими словами, они существенно связаны с внешними воздействиями и ограничениями, т.е. обусловлены взаимодействиями системы с окружающей средой, например, определяются условиями нагружения, т.е. скоростью подвода энергии к системе. Частный вид такого эволюционного уравнения (1):

$$\frac{dX}{dt} = \lambda - KX. \tag{2}$$

Равновесие или стационарное состояние достигается при

$$\lambda - KX = 0. \tag{3}$$

Это динамическое равновесие обусловлено внешними воздействиями, с одной стороны, и способностью системы диссипировать подводимую к ней энергию, с другой.

Таким образом, прямой подход к моделированию обладает рядом существенных недостатков:

- не является универсальным,
- обладает узкими рамками применимости,
- сложностью учета всех динамических величин, участвующих в процессе,
- сложность практического применения,
- не учитывает индивидуальных особенностей моделируемой системы.

Эффективным альтернативным подходом к исследованию и моделированию нелинейных процессов является «обратный подход». Он основывается на применении методов и алгоритмов нелинейной динамики – науки, изучающей структуру и свойства эволюционных процессов в нелинейных динамических системах и обладающей развитым математическим аппаратом для исследования и анализа реальных динамических систем. При этом для моделирования динамических процессов не обязательно знать внутреннюю структуру исследуемого объекта, достаточно иметь наблюдаемую реализацию какого-либо сигнала, в котором заложена динамика процесса, например, виброакустической эмиссии [1].

В настоящей работе исследовалась динамика станочной системы на основе результатов, полученных при снятии сигнала виброакустической (ВА) эмиссии со станка в процессе резания инструментом, имеющим различную степень износа. При исследовании динамики процесса резания на основе «обратного подхода» были применены следующие виды анализа сигналов ВА: фрактальный, вэйвлет-анализ и классический спектральный анализ сигналов.

Применение фрактального анализа при механообработке

Фрактальный анализ в последнее время является достаточно распространенным видом анализа при решении подобного класса задач, применение этого вида анализа подробно изложено в [1].

Применение вейвлет-анализа при механообработке

Одна из главных идей представления сигналов на различных уровнях разложения (декомпозиции) заключается в разделении функции приближения к сигналу на две группы: аппроксимирующую – грубую, с достаточно медленной временной динамикой изменения, и детализирующую – с локальной и быстрой динамикой изменения на фоне плавной динамики, с последующим их дроблением и детализацией на других уровнях декомпозиции сигналов. *Новое направление цифровой обработки сигналов – вэйвлет-анализ, делает это возможным как во временной, так и в частотной областях представления сигналов в режиме реального времени.*

Рассмотрим преимущества вэйвлет-анализа на примере классического подхода к анализу сигналов – расчет амплитудно-фазовых частотных характеристик (АФЧХ) на основе разложения на ряды Фурье.

Преобразование Фурье является классическим методом частотного анализа сигналов, суть которого возможно выразить формулой:

$$C(\omega)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty} y(t)\cdot e^{-i\omega t}dt. \qquad (4)$$

Преобразование Фурье представляет сигнал, заданный во временной области, в виде разложения по ортогональным базисным функциям (синусам и косинусам), выделяя таким образом частотные компоненты, результат преобразования Фурье – амплитудно-частотный спектр по которому можно определить присутствие некоторой частоты в исследуемом сигнале. Недостаток преобразования Фурье заключается в том, что частотные компоненты не могут быть локализованы во времени, что накладывает ограничения на применимость данного метода к ряду задач (например, в случае изучения динамики изменения частотных параметров сигнала на временном интервале).

В случае, когда не ставится вопрос о локализации временного положения частот, метод Фурье дает хорошие результаты. Но при необходимости определить временной интервал присутствия частоты приходится применять другие методы.

Вэйвлет-анализ [7–9] не обладает подобного рода недостатками – здесь можно локализовать любую частоту в любой момент времени. Поэтому, в настоящее время вэйвлет-анализ является доминирующим подходом к исследованию нестационарных сигналов такого типа, в режиме реального времени.

Основная область применения вэйвлет-преобразований – анализ и обработка сигналов и функций, нестационарных во времени или неоднородных в пространстве, когда результат анализа должен содержать не только общую частотную характеристику сигнала (распределение энергии сигнала по частотным составляющим), но и сведения об определенных локальных координатах, на которых проявляют себя те или иные группы частотных составляющих сигнала.

Идея применения вэйвлетов для многомасштабного анализа заключается в том, что разложение сигнала производится по базису, образованному сдвигами и разномасштабными копиями функции-прототипа. Сигнал анализируется путем разложения по этим функциям, полученным из некоторого прототипа путем сжатий, растяжений и сдвигов. Такая базисная функция называется *вэйвлетом* [8].

Сверка сигнала с вэйвлет-функцией позволяет выделить характерные особенности сигнала в области локализации этого вэйвлета, причем, чем больший масштаб имеет вэйвлет, тем более широкая область будет оказывать влияние на результат свертки. Вэйвлет-преобразование одномерных сигналов обеспечивает двумерную развертку, при этом частота и координата рассматриваются как независимые переменные, что дает возможность анализа сигналов сразу в двух пространствах.

По сравнению с разложением сигнала на ряды Фурье, вэйвлеты способны с гораздо более высокой точностью представлять локальные особенности сигналов, вплоть до разрывов первого рода (скачков). Благодаря хорошей приспособленности к анализу нестационарных сигналов вэйвлет-преобразование стало мощной альтернативой преобразованию Фурье.

Различают дискретный и непрерывный вэйвлет-анализ, аппарат которого можно применять как для непрерывных, так и для дискретных сигналов.

Очевидно, идея использовать вэйвлет-преобразование для обработки дискретных данных является весьма привлекательной (дискретизация данных необходима, например, при обработке на ЭВМ).

Как известно [8], алгоритм вэйвлет-преобразования имеет фрактальный характер. Идея применения вэйвлетов для многомасштабного анализа заключается в том, что разложение сигнала производится по базису (вэйвлет), образованному сдвигами и разномасштабными копиями функции-прототипа на основе его подобия с анализируемым участком сигнала – то есть вэйвлет-преобразование по своей сути является фрактальным.

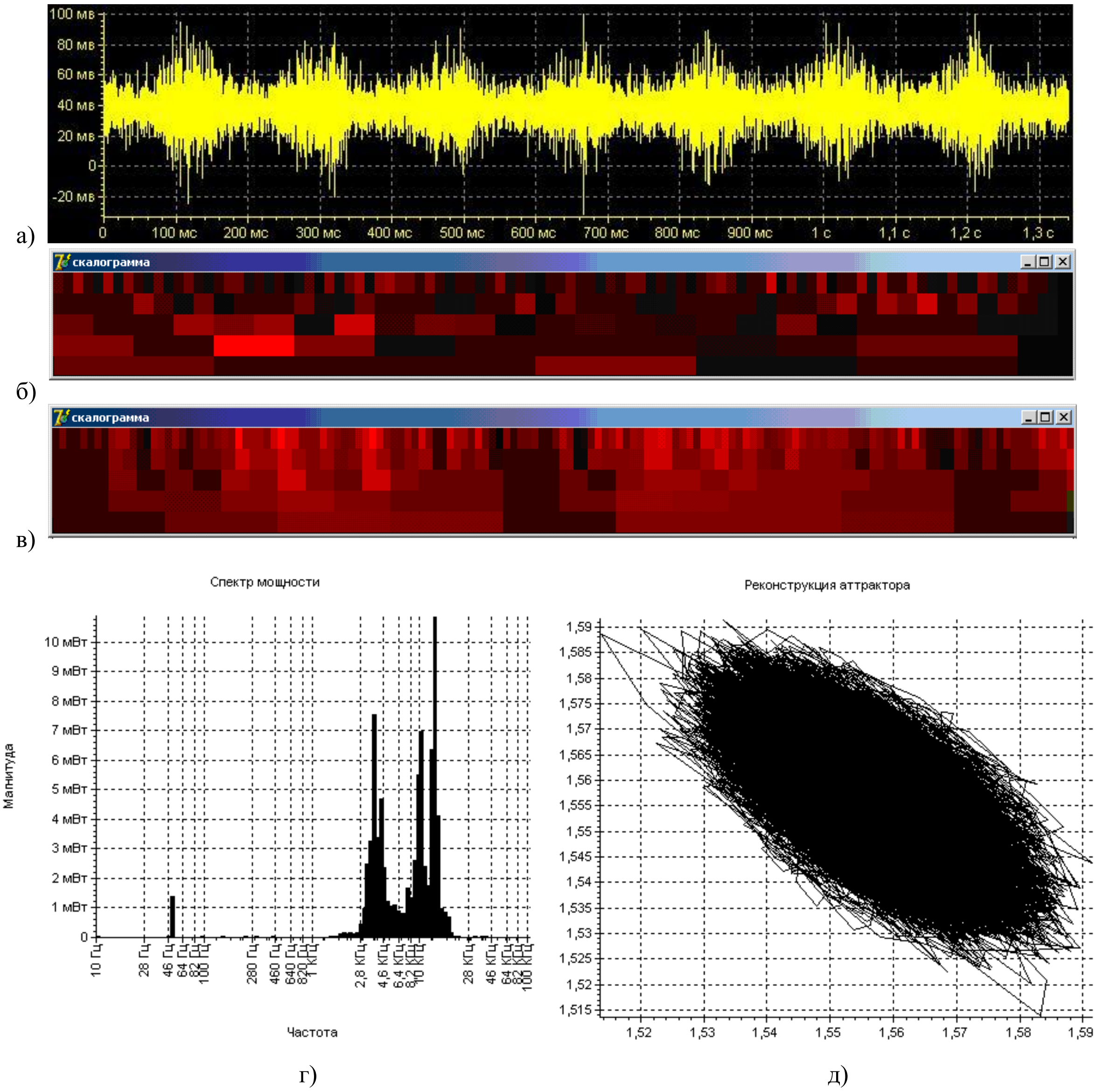

Рис. 1. Данные при параметрах: Сталь45, Т15К6, *D*=93.5, *s*=0.11, *t*=0.75, *n*=315, h_z=0мм:
а – осциллограмма; *б* - вэйвлет-скалограмма; *в* - фрактальная скалограмма;
г – спектр сигнала; *д* - аттрактор

Алгоритм фрактального анализа ВА сигнала аналогичен алгоритму поиска коэффициентов вэйвлет-преобразований за исключением того, что в качестве базиса берется не заведомо известная функция (вэйвлет), а участок временного ряда, над которым в процессе работы алгоритма призводятся те же самые операции, что и над вэйвлет-функцией – масштабирование, параллельный перенос и т.д.

Общий алгоритм фрактального анализа сигнала:

- берется произвольный участок исходных данных;
- к этому участку применяется некоторое преобразование (обычно это афинные преобразования – сдвиг, сжатие, растяжение);
- далее, измененным участком покрывается весь временной ряд;
- в каждой точке временного ряда ищутся коэффициенты подобия исходного участка – текущему (обычно по методу наименьших квадратов);

- далее за исходный участок берется следующая часть временного ряда, и алгоритм повторяется с первого пункта;
- в итоге исследователь получает набор коэффициентов подобия и видит тем самым распределение степени подобия (его фрактальных свойств) по временному ряду в каждой его точке.

Следует указать, что алгоритмы фрактального и вэйвлет-анализа успешно используются также для сжатия данных, так как коэффициенты фрактальных- и вэйвлет-преобразований занимают на несколько порядков меньший размер, чем исходные данные.

Как показали исследования, при нулевом износе режущего инструмента (h_z=0) путем применения фрактального и вэйвлет-анализа (рис. 1) было выявлено, что на скалограммах (рис. 1, *б*, *в*) компоненты на всем спектре частот ярко выделены, хорошо прослеживается периодичность сигнала, что соответствует визуальной картине колебаний на осциллограмме. Мощность сигнала распределена по средней части спектра частот.

При незначительном износе h_z=0.15мм происходит смещение спектра доминирующих частот в сторону более высокочастотных компонент (рис. 2). Визуальная картина на скалограммах в области низких частот получается более размытой, чем при нулевом износе.

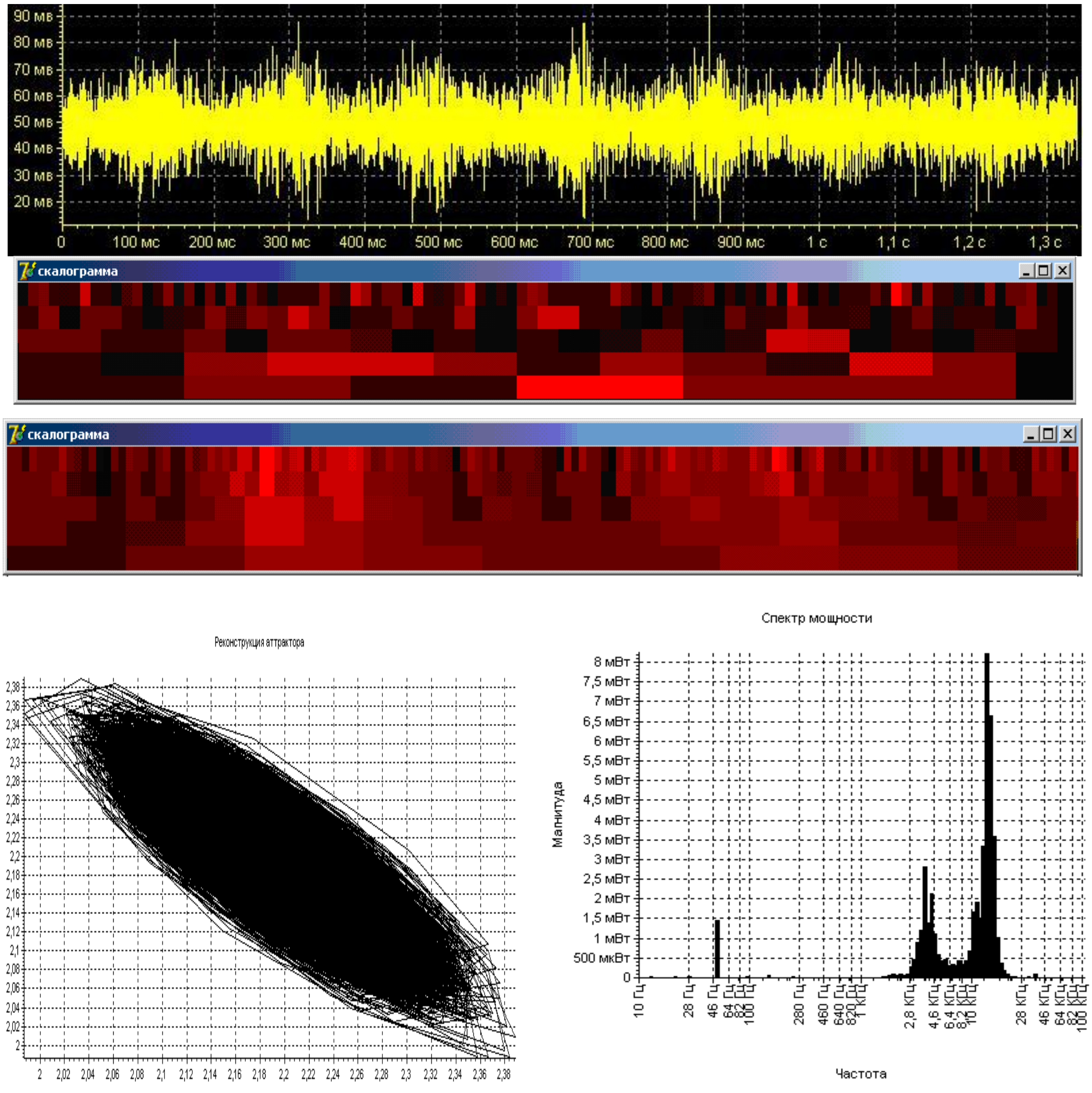

Рис. 2. Данные при параметрах: Сталь45, Т15К6, *D*=92.0, s=0.11, *t*=0.75, *n*=315, h_z=0.15мм

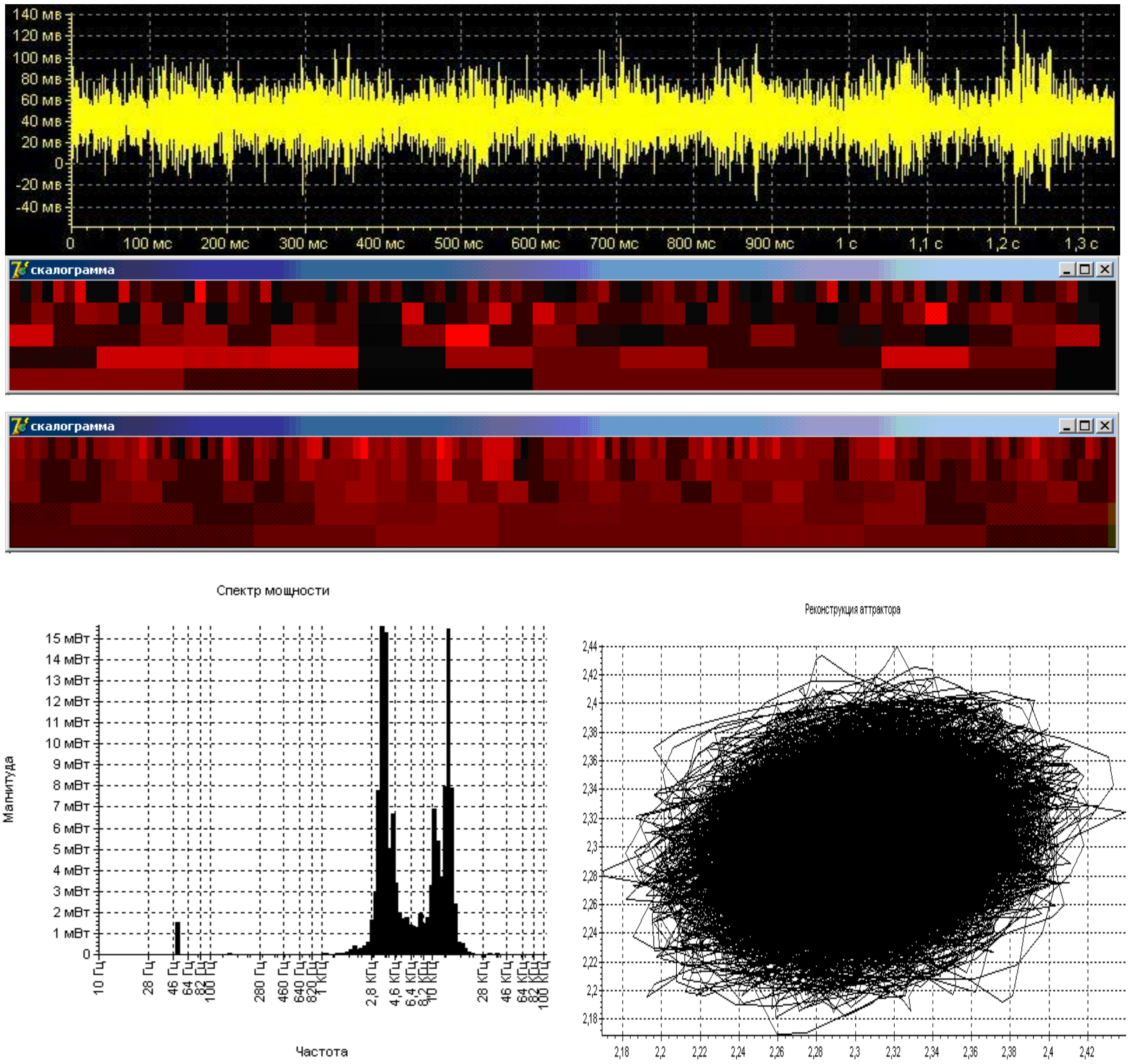

Рис. 3. Данные при параметрах: Сталь45, Т15К6, *D*=92.0, *s*=0.11, *t*=0.75, *n*=315, h_z=0.5мм

С увеличением износа до *hz*=0.5мм наблюдается та же самая закономерность, выделяются все более высокие частоты, которые характеризуют шумовые составляющие при заданной степени износа (рис. 3). Особенно хорошо это заметно на вэйвлет-скалограмме.При катастрофическом износе h_z=1.1мм, картина получается еще более размытой, практически вся мощность сигнала приходится на высокие частоты, доминируют шумовые высокочастотные компоненты (рис. 4), информация в сигнале, характеризующая сам процесс резания слабо выражена.

При повышении степени износа инструмента происходит потеря полезных свойств сигнала, а именно – искажение и утрата информации о динамике процесса механообработки, за счет увеличения влияния на сигнал шумовых компонент.

С увеличением износа инструмента меняется энергетика сигнала – при параметрах износа, близких к катастрофическому, основная мощность сигнала приходится на высокочастотные шумовые компоненты, что свидетельствует об отсутствии процесса резания как такового, а поступающая от резца энергия затрачивается на поверхностное упрочнение заготовки и нагрев. Внешний вид аттрактора не меняется, однако с ростом износа увеличивается масштаб аттрактора динамической системы резания.

Исследования показывают, что при увеличении износа инструмента компоненты сигнала (2,5-3,5 кГц), характеризующие процесс резания, принимают более сглаженный характер, но при этом появляются высокочастотные всплески (это особенно хорошо заметно на фрактальной скалограмме), что свидетельствует о повешении уровня зашумленности. В тоже время на вейвлет-скалограмме видно, что при увеличении износа инструмента спектр частот, характеризующих резание, расширяется, мощность его увеличивается. Расширение спектра говорит о повышении энергии виброакустического сигнала и соответственно об увеличении энергии разрушения и дальнейшем увеличении степени износа. При этом значение доминирующей частоты не меняется и составляет 2,8-3,2 кГц, но существенно меняется ее мощность (рис. 5). Для подтверждения изложенных выводов был проведен анализ фрактальной размерности на различных стадиях износа режущего инструмента. Как известно, фрактальная размерность показывает хаотичность состояния системы, т.е. уровень её нестабильности [1].

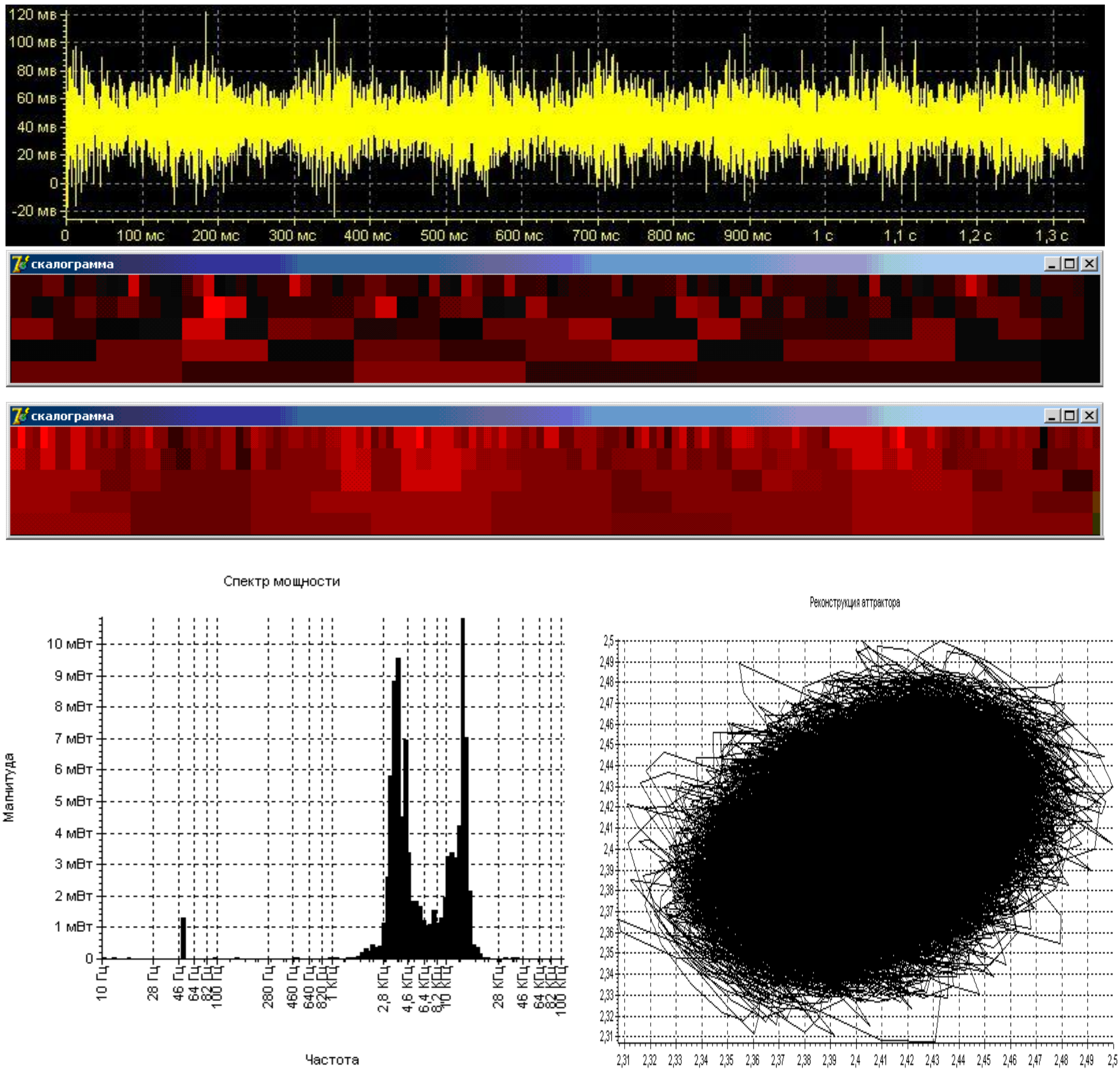

Рис. 4. Данные при параметрах: Сталь45, Т15К6, *D*=92.0, *s*=0.11, *t*=0.75, *n*=315, h_z=1.1 мм

Как видно из приведенного графика, с увеличением износа инструмента происходит увеличение действительного значения фрактальной размерности. С увеличением износа инструмента хаотичность динамики процессарезания также увеличивается, прослеживается корреляция между этими характеристиками. Устойчивое движение системы резания *обусловлено самоорганизацией процессов пластической деформации в приконтактных слоях стружки.*

На практике приведенные результаты предполагается использовать путем разработки диагностической методики, основанной на текущей оценке степени износа на базе фрактального и вэйвлет-анализа, осуществляя тем самым надежный автоматический контроль за состоянием инструмента и динамических процессов в системе резания при металлообработке. Необходимость такой оценки обусловлена большим влиянием износа режущего инструмента на состояние динамической системы станка и его параметрической надежности, вплоть до его отказа.

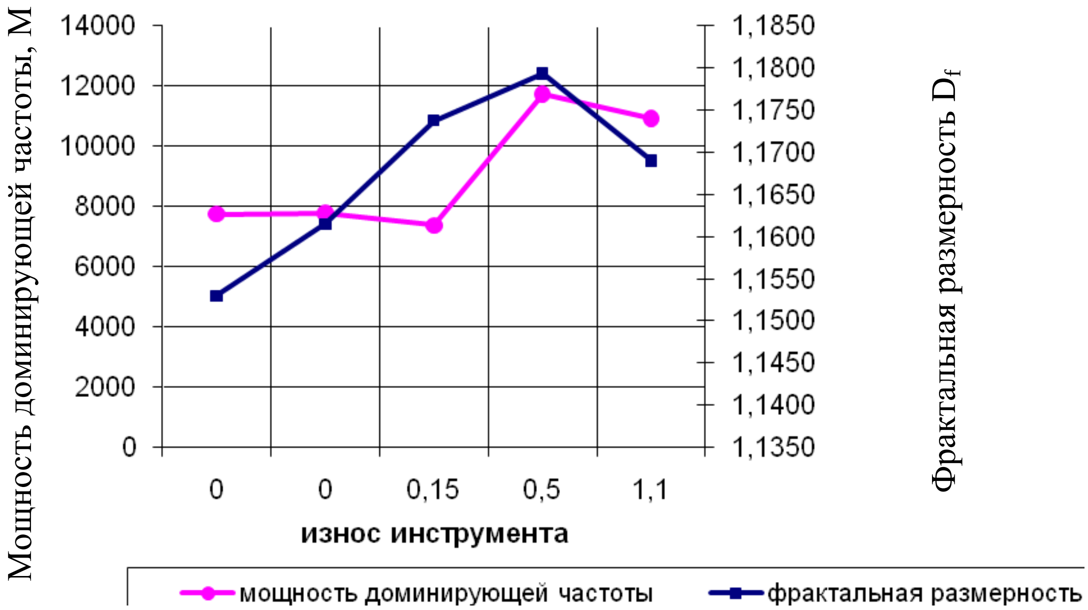

Рис. 5. Изменение фрактальной размерности и мощности доминирующей частоты в сигнале в зависимости от степени износа

Библиографический список

1. **Кабалдин, Ю.Г.** Управление динамическим качеством металлорежущих систем на основе искусственного интеллекта / Ю.Г. Кабалдин, С.В. Биленко, С.В. Серый. – Комсомольск-на-Амуре: ГОУ ВПО "Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет", 2004. – 240 с.
2. **Жарков, И.Г.** Вибрации при обработке лезвийным инструментом / И.Г. Жарков. – Л.: Машиностроение, 1986. – 184 с.
3. **Кудинов, В.А.** Динамика станков / В.А. Кудинов. – М.: Машиностроение, 1967. – 357 с.
4. **Заковоротный, В.Л.** Динамика процесса резания. Состояние и перспективы // Научный Вестник ДГТУ, 2005. Т. 5. №3. С. 329–356.
5. **Неймарк, Ю.И.** Стахастические и хаотические колебания / Ю.И. Неймарк, П.С. Ланда. – М.: Наука, 1987. – 424 с.
6. **Гленсдорф, П.** Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций / П. Гленсдорф, И.Р. Пригожин. – М.: Мир, 1973. – 280 с.
7. **Хакен, Г.** Синергетика: [пер. с англ.] / Г. Хакен. – Мир 1980. -4Ю4 с.
8. **Воробьев, В.И.** Теория и практика вэйвлет-преобразования / В.И. Воробьев, В.Г. Грибунин. – СПб.: ВУС, 1999. – 208 с.
9. **Давыдов, А.В.** Вэйвлетные преобразования сигналов: тематические лекции / А.В. Давыдов. – Екатеринбург: УГГУ, ИГиГ, ГИН, Фонд электронных документов, 2004.

10. **Добеши, И.** Десять лекций по вейвлетам: [пер. с англ. Е. В. Мищенко] / И. Добеши; под ред. А.П.Петухова. – Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2001. – 463 с.
11. **Кудинов, В.А.** Автоколебания при низких и высоких частотах (устойчивость движений) при резании // СТИН. 1997. № 2. С. 16-22.

Дата поступления
в редакцию 28.01.2013

I.L. Laptev[1], D.A. Shatagin[1], S.V. Sery[2] , E.N. Burdasov[2]

FRACTAL AND WAVELET ANALYSIS IN THE DIAGNOSIS OF DYNAMICS OF THE PROCESS OF CUTTING AND TOOL WEAR

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev[1],
Komsomolsk-on-Amur state technical university[2]

Objective: To develop diagnostic techniques for tool wear and stability of the cutting process. Dynamic processes of cutting significantly determine the wear of cutting tools, precision and quality machining. Wear of the tool, in turn, initiates the growth of the amplitude oscillations of cutting. Therefore, at this time, wavelet analysis is the dominant approach to the study of non-stationary signals of the type in real time.
The methodology of the work: estimate of the fractal dimension of the acoustic signal during cutting.
The results: the technique of diagnostic tool wear when cutting on the fractal dimension of the acoustic signal during cutting. The technique of diagnostic tools and wear resistance of the cutting process on the basis of the fractal analysis of the vibroacoustic signal. The relation of the degree of wear of the tool with the value of the fractal dimension of the acoustic signal during cutting. Fractal dimension determines the degree of self-organization of the dynamical system of cutting. Another characteristic that shows the extent of self-organization is the information entropy - Su. Using the wavelet analysis allowed to determine these characteristics in real time, ie, in the evolution of the system.
Conclusions: The technique of diagnostic tools and wear resistance of the cutting process.

Key words: cutting, tool wear, the diagnosis, the fractal dimension.