

УДК 621.9

Ю.Г. Кабалдин¹, И.Л. Лаптев¹, Д.А. Шатагин¹, Ю.В. Вытнов², С.В. Голубев²**ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО
ВРЕМЕНИ НА ОСНОВЕ ПОДХОДОВ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ NVIDIA CUDA В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ LABVIEW**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева¹,
«ОАО ОКБМ Африкантов»²

Изложена методология оценки состояния режущего инструмента на основе фрактального и анализа виброакустического сигнала с использованием параллельных вычислений nVidia CUDA в графической среде обработки LabVIEW, в режиме реального времени.

Ключевые слова: износ инструмента, фрактальный анализ, nVidia CUDA, LabVIEW.

Состояние технологических систем во многом определяет качество выпускаемой продукции, поэтому своевременная оценка динамических показателей и степени износа оборудования играет важную роль на производстве. Для мониторинга работы металлорежущих станков используют системы диагностики, основанные на сборе информации о параметрах оборудования, их последующей обработке и принятия соответствующего решения. Учитывая тот факт, что система резания является сложной, самоорганизующейся системой [1], включающей в себя большое количество параметров с нелинейными связями, необходимо контролировать только те, которые вносят существенный вклад в общее состояние системы и её развитие. Такие параметры называются *параметрами порядка*.

Изучением сложных, нелинейных, самоорганизующихся систем занимается наука синергетика. Как показывают исследования [2], одним из параметров порядка системы резания является степень износа режущего инструмента, оцениваемая косвенно в зависимости от производственных условий. Поэтому оценка и прогнозирование износа режущего инструмента в режиме реального времени – одна из актуальных задач в системе общей диагностики состояния технологических систем. Наиболее полную картину о состоянии режущего инструмента в процессе резания можно получить по виброакустическому сигналу, получаемому из зоны резания. Данный сигнал несет информацию о текущем состоянии инструмента и позволяет спрогнозировать картину износа, используя специальные методы и подходы теории синергетики и искусственного интеллекта. Однако учитывая тот факт, что обработка резанием является высокодинамичной и быстро эволюционирующей во времени. Оценка состояния режущего инструмента в режиме реального времени вызывает ряд трудностей и вопросов, связанных со скоростью обработки сигнала и принятия решения. Для реализации алгоритмов нелинейной динамики в реальном времени для оценки состояния режущего инструмента необходимо использовать современные методы высокопроизводительных вычислений.

Синергетический подход к оценке состояния режущего инструмента

Как отмечалось ранее, система резания – сложная, нелинейная самоорганизующаяся система, поэтому для оценки состояния режущего инструмента необходимо использовать подходы теории синергетики. Для качественной оценки состояния и поведения динамической системы в теории синергетики используется понятие фазового пространства системы. Координаты, описывающие точку в фазовом пространстве системы, должны давать точное представление о состоянии и поведении системы во времени. Если состояние системы в фазовом пространстве описывается двумя координатами, то такое пространство называется фа-

зовой плоскостью. Так, колебание гармонического осциллятора можно представить в координатах скорости и перемещения на фазовой плоскости.

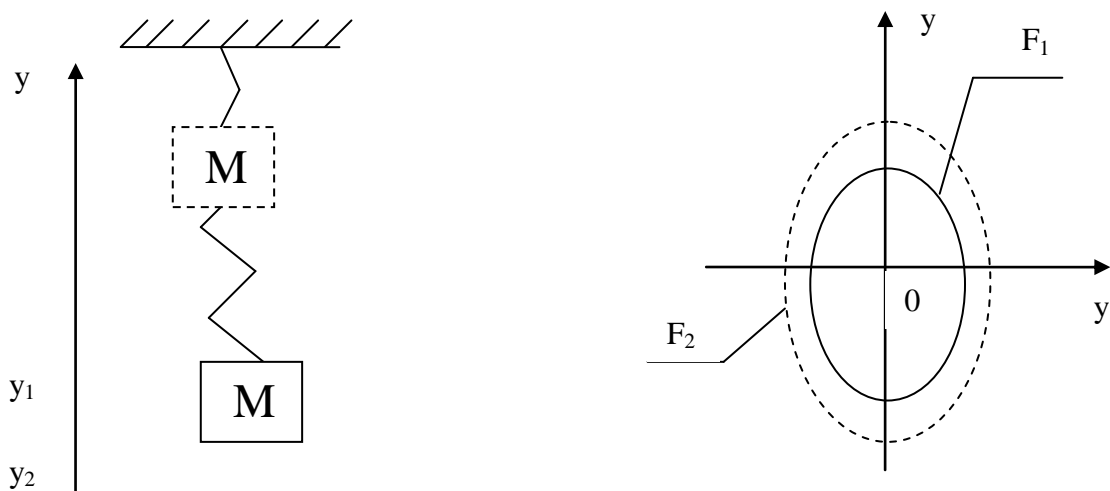


Рис. 1. Фазовый портрет линейного гармонического осциллятора без трения

На рис. 1 показан фазовый портрет гармонического осциллятора без трения в координатах скорость y' и перемещение y , выведенного из состояния равновесия 0 из точки y_1 . Данное отображение делает возможным определение динамического состояния по значениям параметров на фазовой плоскости. След, который оставляет точка на фазовой плоскости, называется фазовой траекторией. В данном случае фазовая траектория обозначается как F_1 . Из рис. 1 видно, что изменения начальных условий приведет к изменению и на фазовой плоскости. Так, изменение начального положения массы приведет к изменению фазовой траектории. Если задать начальное отклонение от положения равновесия большим, чем в предыдущем случае $y_1 < y_2$, получим новую фазовую траекторию F_2 .

Таким образом, изменяя начальные условия, мы получим целое семейство фазовых траекторий для каждого конкретного случая. Фазовая траектория, к которой стремится система во времени, называется аттрактором. В данном случае изменение начальных условий приведет к изменению аттрактора. Однако вид аттрактора останется одинаковым для всех случаев. Это означает, что система не меняет характер движения. Вид аттрактора может меняться только при условии резкого изменения какого-либо параметра или закона движения. Так, при добавлении к закону движения силы трения или, превращая в ноль какой-либо параметр, мы получим совершенно другую картину. На рис. 2 показан фазовый портрет осциллятора с учетом силы трения.



Рис. 2. Фазовый портрет линейного гармонического осциллятора с учетом трения

Из рис. 2 видно, что колебания у выведенного из состояния равновесия 0 из точки u_1 осциллятора со временем затухают. Это указывает на то, что аттрактором системы будет являться устойчивый фокус. Изменяя начальные условия в широком диапазоне, система всегда стремится к состоянию равновесия. Это свидетельствует о высокой степени устойчивости системы и широкой области притяжения аттрактора. В отличие от линейного осциллятора, система резания имеет более сложную структуру и законы эволюции. Большое влияние на поведение оказывают стохастические факторы и нелинейные диссипативные параметры системы. Именно поэтому не предоставляется возможным точное описание поведения системы во времени линейными дифференциальными уравнениями. Для оценки состояния режущего инструмента необходимо реконструировать аттрактор системы резания по полученному временному ряду и определить его фрактальную размерность.

Реконструкция аттрактора динамической системы методом задержек

Для реконструкции аттрактора методом задержек требуется определить размерность фазового пространства динамической системы. Необходимо знать, сколькими координатами описывается точка полученного аттрактора. Для решения этой задачи следует рассчитать фрактальную размерность аттрактора [2].

Фрактальная размерность является количественной характеристикой хаотичности исследуемого сигнала. По величине фрактальной размерности можно судить, насколько хаотична динамика исследуемой системы. Знание величины фрактальной размерности требуется при реконструкции аттрактора методом задержек, для расчета минимальной размерности фазового пространства m , а также для предварительной оценки корректности такой реконструкции, а именно минимального числа точек M временного ряда, при котором картина реконструкции будет корректной $M > M_{\min} = 10^{2+0.4D}$, где D – фрактальная размерность.

Одним из наиболее распространенных алгоритмов определения фрактальной размерности является метод расчета поточечной размерности [2]. Результатом работы алгоритма является значение фрактальной размерности Хаусдорфа D_0 . Данный алгоритм обладает высокой точностью. Экспериментальные исследования показывают, что при длине выборки порядка 100 000 точек погрешность предложенного алгоритма вычисления фрактальной размерности D_0 не превышает 5%.

Расчет значения размерности производится поточечным алгоритмом. В основе метода расчета размерности фазового пространства m лежит теорема о вложении, которая утверждает, что $m \geq \frac{2}{D} + 1$ – формула Манэ, где D – фрактальная размерность, означает округление до ближайшего сверху числа.

Размерность фазового пространства m дает возможность определить число степеней свободы реконструируемой динамической системы. Система с размерностью фазового пространства m характеризуется числом степеней свободы $n = m/2$.

Для реконструкции аттрактора также требуется знать частоту и амплитуду доминирующих гармоник во временном ряду. Для этих целей необходимо получить временной ряд по виброакустическому сигналу из зоны резания и произвести частотный анализ.

Система по снятию виброакустического сигнала из зоны резания и получения временных рядов

Для получения временного ряда, характеризующего динамику процесса резания, используется виброакустический сигнал из зоны резания. Регистрация виброакустического сигнала проводится с помощью вибродатчиков, закрепленных вблизи зоны резания и ориентированных по заранее определенным осям. В случае токарной обработки датчики вибрации размещаются на корпусе резца. Оптимальным является наличие одного трехкоординатного датчика, позволяющего получать напряжение, пропорциональное виброускорению по трем осям одновременно.

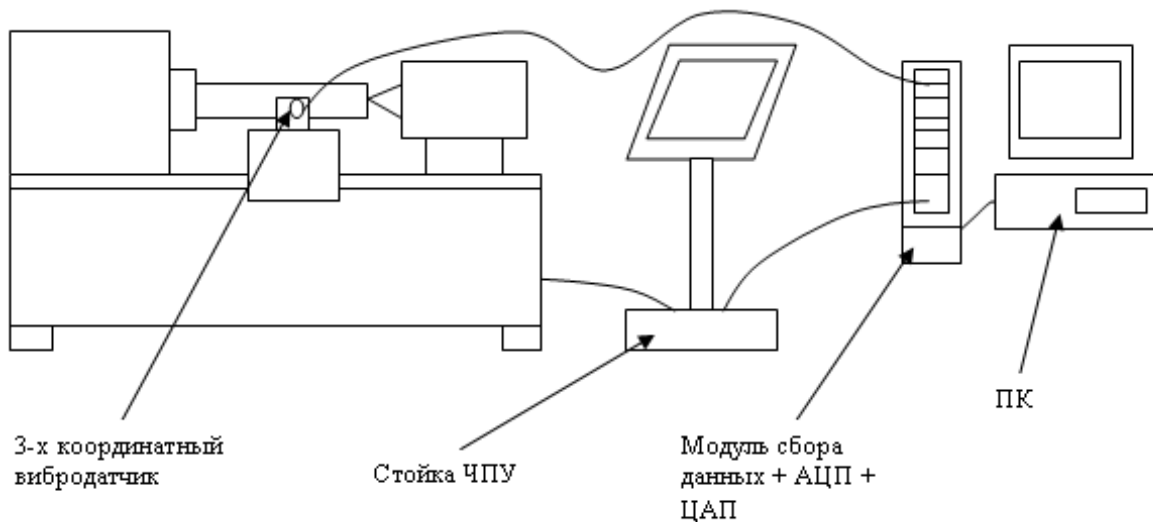


Рис. 3. Схема установки по снятию сигнала виброакустической эмиссии

Полученный аналоговый сигнал с датчиков фильтруется и преобразуется в цифровой сигнал при помощи аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Следующим этапом является передача цифрового сигнала на ПК и реконструкция аттрактора системы резания с целью дальнейшего анализа и принятия решения с генерацией управляющего воздействия. Управляющее воздействие передается на стойку ЧПУ станка, где и происходит корректировка его работы. Этапы получения и обработки сигнала представлены на рис. 4.

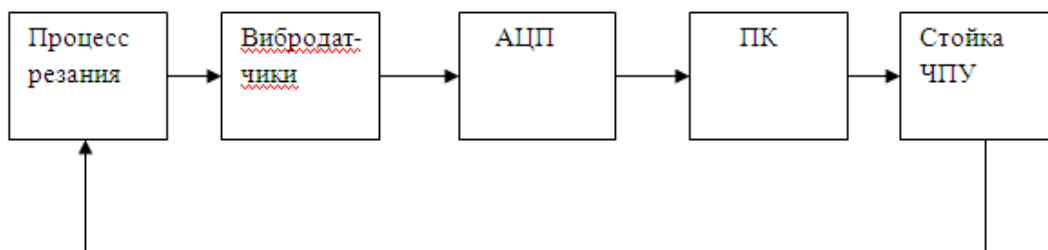


Рис. 4. Этапы получение временного ряда, характеризующего динамику процесса резания и генерации управляющего воздействия

Оцифровка и обработка сигнала с использованием программно-аппаратного комплекса National Instruments

Оцифровка и обработка полученного сигнала является ответственным этапом в диагностике состояния режущего инструмента. Комплексное решение в данном вопросе предлагает фирма National Instruments (NI). NI является лидером в области технологии виртуальных приборов, а также изготовлении аппаратного и программного обеспечения для систем автоматизированного тестирования. Флагманским программным продуктом компании является среда графического инженерного программирования LabVIEW.

Удобство использования данной системы заключается в полной интеграции как аппаратных, так и программных средств в единую систему сбора и анализа данных на основе ПК. В качестве устройства для оцифровки сигнала компания NI предлагает компактную установку, состоящую из АЦП NI 9218 и модуля сбора данных NI cDAQ 9172. Данная установка отправляет оцифрованный сигнал на ПК с помощью USB провода.



Рис. 5. Общий вид установки по оцифровке данных NI

Обработка полученного сигнала с целью реконструкции аттрактора системы резания и принятия решения проводится на программном обеспечении собственной разработки, созданной на основе инженерного графического языка программирования LabVIEW (кафедра «Технология и оборудование машиностроения» НГТУ им. Р.Е. Алексева).

Преимуществом графического языка программирования LabVIEW является наличие основных виртуальных приборов и большое количество реализованных функций в виде подключаемых библиотек, широко распространенных в области обработки сигналов. Например, стандартными функциями являются: «Быстрое преобразование Фурье», «Оконное преобразование Фурье», «Определение спектра мощности сигнала», «Осциллограф», «Wavelet преобразование» и т.д. Графический язык программирования LabVIEW отличается высоким удобством ввода и вывода информации и параметров.

Технологии параллельных вычислений nVidia CUDA в среде графической разработки LabVIEW при реконструкции аттрактора системы

Для получения частотных характеристик динамических систем широко используют спектральный анализ виброакустического сигнала. Наибольшее распространение в качестве метода спектрального анализа получило «Быстрое преобразование Фурье» и «Оконное преобразование Фурье». Для реконструкции аттрактора методом задержек нам необходимо выявлять доминирующие частоты и их амплитуды в режиме реального времени, поэтому предъявляются высокие требования к скорости обработки временных рядов. Современной тенденцией в повышении производительности является применение параллельных вычислений, основывающихся на подключении графического процессора (GPU) для расчетов совместно с центральным процессором (CPU). Лидером в области параллельных вычислений на GPU является фирма nVidia с технологией CUDA.

CUDA – это архитектура параллельных вычислений от nVIDIA, позволяющая существенно увеличить вычислительную производительность, благодаря использованию GPU (графических процессоров). Направление вычислений эволюционирует от «централизованной обработки данных» на центральном процессоре до «совместной обработки» на CPU и GPU. Для реализации новой вычислительной парадигмы компания nVIDIA изобрела архитектуру параллельных вычислений CUDA, на данный момент представленную в графических процессорах GeForce, ION, Quadro и Tesla и обеспечивающую необходимую базу разработчикам ПО. Платформа параллельных вычислений CUDA обеспечивает набор расширений для языков C и C++, позволяющих выразить как параллелизм данных, так и параллелизм задач на уровне мелких и крупных структурных единиц.

Для реализации возможностей параллельных вычислений в среде разработки LabVIEW фирма National Instruments анонсировала подключаемый модуль GPU Analysis Toolkit. Данный модуль представляет собой набор подключаемых библиотек для работы с

GPU в LabVIEW. Для работы GPU Analysis Toolkit необходимо наличие у ПК видеокарты nVidia с поддержкой технологии CUDA и установленные библиотеки CUDA Toolkit.

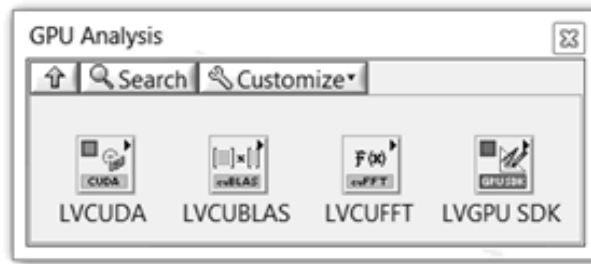


Рис. 6. Библиотеки GPU Analysis Toolkit в LabVIEW

Стандартным набором в GPU Analysis Toolkit являются библиотеки LVCUDA, LVCUBLAS, LVCUFFT, LVGPU SDK. Библиотека LVCUDA необходима для инициализации GPU в LabVIEW и выделения памяти под расчеты. LVCUBLAS является библиотекой линейной алгебры и содержит основные операции с матрицами. LVCUFFT – библиотека, реализующая прямое и обратное преобразование Фурье на GPU. LVGPU SDK включает дополнительные инструменты для работы с GPU. Реализация БПФ с GPU подразумевает несколько специальных этапов в LabVIEW.

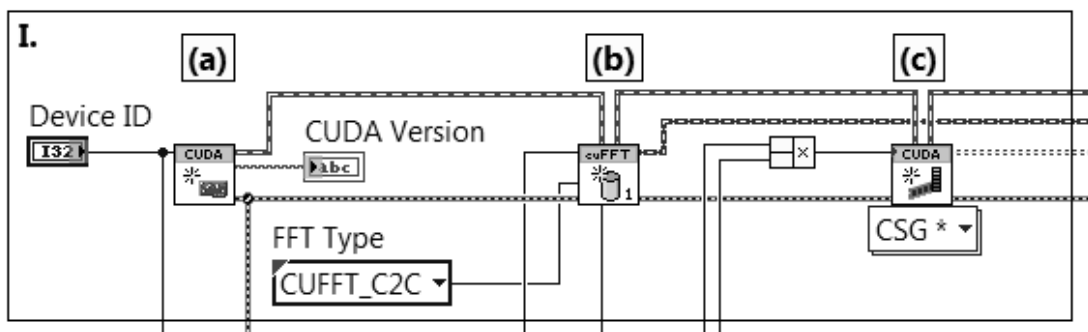


Рис. 7. Инициализация GPU ресурсов

Для начала работы с GPU необходимо подключить устройство (рис. 7, а). Оператор подключения GPU выбирается из библиотеки LVCUDA. После этого CPU сможет отдавать часть данных вычислений на GPU. Далее необходимо подготовить GPU к вычислению БПФ, для этого следует подключить библиотеку cuFFT из LVCUFFT (рис. 7, б). Теперь выделить память для хранения данных на GPU. Делается это при помощи библиотеки Allocate Memory из LVCUDA (рис. 7, с), где требуется выбрать тип данных для работы.

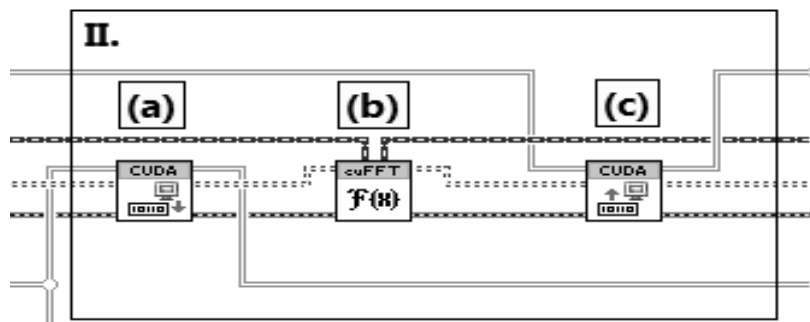


Рис. 8. Вычисления БПФ на GPU

Непосредственно БПФ осуществляется загрузкой данных временного ряда, полученного из зоны резания, в буфер на GPU (рис. 8, *a*) с последующей обработкой в библиотеке cuFFT (рис. 8, *b*) с последующей выгрузкой из буфера (рис. 8, *c*). Для загрузки данных временного ряда используется библиотека Download Data из LVCUDA. Обработка данных происходит с помощью библиотеки FFT из LVCUFFT. Выгрузка данных происходит за счет оператора Upload Data из LVCUDA.

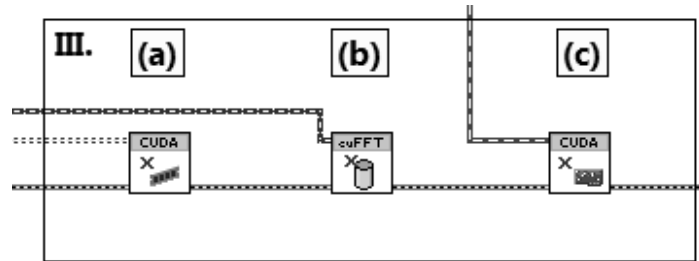


Рис. 9. Высвобождение GPU ресурсов

Для завершения параллельных вычислений необходимо произвести высвобождение GPU ресурсов. На данном этапе следует отключить выделенную память оператором Free Memory из LVCUDA (рис. 9, *a*) из LVCUDA, отключить библиотеку БПФ от GPU (рис. 9, *b*) оператором Release Library из LVCUFFT, отключить GPU для работы с данными в LabVIEW оператором Release Device из LVCUDA.

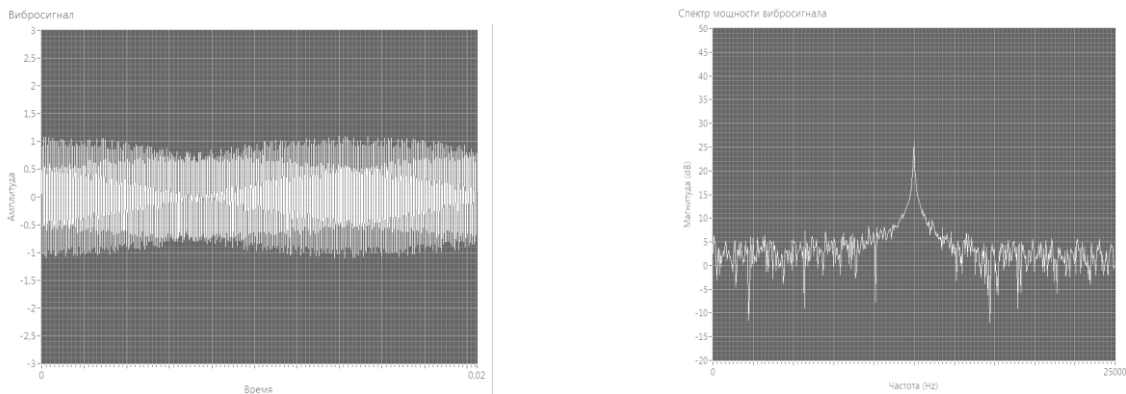


Рис. 10. Сигнал и его доминирующая частота

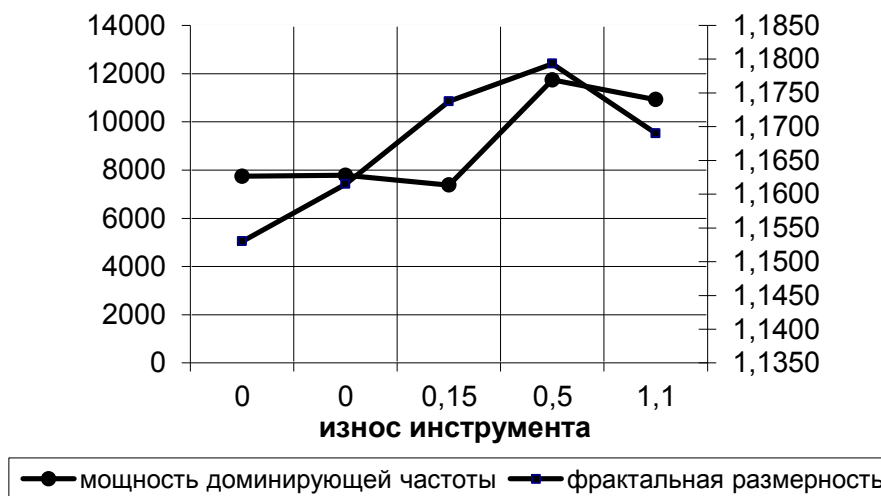


Рис. 11. Изменение фрактальной размерности и мощности доминирующей частоты в сигнале в зависимости от степени износа

По полученному спектру мощности вычисляется доминирующая частота и её амплитуда для реконструкции аттрактора и определения степени износа инструмента.

Используя теорему Такенса [2], можно осуществить реконструкцию аттрактора и определить его фрактальную размерность. Как показывают экспериментальные данные [2], степень износа инструмента находится в определенной зависимости от фрактальной размерности аттрактора системы резания.

Таким образом, включая в алгоритм реконструкции аттрактора и определения фрактальной размерности параллельные вычисления nVidia CUDA, становится возможным осуществлять оценку состояния режущего инструмента в режиме реального времени.

Библиографический список

1. **Кабалдин, Ю. Г.** Самоорганизующиеся процессы в технологических системах обработки резанием. Диагностика, управление / Ю. Г. Кабалдин, А. М. Шпилев. – Владивосток: Дальнаука, 1998. – 296 с.
2. **Кабалдин, Ю.Г.** Управление динамическими процессами в технологических системах механообработки на основе искусственного интеллекта / Ю.Г. Кабалдин, С.В. Биленко, С.В. Серый. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т, 2003. – 201 с.

*Дата поступления
в редакцию 04.12.2013*

Yu.G. Kabaldin¹, I.L. Laptev¹, D.A. Shatagin¹, Y.V Vytnov², S.V. Golubev²

EVALUATION OF CUTTING TOOL IN REAL TIME BASED APPROACHES NONLINEAR DYNAMICS USING NVIDIA CUDA SOFTWARE ENVIRONMENT LABVIEW

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev¹,
JSC «OKBM Afrikantov»²

Purpose: Develop a methodology for assessing the state of the cutting tool based on fractal analysis and vibroacoustic signal using nVidia CUDA parallel computing in the graphics processing environment LabVIEW, in real time.

Methodology: Reconstruction of the attractor of a dynamical system and evaluation of its fractal dimension of parallel computing on SALT nVidia CUDA.

Findings: A methodology to assess the state of the cutting tool based on fractal analysis and vibroacoustic signal using nVidia CUDA parallel computing in the graphics processing environment LabVIEW, in real time.

Key words: tool wear, fractal analysis, nVidia CUDA, LabVIEW.