

УДК 621.92.01

В.П. Ларшин, д-р техн. наук, Н.В. Лищенко, канд. техн. наук,  
Одесса, Украина

## **ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА СВЕРЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ МАЛОГО ДИАМЕТРА НА СТАНКАХ С ЧПУ**

*Дана характеристика механізму виникнення вібрацій різального інструменту в технологічній системі різання, що складається з взаємодіючих підсистем інструменту і заготовки. Наведено результати експериментальних досліджень системи технологічної вібродіагностики при свердлінні отворів малого діаметра на основі вимірювального комплексу NI CompactDAQ.*

*Дана характеристика механизма возникновения вибраций режущего инструмента в технологической системе резания, состоящей из взаимодействующих подсистем инструмента и заготовки. Приведены результаты экспериментальных исследований системы технологической вибродиагностики при сверлении отверстий малого диаметра на основе измерительного комплекса NI CompactDAQ.*

*A cutting tool vibration mechanism characteristic is given when cutting process going in the system consisting of interacting subsystems tool and workpiece. The results of experimental studies of the technological vibrodiagnostics when drilling small holes are presented. The results are obtained on the basis of the NI CompactDAQ measurement equipment.*

**Введение.** Анализ современных тенденций в металлообработке позволяет выделить следующие наиболее характерные из них [1]:

- концентрация разнородных методов механической обработки на одном станке с ЧПУ (например, токарно-фрезерная комплексная обработка Turn-Mill, позволяющая объединить несколько станков в одном),

- повышение скорости резания и подачи за счет современных круговых и линейных электроприводов (частоты вращения шпинделя 12, 14 и до 45 тысяч оборотов в минуту),

- применение комбинированных методов обработки («точение» вращающейся фрезой, наложение осевых ультразвуковых колебаний с частотой ультразвука до 50 кГц при обработке композиционных материалов, аддитивные технологии механической обработки и лазерной сварки),

- повышение точности позиционирования при обработке за счет встроенных измерительных систем с разрешающей способностью до 0,01 мкм), разработка ГПМ и автоматических линий на основе станков с ЧПУ и другие.

Технологические процессы механической обработки сопровождаются рядом происходящих при этом физических явлений, наиболее характерным из которых является механическое движение двух видов: формообразующее

(взаимное перемещение инструмента относительно обрабатываемой заготовки, программируется на станках с ЧПУ) и сопровождающее (следствие формообразующего). Наличие этих движений вытекает из законов сохранения и соответствующих уравнений равновесия.

Для обеспечения надежной работы современных высокоскоростных станков с ЧПУ система управления станком должна обеспечивать не только прецизионные программируемые перемещения инструмента относительно обрабатываемой заготовки, но также диагностику состояния технологической системы (ТС) обработки. Наиболее слабым звеном этой системы является режущий инструмент (РИ), стойкость которого должна быть достаточной для надёжного функционирования автоматизированной ТС на требуемом интервале машинного времени. Особенно это актуально для сверления отверстий малого диаметра (2...5 мм) в труднообрабатываемых материалах.

Проблема вибраций в технологических системах резания является общеизвестной, начиная с трудов Ф. Тейлора. Известны отечественные исследователи в этой области, например, А.И. Каширин, В.И. Дикушин, В.А. Кудинов и многие другие. В их работах большое внимание уделялось физическим основам возникновения вибраций при резании трудно- и легкообрабатываемых материалов, поскольку проникновение в механизм вибраций позволяет наметить соответствующие меры борьбы с ними.

Современные конструкционные материалы (нержавеющие и жаропрочные стали и сплавы, титан и его сплавы) обладают высокими эксплуатационными свойствами, но имеют низкую обрабатываемость, которая приводит (из-за непредсказуемого влияния на процесс резания силового и температурного факторов) к низкой стойкости РИ. С другой стороны для деталей, например, из алюминия и его сплавов в настоящее время применяют высокие скорости резания (high speed machining) с повышенными подачами и глубиной резания. В обоих случаях проблема вибраций при резании относится к числу актуальных в технологии машиностроения, поскольку появление вибраций, как правило, сопряжено с уменьшением периода стойкости РИ и преждевременным выходом из строя шпиндельного узла станка. Исключение составляют управляемые вибрации, улучшающие работу РИ, например, при вибросверлении. Однако во всех случаях для мониторинга вибросостояния ТС в неё встраивают соответствующие датчики. Наиболее перспективными для применения на современных станках с ЧПУ являются малогабаритные вибродатчики, например типа AP2019, которые можно встраивать в направлении различных координат станка. Однако до сего времени не разработаны надёжные методы технологической вибродиагностики состояния РИ, которые могут быть реализованы на основе этих датчиков и имеющихся вычислительных ресурсов системы ЧПУ.

**Целью исследований** является разработка системы автоматизированной вибродиагностики состояния РИ на основе модульной USB системы типа NI CompactDAQ с последующим программированием диагностического алгоритма (без дополнительных затрат на аппаратную часть) в современной системе ЧПУ, имеющей свободные вычислительные ресурсы [2].

**Изложение основного материала.** Известны способы технологической диагностики по различным критериям оценки состояния РИ, необходимые для решения технологической задачи управления. Они различаются в зависимости от природы выбираемых физических параметров – источников информации о состоянии РИ: сила, крутящий момент, мощность и температура резания, вибрации при резании (перемещение, скорость, ускорение), акустическая эмиссия (звуковая и ультразвуковая), параметры качества обрабатываемой детали и т.п. [2].

В физической динамике различают два основных вида вибраций: вынужденные (forced vibration) и самовозбуждающиеся (self-excited). Вынужденные вибрации возникают под действием периодической силы, например, из-за дисбаланса вращающегося шпинделя станка или периодической работы лезвий РИ (например, лезвий сверла или фрезы). В этом случае источник колебаний (шпиндель или лезвия РИ) заставляет вибрировать сопрягаемые с ним элементы ТС. В результате в частотном спектре вибраций появляются составляющие частоты вращения шпинделя (и сопряженных с ним конструктивных элементов) или частоты внедрения лезвий РИ в обрабатываемый материал.

Для того, чтобы понять механизм самовозбуждения вибраций необходимо рассмотреть природу свободных вибраций (free vibration) при резании [3], которые возникают, например, при внезапном сбросе сил резания при выходе очередного лезвия РИ из зоны контакта, т.е. при резком устранении воздействия сил резания на упругую систему станка. Эти вибрации характеризуются собственной (естественной) частотой, которая, как известно, определяется жесткостью упругой системы и её приведенной массой [3]. Когда зуб режущего инструмента входит в обрабатываемый материал подсистема инструмента «шпиндель – резцедержатель - инструмент» деформируется под действием силы резания, а после прекращения действия силы резания (при выходе зуба из зоны резания) указанная подсистема будет вибрировать с её собственной частотой. При этом предполагается, что жесткость подсистемы заготовки «стол – приспособление – заготовка» выше и может не учитываться. Если следующее (за первым) воздействие зуба инструмента не соответствует собственной частоте, то увеличивается толщина стружки и возрастает сила резания. Это в свою очередь, вызывает более ощутимую деформацию системы, что ведет к возрастанию амплитуды колебаний. Самое невыгодное условие – сдвиг вибраций от режущих лезвий на фазовый угол  $180^\circ$  по отношению к поверхностной волнистости, полученной ранее. Таким

образом, самовозбуждаемые вибрации (self-excited vibration) в зоне резания (в отечественной литературе – автоколебания) являются результатом непредсказуемого взаимодействия нескольких факторов, например, когда вибрация от лезвий РИ запаздывает по фазе от предыдущих следов резания на  $180^\circ$  ( $\pi$  радиан), а мощность резания достаточна, чтобы преодолеть затухание колебаний. Такие вибрации принято называть самовозбуждаемыми или "дребезжанием" (chatter). При этом подсистема инструмента вибрирует со своей собственной частотой (без приложенной извне вынуждающей силы), силы резания существенно возрастают. Это отрицательно сказывается на точности обработки, стойкости РИ и долговечности шпиндельного узла станка. Отсюда следует параметрическая и кинематическая природа самовозбуждаемых колебаний в системе с положительной обратной связью, имеющей запас потенциальной энергии (электродвигатель шпинделя), и способ борьбы с вибрациями: или коэффициент усиления уменьшать или фазу выводить из условия положительной обратной связи ( $180^\circ$ ), или то и другое одновременно.

Избежать возникновения, автоколебаний при резании и "дребезжания" (chatter) возможно в том случае, если частота воздействия зуба инструмента согласуется с собственной частотой подсистемы инструмента «шпиндель – резцедержатель - инструмент». Другими словами, когда волнистость поверхности (которая явно может быть не видна, но проявляется в изменении физико-механических параметров поверхностного слоя) и колебания резания находятся в фазе ( $0^\circ$ ). При такой скорости шпинделя толщина стружки остается постоянной, резание идет плавно (бесшумно) и резец может уходить на большую глубину без возникновения дефектов. Это явление называют «бесшумной точкой» (sweet spot) [3].

Существует два основных способа определения скорости вращения шпинделя, при которой не возникает вибрации типа "дребезжание" [3]. По первому способу определяют собственную частоту подсистемы инструмента при помощи вибродатчика (accelerometer) и импульсного молотка (impact hammer), на основании чего определяют передаточную функцию системы и производят аналитическое прогнозирование колебаний путем расчета «бесшумной точки». Для этого необходимо иметь математическую модель виброколебаний в ТС. По второму способу для определения "бесшумной точки" выполняют контрольные резания. Этот способ позволяет получить более точные данные, но требует проведения большого числа экспериментов, которые проводят при различных сочетаниях скорости вращения шпинделя и глубины резания. Найденные экспериментально режимы с "бесшумными точками" затем программируют для обеспечения стабильной высокопроизводительной работы ТС (при определенной комбинации станка, резцедержателя и инструмента). Рационально применять оба указанных

способа для получения более достоверной информации о колебаниях в упругой системе станка.

Описанный механизм возникновения самовозбуждающихся вибраций при резании может иметь особенности в зависимости от специфики процесса резания в технологии машиностроения. Например, обработка на токарном станке одним резцом, отличается от многолезвийного фрезерования монолитным или сборным инструментом, т.к. зубья фрезы увеличивают частоту внешней возбуждающей силы. Вибрации при сверлении (зенкерования, развёртывании и т.п.) зависят от крутильных колебаний соответствующих осевых инструментов, особенно свёрл малого диаметра, которые изменяют при этом свою длину.

Методы моделирования технических систем в технологической физике и динамике делятся на два больших класса в зависимости от принятой методологической концепции: распределённые (distributed) и сосредоточенные (lumped) системы. В первом случае (distributed systems) процессы описываются дифференциальными уравнениями в частных производных, во втором (lumped systems) – обыкновенными дифференциальными уравнениями. В технологической динамике, как правило, используется концепция сосредоточенных систем, в рамках которых принимаются различные допущения и упрощающие приёмы (например, приведенные и обобщенные параметры), позволяющие от реальных распределённых систем переходить к соответствующим сосредоточенным системам, содержащим приведенные массы, упругость и демпфирование.

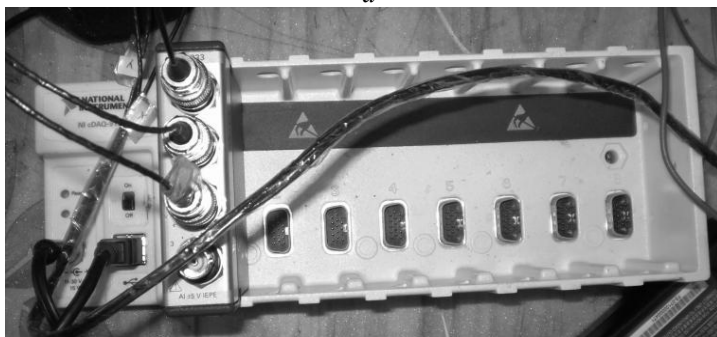
Данная работа является продолжением экспериментальных исследований [4] при сверлении отверстий малого диаметра на обрабатывающем центре мод.500V/5 с системой ЧПУ SIEMENS SINUMERIC 840 D (номинальная и максимальная частоты вращения шпинделя 1500 и 8000 мин<sup>-1</sup>) с целью разработки способа вибродиагностики режущего инструмента. Условия проведения экспериментов: спиральное сверло диаметром 2,85 мм и 4,7 мм (сталь P18), глубина сверления 8 мм, призматическая заготовка с габаритными размерами 298 x 110 x 10 мм (сталь 14X17H2). Использовалась оправка HSK 63-2/20-100 с цанговым зажимом. Режимы сверления: частота вращения шпинделя  $n$ : 250, 500 и 600 мин<sup>-1</sup>; осевая подача 0,06 мм/об. Указанную осевую подачу обеспечивали программно, устанавливая минутную подачу 15, 30 и 36 мм/мин, соответственно, в указанной системе ЧПУ. Для уменьшения времени испытаний сверление производили без подачи технологической смазки в зону резания. Каждый опыт проводили не менее 3-х раз, причем количество повторений опытов зависело от сопоставимости получаемых результатов.

Измерительный комплекс автоматизированной системы научных исследований представляет собой модульную USB систему типа NI CompactDAQ, которая содержит: аналого-цифровое синхронизирующее

устройство, многоканальное шасси NI cDAQ-9172, подключенное к промышленному персональному компьютеру. С помощью этого компьютера и программной среды LabVIEW 8.5 выполнены настройки фильтров и коэффициентов усиления измерительной системы применительно к вибродатчикам типа AP2019 со следующими характеристиками: размер датчика  $\text{Ø}3 \times 3,6$  мм, частотный диапазон 0,5...30000 Гц, чувствительность 0,5 мВ/г ( $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ ) или 0,051 мВ/(м/с<sup>2</sup>). Датчики смонтированы на неподвижном торце шпиндельного узла станка и подключены к многоканальному шасси измерительной системы (рис. 1).



*а*



*б*

Рисунок 1 – Установка вибродатчиков AP 2019 на неподвижном торце шпиндельного узла станка мод.500V/5 (а) и их подключение к многоканальному шасси NI cDAQ-9172 (б)

Все действия по настройке и работе измерительного комплекса, включая выбор частоты выборки сигналов, управляются прикладными программами LabVIEW 8.5, которые предварительно составлены в виде блок-схем из

самостоятельных функциональных программируемых блоков, которые в совокупности образуют программируемый виртуальный прибор (рис. 2).

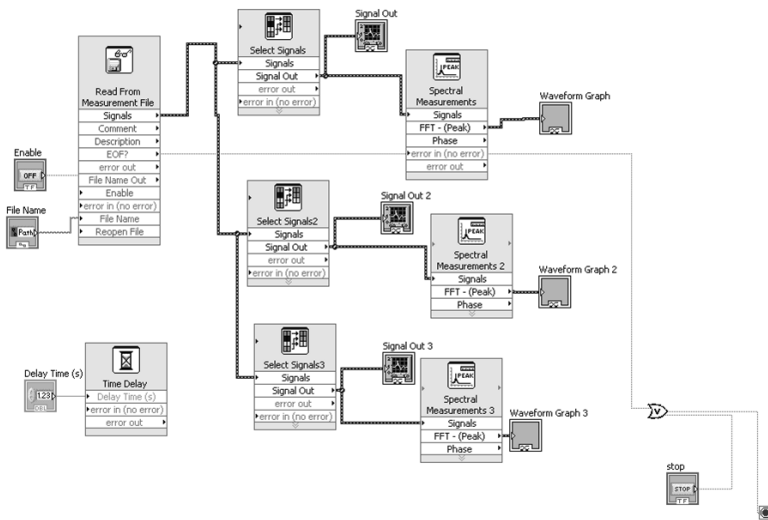


Рисунок 2 – Блок-схема измерительного комплекса – виртуального измерительного прибора – в системе LabVIEW 8.5

Особенностью рассматриваемого комплекса является возможность создавать и настраивать измерительную систему сбора, обработки и отображения сигналов вибродатчиков, установленных на неподвижном торце узла шпинделя станка по координате  $Z$  и на его неподвижных боковых сторонах по координатам  $X$  и  $Y$ . Предварительно найденная жесткость узла шпинделя станка по осям  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  составляет, соответственно, 16,3; 21,6 и 48,5 Н/мкм [5].

Данная измерительная система позволяет не только фиксировать временные изменения сигналов, но также отображать частотный спектр вибросигналов по осям  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  в виде непрерывной спектрограммы, которая является более информативным показателем изменений в работе сверла по мере его затупления и выхода из строя (рис. 3). На рис.3 показаны спектрограммы осевых вибраций сверла (по оси  $Z$ ): после включения двигателя шпинделя ( $a$ ), в середине интервала времени работы сверла ( $b$ ), в моменты времени до ( $b$ ) и после ( $z$ ) поломки сверла. Экспериментальные исследования проведены в Уфимском государственном авиационном техническом университете совместно с канд. техн. наук Башаровым Р.Р.

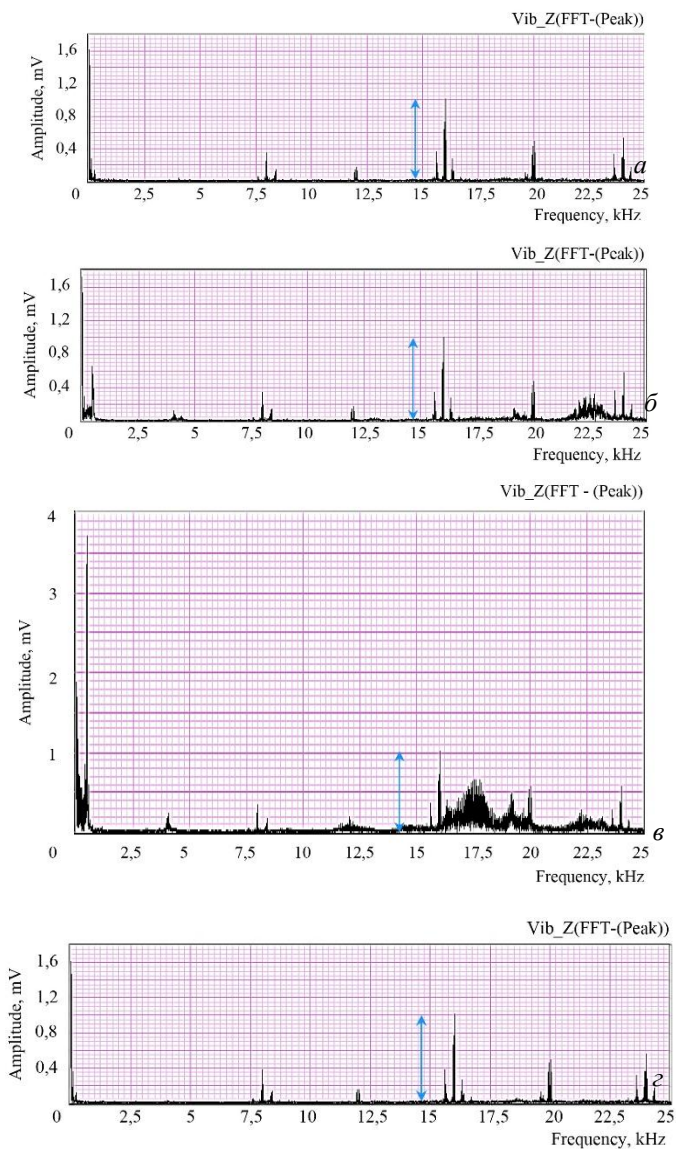


Рисунок 3 – Спектрограммы вибраций торца шпинделя по оси Z станка в разные моменты времени работы сверла  $\varnothing 2,85$  мм при  $n = 500$  мин<sup>-1</sup>



На рис. 4 представлены некоторые из указанных спектрограмм в более узком интервале частот (0...3 кГц)

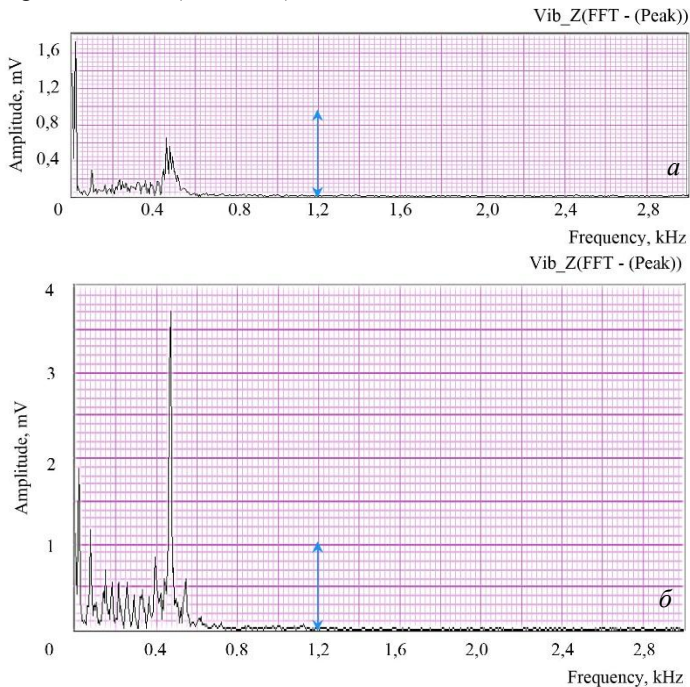


Рисунок 4 – Спектрограммы, показанные на рис. 3, б (а) и рис. 3, в (б), но в более узком интервале частот: 0...3 кГц (стрелка на рис. 3 и рис. 4 показывает одинаковую вертикальную единицу масштаба)

Из анализа приведенных спектрограмм следует, что по мере работы сверла некоторые гармонические составляющие спектра на отдельных характеристических частотах или в интервале полосы этих частот выделяются наиболее чувствительными по своей амплитуде к износу сверла. Это отражается в увеличении указанных амплитуд по мере износа.

Установлено, что для свёрл диаметрами 2,85 мм и 4,7 мм характеристической частотой, отражающей износ сверла, является частота  $f_{wi} = 500$  Гц, а также близко прилегающие к этой частоте соседние частоты в полосе 450...550 Гц.

Измерены максимальные амплитуды колебаний  $A_{wi}$  при частоте  $f_{wi} = 500$  Гц (табл. 1). Дополнительно определяли время обработки  $\tau_{w\max}$ , при котором амплитуда соответствующей гармоники становилась

максимальной, т.е.  $A_{wi} (500, \tau_{wmax}) = A_{wmax}$ . В табл. 1 также представлены средние значения этих параметров  $A_{wmax}^{ave}$  и  $\tau_{wmax}^{ave}$ , которые получены как результаты усреднения повторяющихся 3 раза опытов для каждой из трёх частот вращения шпинделя: 250, 500 и 600 мин<sup>-1</sup>.

Из таблицы видно, что по мере увеличения частоты вращения сверла от 250 до 500 мин<sup>-1</sup> средняя по трём опытам величина времени  $\tau_{wmax}^{ave}$  незначительно возрастает (от 187 с до 229 с). При дальнейшем увеличении частоты вращения сверла до 600 мин<sup>-1</sup>, величина  $\tau_{wmax}^{ave}$  несколько уменьшается (до 222 с).

Таблица 1 – Результаты экспериментального определения  $A_{wmax}$  и  $\tau_{wmax}$  на частоте вибраций 500 Гц по оси Z станка

$n$ , мин <sup>-1</sup>	Номер опыта	$\tau_{wmax}$ , с	$\tau_{wmax}^{ave}$ , с	$A_{wmax}$ , мВ	$A_{wmax}^{ave}$ , мВ/(м/с <sup>2</sup> )
1	2	3	4	5	6
250	1	183,8	187,1	2,25	1,95 /39,0
	2	124,8		1,50	
	3	252,6		2,10	
500	1	204,0	229,3	3,60	2,03 / 40,6
	2	206,6		1,30	
	3	277,4		1,20	
600	1	246,8	221,8	3,90	3,16 /63,2
	2	274,2		3,10	
	3	144,4		2,50	

В тоже время по мере увеличения частоты вращения сверла  $n$  от 250 до 600 мин<sup>-1</sup> средняя по 3-м опытам максимальная амплитуда виброускорения  $A_{wmax}^{ave}$  закономерно увеличивается от 39,0 до 63,2 м/с<sup>2</sup>.

Кроме характеристических частот в спектрограммах вибраций по координатам X, Y и Z (спектрограммы для координат X и Y на рис.2 и рис.3 не показаны) присутствуют гармонические составляющие, вызванные вращением шпинделя станка. Для частот вращения шпинделя 250 мин<sup>-1</sup>, 500 мин<sup>-1</sup> и 600 мин<sup>-1</sup> независимо от координат (X, Y и Z) и диаметра сверла (2,85 или 4,7 мм) на всех спектрограммах присутствуют частоты, вызванные основной частотой вращения шпинделя и других конструктивных элементов шпиндельного узла: 8 кГц, 16 кГц и 24 кГц. Кроме того, для вибраций по оси Z имеются три дополнительные низкие частоты, численные значения которых зависят от основной частоты вращения шпинделя (табл. 2).

Таблица 2 – Дополнительные частоты спектра вибраций по оси Z

Основная частота вращения шпинделя (сверла), мин <sup>-1</sup>		
250	500	600
Дополнительные частоты, вызванные частотой вращения шпинделя, Гц		
10, 50, 120	20,100, 250	20, 120, 290
Примечание: дополнительные частоты выявлены на спектрограмме вибраций по оси Z путём изменения масштаба по оси частот инструментальными средствами программы LabVIEW 8.5.		

### Выводы

1. Установлено, что по мере затупления сверла малого диаметра (2,85 мм) появляется и существенно возрастает амплитуда сигнала виброускорения, причём тем больше, чем выше частота вращения шпинделя. Например, при изменении частоты вращения шпинделя в диапазоне 250...600 мин<sup>-1</sup>, амплитуда сигнала виброускорения возрастает в интервале 39,0...63,2 м/с<sup>2</sup>. После достижения максимального значения амплитуды сигнала (на характеристической частоте) происходит поломка сверла, что может быть использовано для диагностики его состояния.

2. Время работы сверла до его полного износа и поломки несущественно зависит от частоты вращения сверла: в интервале её изменения 250...600 мин<sup>-1</sup> это время составляет 187,1...229,3 с.

**Список использованных источников:** 1. Металлообработка 2014, мировые премьеры, технологии, ecoline, автоматизация, lifecycle services // DMG MORI Journal. – 2014. - № 1. – 60 с. 2. Григорьев С.Н. Диагностика автоматизированного производства / С.Н. Григорьев, В.Д. Гурин, М.П. Козочкин и др.; под. ред. С.Н. Григорьева. – М.: Машиностроение, 2011. – 600 с. 3. Badrawy Sinan. Cutting Dynamics of High Speed Machining // Technology Update. – Volume 8. – Issue 1, 2001. – P. 24-26. 4. Ларшин В.П. Исследование виброустойчивости инструмента при сверлении отверстий малого диаметра / В.П. Ларшин, Н.В. Лищенко, Р.Р. Башаров // Межвузовский научный сборник «Современные тенденции в технологиях металлообработки и конструкциях металлообрабатывающих машин и комплектующих изделий». – Уфа: УГАТУ, 2013. – С.20-25. 5. Кудояров Р.Г. Исследование жесткости многоцелевого станка 500V/5 / Р.Г. Кудояров, Р.Р. Башаров // Межвузовский научный сборник «Современные тенденции в технологиях металлообработки и конструкциях металлообрабатывающих машин и комплектующих изделий». – Уфа, УГАТУ, 2011. – с.234-240.

**Bibliography (transliterated):** 1. Metalloobrabotka 2014, mirovye prem'ery, tehnologii, ecoline, avtomatizacija, lifecycle services // DMG MORI Journal. – 2014. - № 1. – 60 s. 2. Grigor'ev S.N. Diagnostika avtomatizirovannogo proizvodstva / S.N. Grigor'ev, V.D. Gurin, M.P. Kozochkin i dr.; pod. red. S.N. Grigor'eva. – M.: Mashinostroenie, 2011. – 600 s. 3. Badrawy Sinan. Cutting Dynamics of High Speed Machining // Technology Update. – Volume 8. – Issue 1, 2001. – P. 24-26. 4. Larshin V.P. Issledovanie vibroustojchivosti instrumenta pri sverlenii otverstij malogo diametra / V.P. Larshin, N.V. Lishhenko, R.R. Basharov // Mezhvuzovskij nauchnyj sbornik «Sovremennye tendencii v tehnologijah metalloobrabotki i konstrukcijah metalloobrabatyvajushhih mashin i komplektujushhih izdelij». – Ufa: UGATU, 2013. – S.20-25. 5. Kudojarov R.G. Issledovanie zhestkosti mnogocelevego stanka 500V/5 / R.G. Kudojarov, R.R. Basharov // Mezhvuzovskij nauchnyj sbornik «Sovremennye tendencii v tehnologijah metalloobrabotki i konstrukcijah metalloobrabatyvajushhih mashin i komplektujushhih izdelij». – Ufa, UGATU, 2011. – s.234-240.

*Поступила в редколлегию 15.07.2014*