

УДК 621.9.01

Исследование пространственной вибрации обрабатывающего центра в режиме фрезерования*

А.В. Лукьянов^{1, а}, Д.П. Алейников^{2, б}

¹Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского 15, Иркутск, Россия

²Институт авиационного машиностроения и транспорта Иркутского государственного технического университета, ул. Лермонтова 83, Иркутск, Россия

^аloukian@inbox.ru, ^бaleynikov@istu.edu

Статья поступила 17.12.2013, принята 20.02.2014

В статье рассмотрены разработка и применение программно-аппаратного комплекса, позволяющего выполнять многоканальное измерение параметров вибраций и проводить анализ этих параметров программой, разработанной в современной среде графического программирования Labview. Особенностью данного комплекса является то, что модуль сбора данных и рабочая станция подключены между собой по беспроводному каналу связи Wi-Fi. Использование программы, разработанной в системе Labview, позволяет использовать большой функциональный набор средств для выполнения анализа вибросигналов, например, выполнение спектрального анализа, нахождение среднеквадратичного значения за выбранные интервалы времени. Проведены исследования по определению вибраций, возникающих при обработке материала обрабатывающим центром. Зарегистрированные сигналы параметров вибрации при разных значениях подач подвергались спектральному анализу, в результате которого были выявлены характерные частоты оборудования (оборотная частота инструмента, частота вращения режущих кромок фрезы и др.). Исследованы амплитуды значений разных частот в зависимости от величины подачи. Произведено сравнение параметров вибрации шпинделя обрабатывающего центра с установленными нормами допустимой вибрации в режиме обработки. Обоснована важность согласования режимов резания с уровнем возможной вибрации шпинделя, режущего инструмента и обрабатываемой детали.

Ключевые слова: параметры вибрации, вибрация шпинделя обрабатывающего центра, комплекс многоканального измерения параметров вибрации.

Research in the space vibration of machining center in milling mode

A. V. Lukyanov^{1, а}, D. P. Aleynikov^{2, б}

¹Irkutsk State Transport University, 15 Chernishevsky St., Irkutsk, Russia

²Institute of Aircraft Machine Engineering and Transport of National Research Irkutsk State Technical University, 83 Lermontov St., Irkutsk, Russia

^аloukian@inbox.ru, ^бaleynikov@istu.edu

Received 17.12.2013, accepted 20.02.2014

The article describes the development and application of hardware and software system that allows to perform multichannel measurement of vibration parameters and to analyze such parameters with the program developed in the modern environment of graphical programming LabVIEW. A special feature of the complex is that the data acquisition module and a workstation are connected to each other wirelessly, by mean of Wi-Fi. Application of the system developed in LabVIEW allows a large functional set of tools for analyzing of vibration signals, such as spectral analysis or finding root-mean-square value for selected time intervals, to be used. The researches in determining the vibrations, arising during material processing by machining center, have been conducted. Recorded signals of vibration parameters in different entries have been subjected to spectral analysis, in which the characteristic frequencies of equipment (rotational frequency of a tool, rate speed of the cutting edges of a milling tool, etc.) have been revealed. Amplitudes of various frequencies, depending on the value of the entry, have been researched. The dependence of the root-mean-square value of vibrational acceleration at the machining center spindle on the value of the entry has been determined. We have compared vibration parameters of the machining center spindle with the fixed norms of admissible vibration in processing mode. It has been justified the importance of the coordination of cutting conditions with the degree of possible vibration of the spindle, the cutting tool and the work piece.

Keywords: vibration parameters, vibration of the machining center spindle, a complex of the multichannel measurement of vibration parameters.

* Работа проводится при финансовой поддержке правительства Российской Федерации (Минобрнауки России) по комплексному проекту 2012-218-03-120 «Автоматизация и повышение эффективности процессов изготовления и подготовки производства изделий авиатехники нового поколения на базе Научно-производственной корпорации "Иркут" с научным сопровождением Иркутского государственного технического университета» согласно постановлению Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218

Введение. В настоящее время актуальной задачей является повышение эффективности работы металлообрабатывающего оборудования, необходимость его своевременного ремонта, повышения качества выпускаемой продукции.

Методика исследования. Одними из путей определения технического состояния оборудования являются измерение и анализ его параметров вибрации и температуры как результатов динамического и силового взаимодействия деталей, узлов и инструмента между собой и с обрабатываемыми деталями [1, 2]. Силы трения между инструментом и заготовкой генерируют значительные температурные градиенты в зоне обработки, приводящие к перегревам инструмента, изменению его характеристик стойкости и работоспособности. Исследование динамики изменения температурных градиентов с использованием современных тепловизионных и оптических средств [3, 4] позволит вводить обратную связь по допустимой температуре процесса обработки и обеспечить максимальную стойкость и надежность инструмента.

Измерение вибрационных процессов, возникающих в станке, шпинделе и при обработке позволит изучить динамические явления, возникающие в данной сложной динамической системе с целью последующего управления режимами обработки, минимизирующими сопутствующие колебания и вибрации [5, 6, 7]. Вибродиагностика позволит контролировать развитие дефектов в механической системе станков, определять некоторые электрические дефекты привода и инструмента, выявлять неэффективные с точки зрения надежности и точности режимы обработки [8]. Решение данной задачи может быть просто и максимально эффективно реализовано с использованием методов вибрационного мониторинга и виброанализа. В результате работы был разработан и собран программно-аппаратный комплекс многоканального измерения и анализа параметров вибрации (рис. 1).

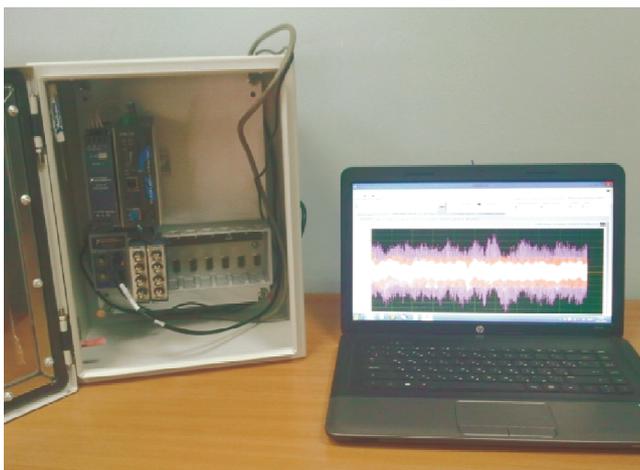


Рис. 1. Программно-аппаратный исследовательский комплекс многоканального измерения и анализа параметров вибрации

Любое механообрабатывающее оборудование имеет перемещающиеся или вращающиеся узлы, которые создают механические колебания и вибрации, являющиеся причиной преждевременного выхода из строя

оборудования, повышенного износа инструмента, снижения качества выпускаемых деталей. Регистрация и анализ параметров вибрации позволяют определять текущее техническое состояние как всего оборудования, так и его узлов, а также диагностировать развитие различных дефектов и прогнозировать возникновение неисправностей. Использование характеристик вибрации для определения текущего технического состояния и диагностики оборудования и занимается вибродиагностика.

В состав исследовательского комплекса входят:

1) модуль (регистратор) ввода С-серии NI 9234. Выполняет функции сбора вибрационных сигналов с датчиков. Характеристики модуля: АЦП разрядностью 24 бит, максимальная частота оцифровки 51,2 кГц, динамический диапазон 102 дБ, 4 независимых аналоговых входа напряжения ± 5 В;

2) датчики вибрации со встроенной электроникой AP85-100 с частотным диапазоном от 0,5 до 8000 Гц;

3) шасси CompactDAQ-9188 на 8 слотов для модулей С-серии. Позволяют использовать несколько одинаковых или разных по назначению модулей в единой задаче;

4) модуль беспроводной передачи данных Моха. Данный модуль предназначен для передачи данных по беспроводной связи на рабочую станцию;

5) рабочая станция на базе персонального компьютера HP (ноутбука) с установленной программой для анализа параметров вибрации, разработанной в современной среде графического программирования Labview (рис. 2).

Программно-аппаратный комплекс позволяет: проводить многоканальный мониторинг вибрации оборудования в режиме реального времени, выполнять спектральный анализ вибрации, производить запись сигнала для последующего анализа.

Данный комплекс использовался при проведении исследований параметров вибрации, возникающих в процессе работы обрабатывающих центров в различных режимах. На рис. 3 показан обрабатывающий центр HSC75V лаборатории технологии высокопроизводительной механообработки ИрГТУ.

Объектом исследования была выбрана операция высокопроизводительного фрезерования алюминия фрезой (диаметр 16 мм, число режущих кромок – 3) фирмы Sandvik. С учетом рекомендаций производителя данной фрезы были назначены следующие режимы резания:

- число оборотов шпинделя $n = 21700$ об/мин;
- глубина резания $a_p = 15$ мм;
- подача на зуб $f_z = 0,18$ мм/зуб.

Испытания проводились с теми же характеристиками угловой скорости шпинделя и глубины резания. Подача на зуб изменялась и принимала значения: $f_z = 0,05; 0,1; 0,12; 0,15; 0,17; 0,2$ мм/зуб.

Схема расположения датчиков приведена на рис. 4. Будем считать, что плоскость «Г» проходит через вертикальную направляющую и шпиндель станка.

Рекомендуемый уровень допустимой вибрации шпинделя (рис. 5) определяется нормами согласно ISO 10816 (для мощности электропривода шпинделя от 15 до 300 кВт) [9].

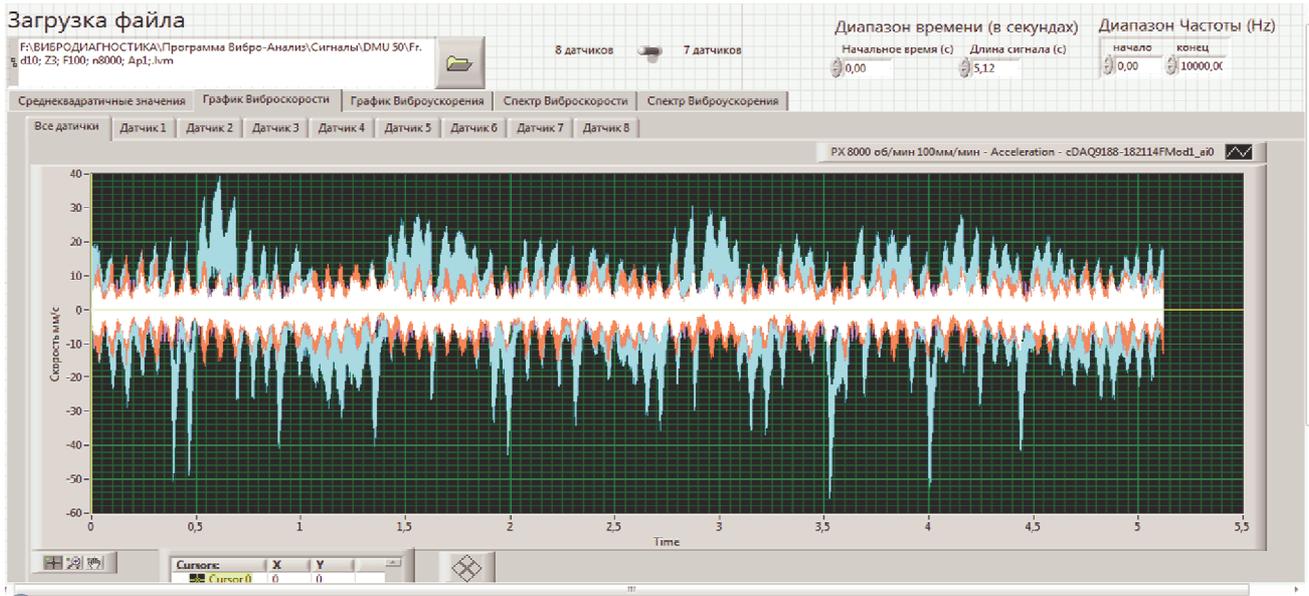


Рис. 2. Главное окно программы анализа вибрационного сигнала в среде графического программирования Labview



Рис. 3. Обрабатывающий центр HSC75V

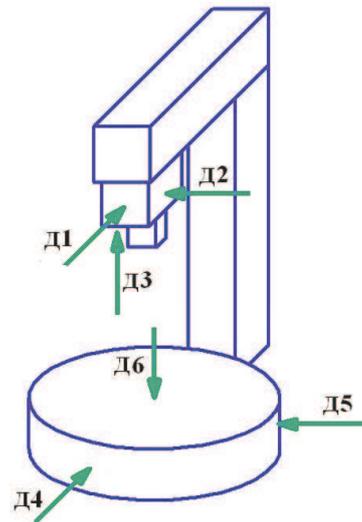


Рис. 4. Расположение датчиков вибрации на обобщенной компоновке станка

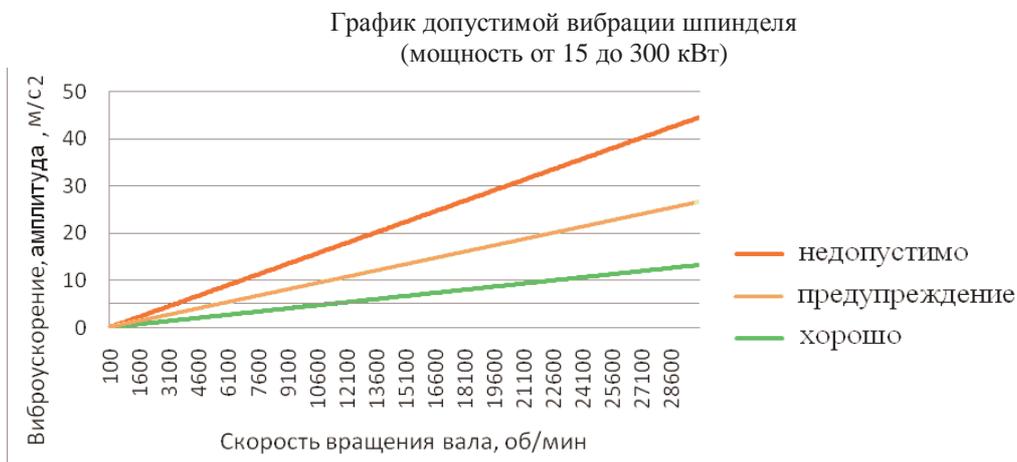


Рис. 5. График зависимости допустимой вибрации шпинделя от его частоты вращения при фрезеровании

По данным эксперимента определялась зависимость среднеквадратичного значения виброускорения шпинделя (рис. 6) и детали (рис. 7) при различных значениях подачи на зуб f_z .

На графике зависимости среднеквадратического

значения ускорения от величины подачи (рис. 8) нанесены уровни недопустимой вибрации и предупреждения при частоте вращения шпинделя 21700 об/мин. (рис. 5), а также рекомендуемая фирмой Sandvik подача (0,18 мм/зуб) при данной частоте вращения шпинделя.

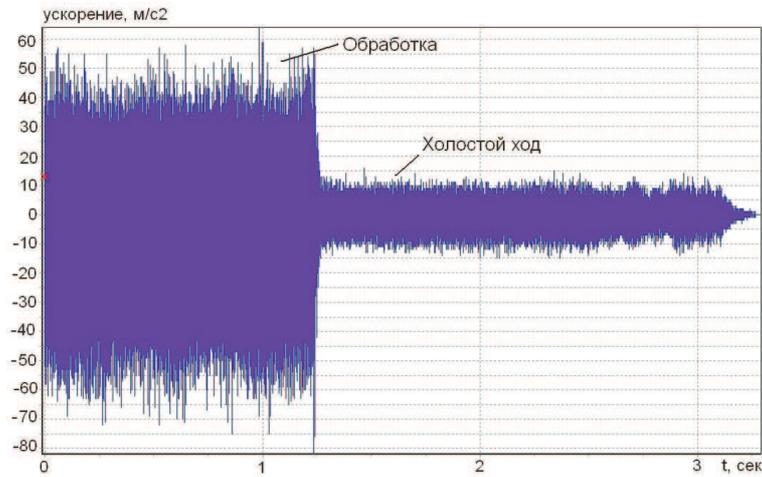


Рис. 6. Изменение виброускорения на шпинделе в продольном направлении (датчик Д1) при обработке (подача $f_z = 0,2$ мм/зуб) и в режиме холостого хода

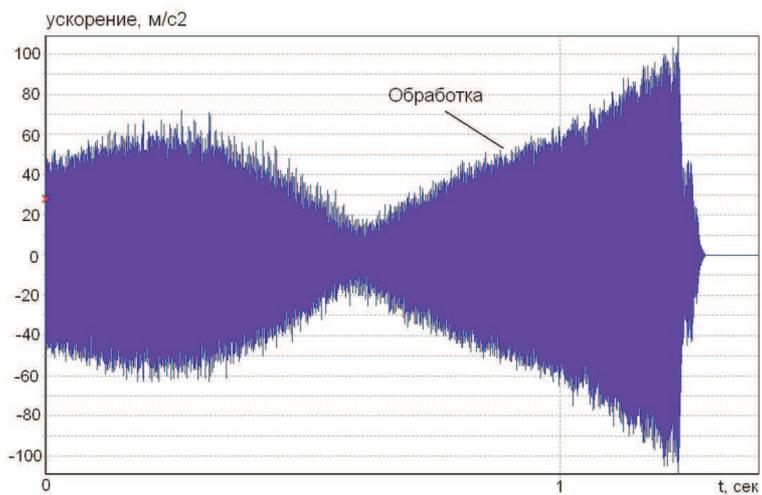


Рис. 7. Изменение виброускорения детали в горизонтально-поперечном направлении (датчик Д5) при обработке, подача $f_z = 0,2$ мм/зуб

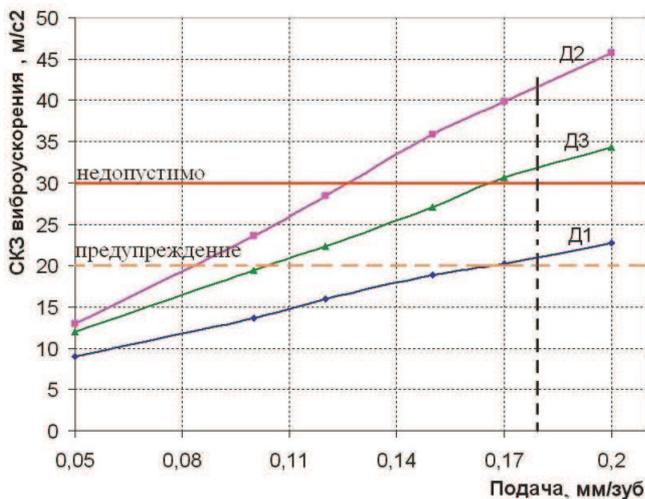


Рис. 8. Зависимость среднеквадратичного значения виброускорения на шпинделе от величины подачи

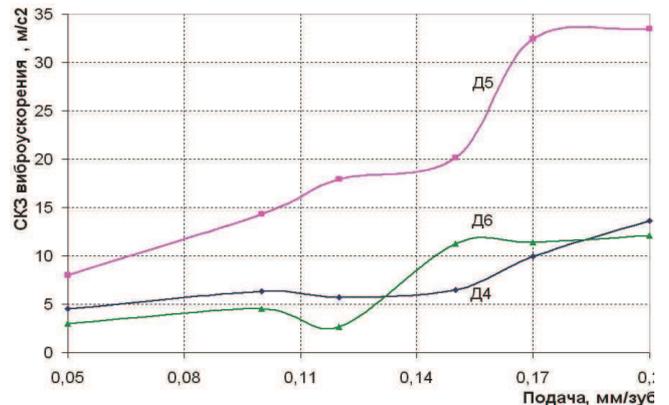


Рис. 9. Уровень вибрации детали по данным датчиков, установленных на столе подачи

На основании полученных данных (рис. 8) можно заключить, что вибрация, возникающая при рекомен-

дуюмом производителем инструмента значении величины подачи, превышает недопустимый уровень вибрации шпинделя, установленный нормами ISO 10816 [3] для шпинделей обрабатывающих центров в горизонтально-поперечном, относительно плоскости «Г» (датчик Д2), и в вертикальном (датчик Д3) направлениях. Вибрация в горизонтально-продольном (относительно плоскости «Г») направлении (датчик Д1) превысила уровень предупреждения. Максимальная вибрация шпинделя наблюдается в направлении, перпендикулярном подаче детали (датчик Д2) при ее обработке. В этом же направлении (рис. 7) возбуждается максимальная вибрация детали (датчик Д5). Причем, резкое увеличение вибрации происходит в диапазоне подач $f_z = 0,12-0,15$.

Спектральный анализ вибрации шпинделя (рис. 10) показывает, что при увеличении подачи до $f_z = 0,2$ мм/зуб наиболее существенно увеличивается вибрация на третьей гармонике оборотной частоты

($f_1 = 21700/60 = 361,87$ Гц), т. е. на частоте вращения режущих кромок фрезы (зубцовой частоты f_z): $f_z = 3 \cdot f_1 = 1085$ Гц. В спектре присутствуют также пики на частотах $2f_z, 3f_z$, а также гармоники оборотной частоты f_1 . Вибрация шпинделя в режиме холостого хода существенно меньше (рис. 6) вибрации при обработке и составляет по направлениям измерений: $3,9$ м/с² (датчик 1); $1,3$ м/с² (датчик 2); $4,5$ м/с² (датчик 3). Таким образом, вибрация шпинделя при обработке в режимах значительной подачи ($f_z = 0,2$ мм/зуб) увеличивается в 10-15 раз по направлениям измерений.

Вибрация на заготовке (детали) существенно неравномерна по длине прохода при фрезеровании (рис. 7), но в среднем несколько меньше, чем на шпинделе, и смещена в высокочастотную область 5-8 кГц (рис. 11).

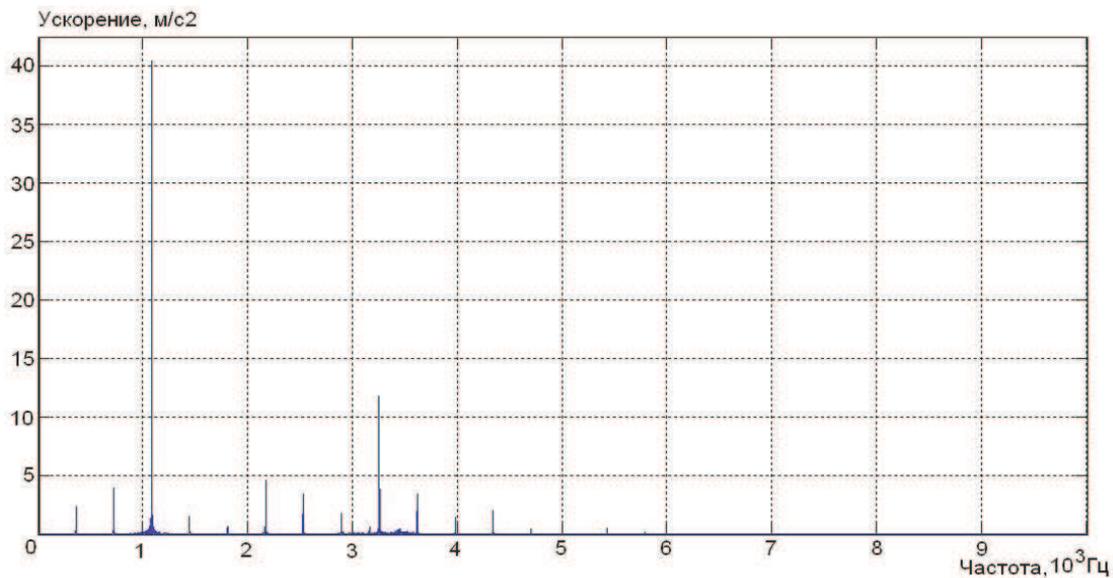


Рис. 10. Спектр виброускорения на шпинделе в горизонтально-поперечном направлении (датчик 2) при подаче $f_z = 0,2$ мм/зуб

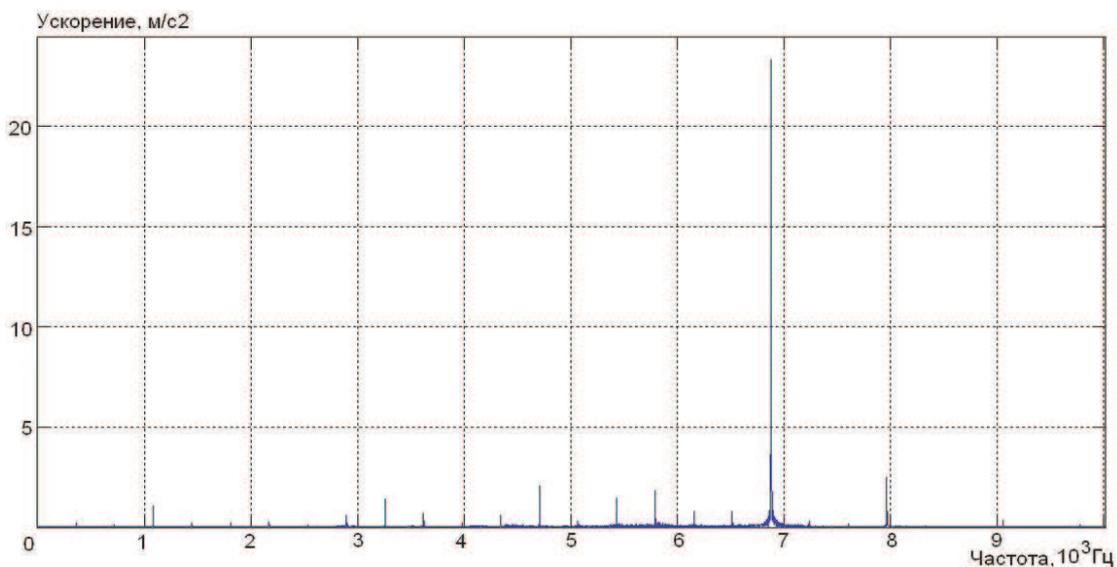


Рис. 11. Спектр виброускорения на обрабатываемой детали в горизонтально-поперечном направлении (датчик 5) при подаче $f_z = 0,2$ мм/зуб

На спектре имеются пики на высокочастотных гармониках оборотной частоты f_1 . Наиболее выдающийся пик на частоте 6872 Гц соответствует 19 гармонике оборотной частоты f_1 . Очевидно, жесткость стола, на котором крепится заготовка, выше жесткости шпинделя, поэтому заготовка резонирует на более высоких частотах и гармониках возбуждения.

Помимо ускоренного износа металлокерамических подшипников шпинделя, высокая вибрация ускоренно изнашивает инструмент и снижает качество обработки поверхности (увеличивается шероховатость поверхности). Для снижения вероятности преждевременного выхода из строя дорогостоящего станочного оборудования и шпинделя необходимо снизить величину подачи до $f_z = 0,12$ мм/зуб.

Выводы

Приведенный пример показывает важность согласования режимов резания с уровнем возможной вибрации шпинделя, режущего инструмента и обрабатываемой детали. При назначении режимов резания необходимо проводить предварительное измерение параметров вибрации шпинделя и корректировать их в соответствии с допустимыми уровнями среднеквадратического значения виброускорения. Второй важный вывод состоит в том, что уровень пространственной вибрации различен по осям координат станка и зависит также от направления подачи при обработке детали. Третий вывод: вибрация на заготовке (детали) при ее обработке существенно неравномерна по уровню, и ее спектр смещен в высокочастотную область, по сравнению со спектром вибрации шпинделя, из-за большей жесткости крепления к столу. Таким образом, шероховатость обрабатываемой поверхности и неточность изготовления (при отсутствии дефектов механизмов подачи) определяется в основном жесткостью фрезы и шпинделя.

Литература

1. Неразрушающий контроль / под общ. ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2005. Т. 8. 789 с.
2. Портной А.Ю., Лукьянов А.В., Лебедева Н.Ю., Лукьянов Д.А., Романовский А.И. Устройство для измерения вибрации: пат. № 2492441 Рос. Федерация. № 2010118565/28; заявл. 07.05.10; опубл. 10.09.13, Бюл. № 25. 7 с.

3. Лукьянов А.А., Капустин А.Н., Лукьянов А.В. Алгоритмическое и программное обеспечение автоматизированного термомониторинга и диагностики оборудования // Контроль. Диагностика. 2005. № 9. 45-53 с.

4. Хоменко А.П., Лукьянов А.В., Капустин А.Н. Разработка алгоритмов распознавания образов по базовому изображению в задачах тепловизионного мониторинга локомотивов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2004. № 3. С. 51-58.

5. Лыткина Е.М., Лукьянов А.В. Управление колебаниями в механической системе при релейном подключении дополнительной массы // Там же. 2005. № 4 (8). С. 85-93.

6. Лукьянов А.В. Методы и средства управления по состоянию технических систем переменной структуры: дис. ... д-ра техн. наук. Иркутск. 2002. 391 с.

7. Лукьянов А.В. Методы релейного управления характеристиками механических систем // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2004. № 1. С. 11-20.

8. Синопальников В.А. Надежность и диагностика технологических систем. М.: Высш. школа, 2005. 344 с.

9. ГОСТ ИСО 10816-3-2002. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерения вибрации на невращающихся частях. Ч. 3. Промышленные машины номинальной мощностью более 15 кВт и номинальной скоростью от 120 до 15000 мин-1. М.: Стандартиформ, 2007. 10 с.

References

1. Non-destructive testing. T. 8. / pod obshh. red. V.V. Kljueva. M.: Mashinostroenie, 2005. Vol. 8. 789 p.

2. Portnoy A.Yu., Lukyanov A.V., Lebedeva N.Yu., Lukyanov-D.A., Romanovsky A.I. Vibration measuring apparatus: pat. No 2492441 Rus. Federation. No 2010118565/28; decl. 07.05.2010; publ.10.09.2013. Bull. № 25. 7 p.

3. Lukyanov A.A., Kapustin A.N., Lukyanov A.V. Algorithmic and program support of automated termomonitoring and diagnostics of equipment // Kontrol. Diagnostika. 2005. № 9. P. 45-53.

4. Khomenko A.P., Lukyanov A.V., Kapustin A.N. Development of pattern recognition algorithms for basic expression in problems of thermal monitoring of locomotives // Sovremennye tehnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie. 2004. № 3. P. 51 -58.

5. Lytkina E.M., Lukyanov A.V. Oscillations control in a mechanical system with a relay connection of extra mass // Sovremennye tehnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie. 2005. № 4 (8). P. 85-93.

6. Lukyanov A.V. Methods and tools for technical systems control with variable structure: Dissertation for the degree of Doctor of Technical Science. Irkutsk, 2002. 391 p.

7. Lukyanov A.V. Relay control methods of mechanical systems // Sovremennye tehnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie. 2004. № 1. P. 11-20.

8. Sinopalnikov V.A. Reliability and diagnostics of technological systems. M.: Vyssh. shkola, 2005. 344 p.

9. GOST ISO 10816-3-2002. Vibration. Machine state control by measuring vibration on non-rotating parts. Part 3. Industrial machines with nominal power above 15 kW and nominal velocity from 120 to 15,000 min-1. M: Standartinform, 2007. 10 p.