

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УРОВНЯ ПАРАЗИТИРУЮЩИХ ВИБРАЦИЙ ФРЕЗЕРНОЙ СИСТЕМЫ В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ ПОСРЕДСТВОМ АНАЛИЗА ШУМОВОЙ АКТИВНОСТИ

В. М. МЕДУНЕЦКИЙ¹, К. П. ПОМПЕЕВ¹, А. В. РАСЦУПКИН^{1,2}

¹Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия

²АО „Завод радиотехнического оборудования“, 192012, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: archijoke@mail.ru

Представлен проведенный на основе экспериментальных данных анализ акустических характеристик рабочей зоны металлорежущего оборудования в режиме холостого хода. Определены параметры, оказывающие влияние на частотные характеристики активной системы, устанавливаемые значением погрешности взаимного расположения групп элементов. Определена зависимость между биением вращающейся фрезерной системы при отсутствии приложенной нагрузки и уровнем шума, фиксируемым звуковыми анализаторами. Предложен метод прогнозирования уровня вибрационной активности фрезерной системы в зоне резания, возникающей в процессе чистовой обработки труднообрабатываемых материалов.

Ключевые слова: *вибрация, коэффициент шума, фрезерная система, режущий инструмент, магнитный датчик, радиальное биение, погрешность*

Обеспечение требуемой точности изготовления деталей (в частности, для изделий приборостроения), получаемых путем лезвийной обработки, — основная задача инженера-технолога предприятия [1]. Одним из этапов подготовки производства является выбор технических средств, к которым относятся металлорежущие станки, оснастка и инструменты [2, 3]. При выборе средств обработки специалисты сталкиваются с проблемой получения максимально возможных показателей рабочих характеристик активной системы, состоящей из отдельных элементов. Решение задачи обеспечения требуемой точности искомой наладкой остается актуальным на протяжении всего периода развития отраслей приборостроения и машиностроения [4]. Биение вращающихся элементов системы „шпиндель—оснастка—инструмент“, как и действие сил резания, являются основополагающим фактором, определяющим величину возникающих вибраций в зоне резания и характер их распространения [5, 6].

На практике в условиях приборостроительного предприятия „Завод радиотехнического оборудования“ (Санкт-Петербург) был разработан и применен метод звукового анализа вибрационного шума. Источником вибрационного шума является фрезерная наладка как система жестко связанных вращающихся элементов, работающая в фазе холостого хода. Принцип, положенный в основу метода, состоит в том, что в звуке, распространяющемся от источника вибрации, содержится достаточно информации, необходимой для определения критериев стабильного резания [7]. Для реализации метода применены инструментальные программные средства и анализаторы, оснащенные микрофонами, которые воспринимают выход фрезерной системы в рабочий режим как комплексный звуковой процесс [8]. На основании полу-

ченных данных величины биения и уровня шума фрезерной наладки производился анализ колебательного процесса технологической системы, позволяющий вывести закономерности для определения оптимальных частот вращения шпинделя (ЧВШ).

В процессе разработки метода проводилось одновременное измерение величины биения фрезерной системы и уровня шумовой активности. На рис. 1 приведена диаграмма амплитудно-частотных характеристик инструментальной наладки станка EMCO LM-600 HD, здесь δ — биение системы, n — диапазон работы шпиндельного узла в режиме холостого хода. Шумовое воздействие инструментальной наладки станка EMCO LM-600 HD на рабочую зону в диапазоне заданных частот демонстрирует диаграмма, представленная на рис. 2, здесь N — уровень шума. Измерения проводились в режиме холостого хода, соответствующем исследуемому режиму работы.

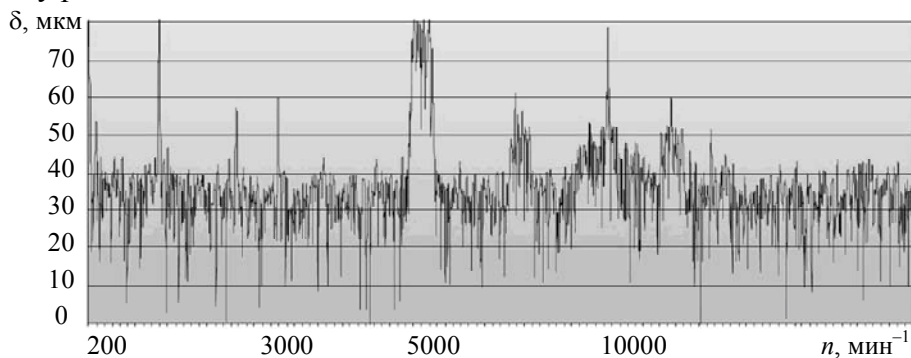


Рис. 1

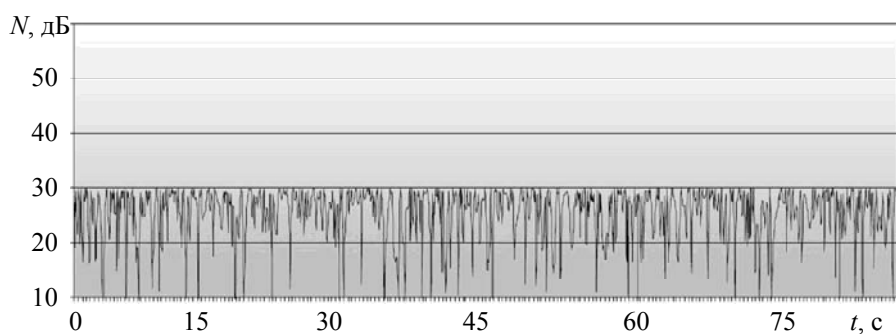


Рис. 2

Особенность исследования, описываемого в настоящей статье, — отсутствие процесса резания труднообрабатываемого материала (титанового сплава BT-14), а соответственно необходимости в затратах на материал и режущий инструмент. На рис. 3 представлен алгоритм, позволяющий прогнозировать вибрационную активность системы. Разработанный алгоритм исключает непосредственное измерение биения фрезерной системы, а также необходимость изменения конструкции инструментальной наладки.

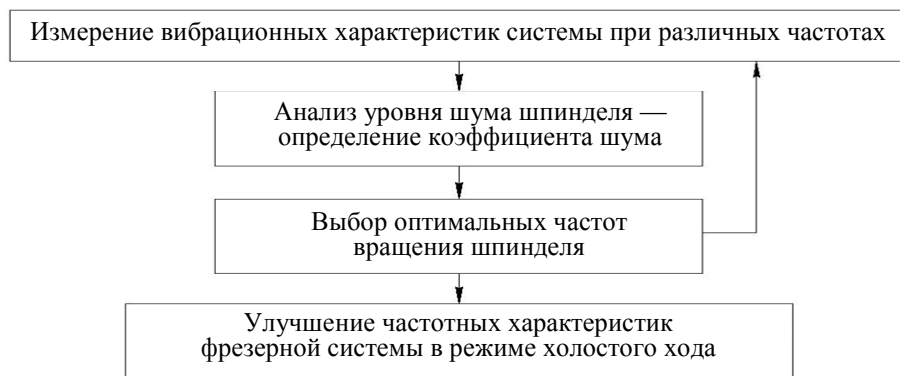


Рис. 3

Определяющими особенностями колебательного процесса всей фрезерной системы являются точность изготовления шпиндельного узла и его частотные характеристики. В отличие от остальных соединительных элементов системы, которые условно можно принять жесткими с заранее заданными параметрами, определяемыми точностью базирования, колебательные законы шпиндельного узла обусловлены поведением подшипникового соединения при различных режимах работы [9]. При этом не следует забывать о том, что вибрационные характеристики не являются присущими ни шпинделю, ни станку, а служат характеристикой фрезерной системы как единой сложноструктурированной единицы с набором индивидуальных параметров, определяющих точность ее изготовления. Погрешность базирования и точность изготовления каждого элемента системы определяют его эксцентриситет (e) относительно идеальной оси. Геометрическая сумма данных величин соответствует номинальному биению фрезерной наладки, что иллюстрируется рис. 4.

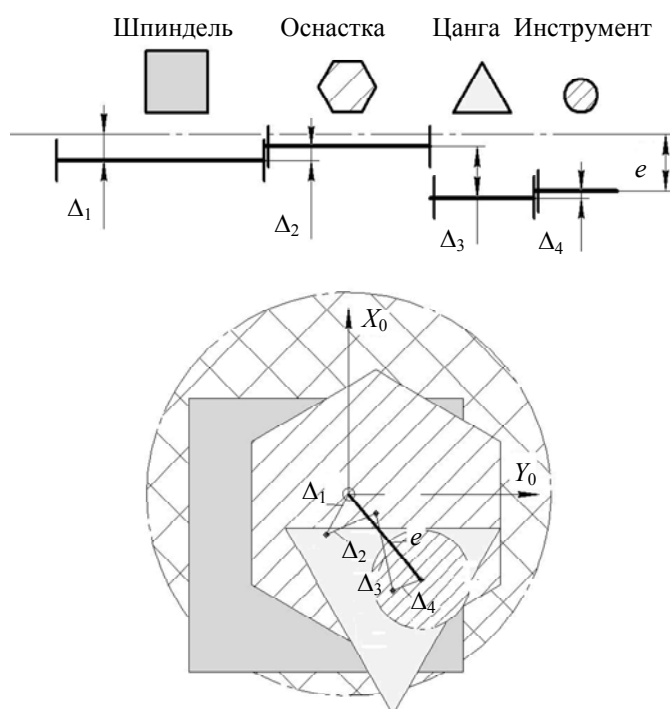


Рис. 4

При прогнозировании работы системы необходимо исследовать поведение искомой структурной наладки, учитывая, что изменение параметров одного из компонентов приведет к формированию новой системы, для которой должны быть найдены соответствующие оптимальные частотные характеристики [10].

Биение вращающейся механической системы является сложным технологическим параметром, величину и результат воздействия которого трудно прогнозировать [11]. Предложенный и апробированный на практике метод определения величины базового биения системы учитывает влияние обратной связи по амплитуде как влияние перемещения ротора на некоторую величину под действием периодической возмущающей силы, вызванной начальным дисбалансом шпинделя. Расчет динамического эксцентриситета носит геометрический характер, при этом эксцентриситет вычисляется как модуль векторной суммы начального дисбаланса и колебаний приведенной массы ротора вдоль подвижных осей координат:

$$e = \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \dots + \Delta_i^2},$$

где $\Delta_1 - \Delta_i$ — величина эксцентриситета каждого элемента фрезерной системы, характеризующаяся точностью изготовления элементов и погрешностью их взаимного расположения.

Основные расчетные параметры типовой фрезерной системы приведены в таблице [1, 10].

Источник возникновения биения	Расчетная формула	Экспликация
Погрешность изготовления переднего подшипникового узла	$\Delta = \frac{2,26\sigma + \Theta}{\sigma + \sqrt{\frac{\Theta^2}{3}}} \cdot \sqrt{\frac{\Theta^2}{3} + \sigma^2}$	σ — среднее квадратическое отклонение случайной составляющей погрешности, Θ — оценка систематической составляющей погрешности
Погрешность конического прессового соединения HSK-63A	$\Delta = \frac{\Delta C}{2} - \Delta s_\alpha$	ΔC — допуск базового расстояния, Δs_α — осевое смещение внутреннего конуса, вызванное допусками углов уклона α
Погрешность конического базирования цанги	$\Delta = \frac{\Delta \alpha l}{3,5}$	$\Delta \alpha$ — допустимая разница между углами уклона наружного и внутреннего конусов, l — длина контакта сопряжения
Погрешность цангового силового закрепления	$\Delta = \frac{\sphericalangle}{2 \operatorname{tg}(\alpha / 2)}$	\sphericalangle — натяг между цангой и инструментом, α — угол конического базирования

Для бесконтактного метода измерений радиального и торцевого биения при рабочих режимах работы фрезерной системы используются магнитные датчики [12]. В случае когда большая ось эллипса совпадает с осью y , эффективный зазор датчика горизонтального смещения равен $\delta_x = \delta + e$, а эффективный радиальный зазор — $\delta_y = \delta - e$, при этом δ — среднее отклонение формы вращающихся элементов подшипникового узла. Измерительная система в этом случае, реагируя на изменение выходных напряжений датчиков, выдаст информацию о смещении оси вала фрезерной системы относительно оси кольца корпуса на величину $\Delta\delta = \sqrt{2e}$. При смещении оси неидеального вала относительно оси кольца корпуса на величину $\Delta\delta$ смещение вала составит

$$\Delta\delta' = \sqrt{(d - \Delta\delta \cos \varphi)^2 + (d + \Delta\delta \sin \varphi)^2},$$

где d — диаметр внутренней обоймы подшипникового узла; $\Delta\delta$ — среднеквадратическое значение биения технологической системы, φ — угол поворота шпиндельного узла.

На рис. 5 представлены данные измерения уровня шума, полученные с использованием мобильного регистрирующего устройства ШИ-01 с микрофоном МК-265, соответствующие двум состояниям системы в режиме холостого хода: a — при $n=8300 \text{ мин}^{-1}$, b — при $n=9650 \text{ мин}^{-1}$. Частотные характеристики изменены в интервале, не превышающем 3 % от условно заданного значения.

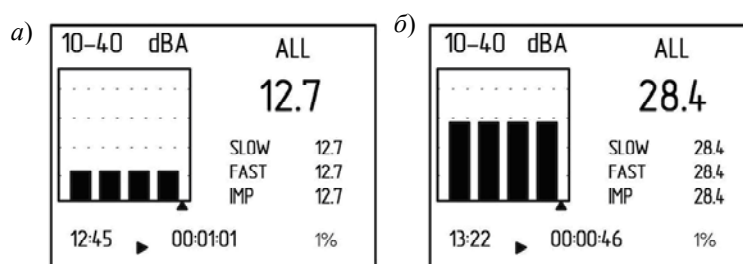


Рис. 5

Одним из наиболее важных показателей эффективности сигналов низкого уровня является коэффициент шума F , определяющий отношение сигнал/шум:

$$F \equiv \frac{\text{SNR}_i}{\text{SNR}_0},$$

где SNR_i — уровень выходного сигнала, SNR_0 — уровень входного сигнала.

Это тождество показывает, что определение коэффициента шума F позволяет с необходимой достоверностью прогнозировать и корректировать источники погрешностей измерения

активности колебательной системы [12]. Использование данного параметра при анализе колебательной системы в цикле работы и простоя металлорежущего оборудования на протяжении производственной смены позволяет учитывать изменение показателей, определяющих закономерности вибрационной активности в процессе резания. На рис. 6 приведены графики изменения величин биения (*a*) и уровня шума (*б*) шпиндельного узла инструментальной наладки в режиме рабочих температур без приложенной нагрузки. Измерения проводились в течение 8-часовой рабочей смены использования оборудования в режиме чистового и получистового фрезерования.

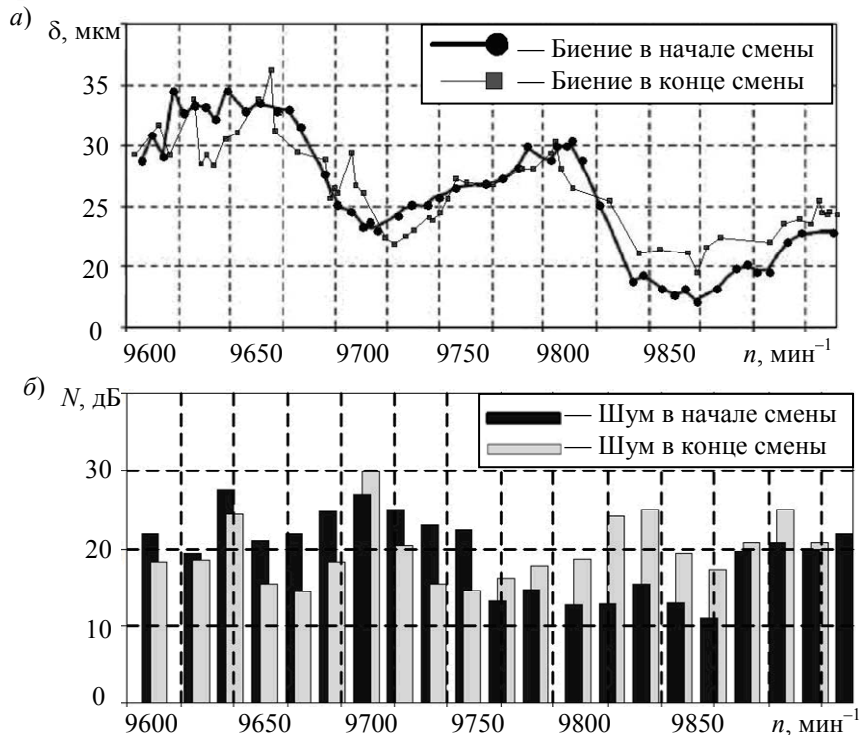


Рис. 6

В результате исследований установлена прямая зависимость величины биения фрезерной наладки в режиме холостого хода от уровня шума. Выявлено незначительное отставание показаний измерения шума от величины биения, что позволяет с достаточной точностью определить из допустимого диапазона рабочих частот область частот вращения шпинделя, определяющих минимальную величину биения системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горошкин А. К., Шманев В. А., Шулепов А. Л., Анипченко Л. А. Приспособления для металлорежущих станков. Справочник. М.—Л.: Машиностроение, 1971.
2. Приспособления для производства двигателей летательных аппаратов (конструкция и проектирование): Учеб. пособие для вузов / В. А. Шманев, А. П. Шулепов, Л. А. Анипченко; Под ред. В. А. Шманева. М.: Машиностроение, 1990.
3. Чурбанов А. П., Ефременков А. Б. Проектирование и применение технологической оснастки в машиностроении: Учеб. пособие. Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2010. 316 с.
4. Волчкевич Л. И. Автоматы и автоматические линии. М.: Высшая школа, 1991. Ч. II.
5. РМГ 29-99 Метрология. Основные термины и определения.
6. МИ 1317-2004 Результаты и характеристики погрешностей измерений.
7. Friis H. T. Noise figures of radio receivers // Proc. of the IRE. 1944. July. P. 419—422. DOI: 10.1109/JRPROC.1944.232049.

8. *Vondran D.* Vector corrected noise figure measurements // *Microwave Journal*. 1999. March. P. 22—38. DOI: 10.1109/ARFTG.2006.4734387.
9. *Белов С. В.* Безопасность жизнедеятельности: Учебник. М.: Высшая школа, 2004.
10. *Дальский А. М.* Цанговые зажимные механизмы. М.: Машиностроение, 1986.
11. *Корсаков В. С.* Основы конструирования приспособлений. М.: Машиностроение, 1983.
12. *Гаврина О. В., Шатова Ю. А.* Анализ двухфазного режима работы информационно-измерительной системы на основе датчика биений вала с бегущим магнитным полем // *Современные проблемы науки и образования*. 2013. № 2.

Сведения об авторах

- Виктор Михайлович Медунецкий** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО; кафедра технологии приборостроения; E-mail: vm57med@yandex.ru
- Кирилл Павлович Помпеев** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО; кафедра технологии приборостроения; E-mail: kir-pom@mail.ru
- Артём Вадимович Расщупкин** — Завод радиотехнического оборудования, инженер-технолог; Университет ИТМО; кафедра технологии приборостроения; магистрант; E-mail: archijoke@mail.ru

Рекомендована кафедрой
технологии приборостроения

Поступила в редакцию
13.03.17 г.

Ссылка для цитирования: Медунецкий В. М., Помпеев К. П., Расщупкин А. В. Прогнозирование уровня паразитирующих вибраций фрезерной системы в зоне резания посредством анализа шумовой активности // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2017. Т. 60, № 11. С. 1064—1069.

**FORECASTING THE LEVEL OF PARASITIC VIBRATIONS OF THE MILLING SYSTEM
IN THE CUTTING ZONE THROUGH ANALYSIS OF NOISE ACTIVITY**

V. M. Medunetskiy¹, K. P. Pompeev¹, A. V. Rasshchupkin^{1,2}

¹*ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia*

²*Radio Technical Apparatus Factory JSC, 192012, St. Petersburg, Russia*
E-mail: archijoke@mail.ru

Experimental data on acoustic characteristics of the working area of cutting equipment in the idle mode are analyzed. Parameters are determined that affect the frequency characteristics of the active system recognized by the value of the error in relative position of groups of elements. Relationship between of the rotary milling system runout in the absence of applied load and the noise level recorded by sound analyzers is established. A method is proposed for predicting the level of vibrational activity of a milling system in the cutting zone that occurs during the finishing of hard-to-work materials.

Keywords: vibration, noise coefficient, milling system, cutting equipment, magnet sensor, radial runout, inaccuracy

Data on authors

- Viktor M. Medunetskiy** — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Department of Instrumentation Technologies; E-mail: vm57med@yandex.ru
- Kirill P. Pompeev** — PhD, Associate Professor; ITMO University, Department of Instrumentation Technologies; E-mail: kir-pom@mail.ru
- Artiom V. Rasshchupkin** — Radio Technical Apparatus Factory JSC; Production Engineer; ITMO University, Department of Instrumentation Technologies; Undergraduate Student; E-mail: archijoke@mail.ru

For citation: Medunetskiy V. M., Pompeev K. P., Rasshchupkin A. V. Forecasting the level of parasitic vibrations of the milling system in the cutting zone through analysis of noise activity. *Journal of Instrument Engineering*. 2017. Vol. 60, N 11. P. 1064—1069 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-11-1064-1069