

Литература

1. **Mattison E. M., Robert F. C. Vessot, Shen W.** Single-State Selection System for Hydrogen Masers // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 1987. UFFC-34. N. 6. P. 622—627.
2. **Audoin C., Desaintfuscien M., Petit P., Schermann J.-P.** Design of a Double Focalization in a Hydrogen Maser // IEEE Trans. on Instrum. and Measur. 1968. V. IM-17. N. 4. P. 351—353.
3. **Urabe K., Nakagiri Y. Ohta, Kobayashi M., Saburi Y.** Majorana Effect on Atomic Frequency Standards // IEEE Trans. Instrum. Meas. 1980. V. IM-29. N. 4. P. 304—310.
4. **Aleynikov M. S., Boyko A. I.** On the single-state selection for H-maser and its signal application for fountain atomic standard // Proc. EFTF, Neuchatel. 2014. P. 169—172.
5. **Kleppner D., Goldenberg H. M., Ramsey N. F.** Theory of the Hydrogen Maser // Physical Review. 1962. V. 126. N. 2. P. 603—615.

6. **Kleppner D., Berg H. C., Crampton S. B., Ramsey N. F.** Hydrogen-Maser Principles and Techniques // Phys. Rev. 1965. V. 138. N. 4A. P. 972—983.

7. **Бойко А. И., Ёлкин Г. А., Жесткова Н. Д., Курников Г. П., Парамзин В. А.** Водородный генератор для стандарта частоты на фонтане атомов цезия // Тр. ВНИИФТРИ. 2005. Вып. 50 (142). С. 100—112.

8. **Andresen H. G.** Hydrogen maser frequency shifts due to coherently excited $\Delta m_F = \pm 1$ transitions between $F=1$ levels of the atomic hydrogen ground state // Zeitschrift fur Physik. 1968. V. 210. I. 2. P. 113—141.

9. **Boyko A. I., Aleynikov M. S.** Active H-maser with increased power of the output signal // Proc. EFTF, Prague. 2013. P. 245—248.

Дата принятия 27.07.2015 г.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

621.822.574

Методика определения траектории движения высокоскоростного ротора

**А. С. ХВОСТИКОВ, А. В. КОСМИНИН, В. С. ЩЕТИНИН,
А. В. СМЕРНОВ, Н. А. ИВАНОВА**

Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет,
Комсомольск-на-Амуре, Россия, e-mail: knastu@list.ru

Представлена методика контроля положения шпинделя на газостатических опорах с помощью виброакустической эмиссии. Приведено описание экспериментального стенда и измерительной аппаратуры.

Ключевые слова: шпиндельный узел, параметры вращения, аттрактор.

A method is described for controlling of the position of a spindle on a gasostatic support by means of acoustically-induced vibration. The description is given of an experimental stand and measuring device.

Key words: spindle block, rotation parameters, attractor.

В технологическом оборудовании соблюдение режимов вращения формообразующих узлов существенно влияет на погрешность обработки детали. С нарушением режима работы связано 50—80 % суммарной погрешности металлообрабатывающего станка [1].

Методика определения погрешности параметров вращения шпинделя основана на оценке траектории движения фиксированных точек, характеризующих положение заготовки, устройства или инструмента. Однако не всегда средства измерений (СИ) позволяют непосредственно выбрать положение указанных точек, что обусловило широкое применение методик с использованием контрольных оправок, сфер и др. [2—4]. В связи с этим возникает задача повыше-

ния точности СИ и разработки методик, уменьшающих погрешность при экспериментальном определении характеристик траекторий движения шпинделя.

Известные методы и устройства, применяемые в настоящее время при обработке информационных сигналов, имеют существенные недостатки: высокий уровень флуктуаций в выходном сигнале, связанный со способом уменьшения зоны нечувствительности датчиков [5] и шумом квантования; дополнительную погрешность, возникающую из-за необходимости использования датчика угловой скорости; избыточное количество вспомогательных устройств, предназначенных для контроля и коррекции работы СИ.

Основное влияние на траекторию движения шпинделя оказывает размер среднего радиального зазора. В [6] приведено несколько методов контроля зазора между шпинделем и вкладышем газостатического подшипника, из которых следует выделить метод виброакустической эмиссии (ВАЭ), широко применяемый для контроля процессов в режиме реального времени с высокой частотой дискретизации и точностью определения положения ротора.

При диагностике станочных систем регистрирующий датчик часто невозможно установить в области возникновения сигнала. Это характерно и для определения положения шпинделя на газостатической опоре (удобнее всего датчик разместить на корпусе шпинделя). Согласно принципу Аббе по мере удаления СИ от источника сигнала погрешность измерений возрастает в квадратичной зависимости. Установка датчика в стороне от источника сигнала обуславливает появление шумовой составляющей, которую устраняют частотной фильтрацией, отсекая низкочастотные колебания, не выявляя при этом природу возникновения самого сигнала. В классических методах обработки сигналов ВАЭ применяют разложение в ряд Фурье. Однако для этой цели корректнее использовать вейвлет-анализ, слабо чувствительный к шумовым составляющим [7]. Например, сигналы до и после фильтрации с помощью вейвлета Добеши десятого порядка с отсечением шумовых составляющих до третьего уровня имеют вид, показанный на рис. 1. Следовательно, процедура фильтрации оказывает определённое влияние на окончательную траекторию движения оси вала.

Установлено, что наиболее качественная очистка сигнала ВАЭ получается при жёсткой пороговой обработке, заключающейся в том, что из вейвлет-коэффициентов вычитают предварительно определённый порог фильтрации. Выбор порога и функции применяемого вейвлета зависит от количества и вида шумовых составляющих, расстояния от источника шума до места регистрации и т. д. [8].

Исследование траектории движения шпинделя выполнено на стенде, схема которого показана на рис. 2. В ходе проведения эксперимента по измерению ВАЭ применяли пьезоэлектрические акселерометры BC 110 и индукционные датчики AP200A-0,5,0,5,1. Их метрологические характеристики приведены в таблице. В процессе контроля положения вала сигналы с каждого подшипника регистрировали с помощью датчиков, закреплённых на корпусе во взаимно перпендикулярных направлениях. Газостатический подшипник позволяет измерять вибрацию ротора до 10g, что превышает максимально допустимые вибрации высокоскоростных роторов на газостатических опорах. В соответствии с [9] измерение вибрации ротора выполнено с помощью двух контактных датчиков-зондов, на которых установлены датчики инерционного типа 8 (см. рис. 2). В качестве датчика-зонда выступает воздушный зазор измерительного подшипника 9.

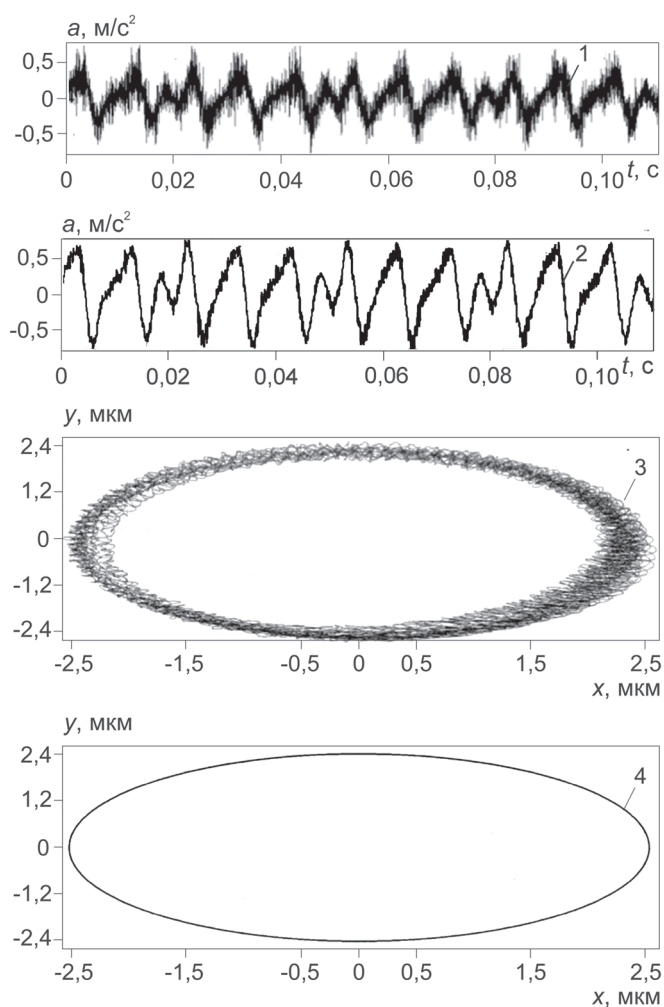


Рис. 1. Обработка сигнала ВАЭ с помощью вейвлета Добеши десятого порядка с порогом третьего уровня:

1, 2 — соответственно исходный и очищенный сигналы; 3, 4 — реконструкция аттрактора соответственно без предварительной очистки и после неё

Сигнал ВАЭ, регистрируемый с помощью пьезоэлектрических датчиков 8, поступает через усилитель на плату сбора данных, где происходит аналогово-цифровое преобразование, и далее для обработки подаётся в ЭВМ. После очистки

Метрологические характеристики датчиков

Параметр	Акселерометр BC 110	Индукционный датчик AP200A-0,5,0,5,1
Чувствительность	100 мВ на 1g	8 мВ/мкм
Частотный диапазон, Гц	0,5—10000	0—5000
Относительная поперечная чувствительность	менее 5 %	—
Амплитудный диапазон	± 50g	0,1—2,1 мм
Собственные шумы (среднее квадратическое значение)	менее $5 \cdot 10^{-4}g$	менее 5 мкм

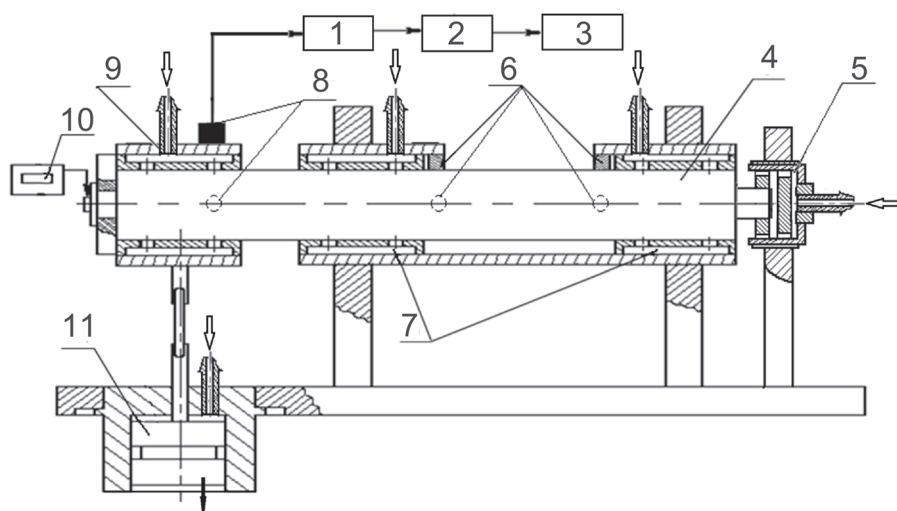


Рис. 2. Схема экспериментального стенда:

1 — усилитель; 2 — аналого-цифровой преобразователь; 3 — ЭВМ; 4 — вал; 5 — турбинный привод; 6 — индукционные датчики; 7 — опорные газостатические подшипники; 8 — датчики ВАЭ; 9 — измерительный подшипник; 10 — частотомер; 11 — нагружающее устройство

сигнала методом вейвлет-преобразования выполняется реконструкция аттрактора, позволяющая получить траекторию движения оси вала по каждой из координат. Теоретическую основу возможности реконструкции даёт теорема Такенса [8]. Как показали опыты, аттракторы имеют одинаковые формы, но разные масштабы. Регистрация сигнала в двух взаимно перпендикулярных направлениях позволяет построить траекторию движения оси вала. Например, при частоте вращения вала 30000 мин^{-1} она имеет вид эллипса (рис. 3). Такую форму траектории можно объяснить переменной динамической жёсткостью (неравномерностью эпюры давления) по окружности подшипника. Линия, очерчивающая траекторию, плавная и практически не имеет размытости. Это означает, что ось вала движется по постоянной траектории, занимая стабильное положение в подшипниках. Отметим, что реальную траекторию движения оси шпинделя с достаточной для эффективного контроля точностью можно получить, используя специальную высокоточную аппаратуру для прямых измерений, например лазерный интерферометр. Применение столь сложного и дорогого оборудования в составе систем контроля работы металлорежущих станков эко-

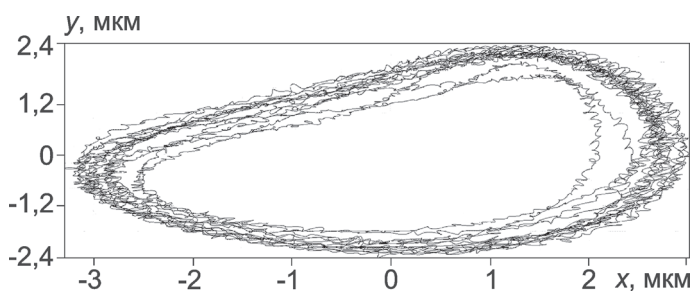


Рис. 3. Траектория движения оси вала, полученная с помощью индукционных датчиков перемещения

номически нецелесообразно из-за слишком высоких затрат на настройку и обслуживание.

Измерение траектории движения оси ротора с помощью индукционных датчиков перемещений происходит с погрешностью, обусловленной отклонением формы вала от цилиндрической. На рис. 3 изображена траектория перемещения вала, полученная с помощью двух датчиков, установленных во взаимно перпендикулярных направлениях. Из рис. 3 следует, что траектория оси вала имеет деформацию и больший разброс, чем при реконструкции аттрактора (см. рис. 1).

Таким образом, при диагностике станочных систем использование метода ВАЭ, дополненного вейвлет-очисткой, позволяет получить траекторию перемещения оси ротора на бесконтактных опорах при меньших затратах на оборудование и с достаточной для инженерной практики точностью.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (государственное задание № 9.704.2014/К).

Литература

1. Пуш А. В. Шпиндельные узлы: Качество и надёжность. М.: Машиностроение, 1992.
2. ГОСТ 22267—76. Станки металлорежущие. Схемы и способы измерений геометрических параметров.
3. Юркевич В. В. Методы испытаний обрабатывающих станков // Машиностроитель. 2006. № 10. С. 30—39.
4. Юркевич В. В., Схиртладзе А. Г., Борискин В. П. Испытания, контроль и диагностика металлообрабатывающих станков. Старый Оскол: ООО «ТНТ», 2006.
5. Елин В. Н., Санеев В. И. Численный анализ влияния частотной подставки на выходную характеристику лазерного гироскопа // Наука и Образование. МГТУ им. Баумана. 2015. № 3. С. 120—139.
6. Космынин А. В., Кабалдин Ю. Г., Виноградов В. С., Чернобай С. П. Эксплуатационные характеристики газовых опор высокоскоростных шпиндельных узлов. М.: Издательский дом «Академия Естествознания», 2006.
7. Воскобойников Ю. Е., Гочаков А. В., Колкер А. Б. Фильтрация сигналов и изображений: фурье и вейвлет алгоритмы (с примерами в Mathcad). Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2010.
8. Космынин А. В., Шаломов В. И., Щетинин В. С., Жёсткая В. Д., Хвостиков А. С., Смирнов А. В. Выходные характеристики высокоскоростных шпиндельных узлов на газовых опорах. М.: Издательский дом «Академия Естествознания», 2011.
9. ГОСТ Р ИСО 7919-1—99. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на вращающихся валах. Общие требования.

Дата принятия 31.03.2015 г.