

УДК 621.822.574

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО СТЕНДА ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ РОТОРНЫХ СИСТЕМ

**Хвостиков А.С.**

*ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет», Комсомольск-на-Амуре,  
e-mail: knastu@list.ru*

Исследование динамических характеристик прецизионных аэроэстатических подшипников является важной научной проблемой. Динамические характеристики обеспечивают устойчивость работы механизма. Бесконтактные подшипники плохо поддаются теоретическим исследованиям динамических характеристик, вследствие большого числа факторов, влияющих на результат исследований. В статье рассматривается проблема измерения биения ротора, установленного на прецизионные аэроэстатические подшипники. При измерении вибрации бесконтактными датчиками (индуктивными или оптическими) на результат измерения влияют погрешности формы ротора и погрешности структуры материала. Для компенсации погрешности формы ротора используют специально изготовленную прецизионную оправку, закрепленную на роторе. Метод измерения оказывает влияние на динамическую неустойчивость. Предложен метод компенсации погрешностей обработки ротора и несовершенства структуры материала, заключающийся в вычитании из измеренного сигнала движения оси ротора предварительно определенной поправки. Метод представляет собой способ, позволяющий значительно сократить себестоимость исследовательского стенда и исключающий необходимость изготовления прецизионной оправки, крепящейся на роторе и вносящей вклад в увеличение вибрации. Сравнительный анализ биения ротора, измеренного с помощью предложенного метода и методом прецизионной оправки, дает разброс значений не более 10%.

**Ключевые слова:** аэроэстатические опоры, высокоскоростные роторные системы, измерительный стенд, биение, аттрактор

## IMPROVEMENT OF THE MEASURING STAND FOR RESEARCHING THE DYNAMICS OF HIGH-SPEED ROTARY SYSTEMS

**Khvostikov A.S.**

*Federal State-Financed Educational Institution of Higher Learning «Komsomolsk-on-Amur State  
University», Komsomolsk-on-Amur, e-mail: knastu@list.ru*

The study of the dynamic characteristics of precision aerostatic bearings is an important scientific problem. Dynamic characteristics ensure the stability of the mechanism. Contactless bearings do not lend themselves well to theoretical studies of dynamic characteristics, due to a large number of factors that affect the result of research. The article deals with the problem of measuring the runout of a rotor mounted on precision aerostatic bearings. When measuring vibration with non-contact sensors (inductive or optical), the measurement result is affected by errors in the shape of the rotor and errors in the structure of the material. To compensate for the error in the shape of the rotor, a specially made precision mandrel fixed to the rotor is used. The measurement method affects the dynamic instability. A method for compensating rotor processing errors and imperfections in the material structure is proposed. This method consists in subtracting a pre-determined correction from the measured signal of the rotor axis movement. The method is a method that significantly reduces the cost of the research stand and eliminates the need to manufacture a precision mandrel that is attached to the rotor and contributes to increased vibration. A comparative analysis of the rotor runout measured using the proposed method and the precision mandrel method gives a spread of values of no more than 10%.

**Keywords:** aerostatic bearing, high-speed rotary systems, measuring stand, runout, attractor

В современном машиностроении все большее применение находят высокоскоростные роторные системы. Высокоскоростные роторные системы более производительны по сравнению с аналогичными механизмами с более низкими скоростями. Так, например, увеличение частоты вращения электрической машины позволяет при сохранении магнитных сил сократить диаметр ротора в квадратичной зависимости, что значительно снижает массогабаритные показатели. Проектирование высокоскоростных роторных машин является актуальной задачей машиностроения.

При проектировании высокоскоростных роторных систем встает вопрос обеспечения устойчивости их работы. При работе ротора на подшипниках его ось подвижна (траекторию оси называют кривой подвижного равновесия). Смещение ротора относительно оси симметрии опор в результате действия сил тяжести и других внешних сил при вращении обуславливает появление центробежной силы инерции. Кроме этого в опорах возникают и динамические силы, источником которых является смещение ротора относительно положения статического равновесия [1, 2].

Решение этой задачи возможно только при экспериментальном исследовании. Основой методического подхода к определению устойчивости роторных систем является оценка характеристик круговых траекторий заданных фиксированных точек, расположенных на вспомогательных базах ротора, определяющих положение исполнительных и приводных механизмов. Необходимость измерения биения ротора, в особенности на бесконтактных опорах, широко освещена не только в научных работах [3–5], но и во всевозможных нормативных документах, например [6–8].

Однако не всегда средства измерения позволяют осуществить непосредственное определение положения указанных точек [1, 2]. Биения роторов на аэростатических подшипниках или на активных магнитных подвесах достигают 50 нм [9]. Точность работы бесконтактных опор повышается, однако точность измерения растет не столь стремительно, что связано с достижением так называемой нанометровой точности.

В случае измерения круговой траектории нанометровой точности практически невозможно обеспечить прослеживаемость измерения. Требуемых национальных либо международных стандартов просто не существует, а необходимая инфраструктура измерений не развита. В обеспечения нормативно-методической базы измерения биения ротора разработаны, введены и последовательно вводятся в действие национальные стандарты.

Одним из основных средств измерения биения являются датчики перемещения. Датчики перемещения бывают как бесконтактными, так и контактными. Также они могут быть устроены таким образом, чтобы измерять перемещения через интегрирование скорости или ускорения. Существует множество видов датчиков перемещения, способных достигать разрешения порядка нанометров и менее: интерференционные, емкостные, индуктивные, оптические, оптоволоконные, пьезоэлектрические и др. датчики [10].

В основном в системах измерения микроперемещений роторов высокоскоростных роторных систем применяют лазерные интерферометры и индукционные датчики. В сочетании с быстродействующим счетчиком лазерный интерферометр отвечает всем требованиям, предъявляемым к измерительным преобразователям для измерения перемещений: имеет высокую точность и стабильность, высокую скорость света, возможность введения поправок на условия внешней среды и т.п.

К существенным недостаткам лазерных интерферометров относится большая чувствительность лазеров и оптической системы интерферометров к вибрациям, ударам и другим механическим воздействиям, колебаниям температуры и составу среды, а также неприемлемо большие габариты датчиков.

Опыт эксплуатации индукционных датчиков свидетельствует о том, что они надежны, легки в монтаже, не требуют при изготовлении дорогостоящих материалов, имеют простую конструкцию, малые габариты и массу. Благодаря этим достоинствам индуктивные датчики успешно применяются в различных областях техники. Недостатком индукционных датчиков является чувствительность к структуре металла.

Современные индукционные датчики выпускают ведущие зарубежные фирмы США, Европы и Японии: Tesa (Швейцария), Mahr (Германия), MITUTOYO (Япония), Marposs (Италия) и др. В России индукционные датчики различного назначения разрабатывают и выпускают множество приборостроительных организаций и фирм. Наиболее крупными являются: «НИИИзмерения» (г. Москва), «РОБОКОН» (г. Москва), завод «Измерон» (г. Санкт-Петербург) и ООО «МикроМех» (г. Санкт-Петербург).

Индукционные датчики, широко применяемые при измерениях перемещений ротора чувствительны к материалу измеряемого объекта и должны калиброваться отдельно для каждого материала. Для обеспечения их надлежащей работы также требуется определенная толщина измеряемого материала (как правило, это доли миллиметра в зависимости от рабочей частоты). В то время как их разрешение может достигать нанометров, их рабочий диапазон обычно составляет несколько миллиметров. Рабочая частота индуктивных датчиков может составлять 100 кГц и более. Исходя из проведенного анализа характеристик индукционных датчиков, можно отметить о возможности их применения в измерении биения ротора на бесконтактных опорах при работе на высоких частотах вращения.

Проведя анализ разработанных стендов для экспериментального исследования экспериментального определения параметров и характеристик круговых траекторий роторных систем, можно сделать вывод о необходимости применения прецизионных оправок.

Применение прецизионных оправок на высокоскоростных роторных системах сталкивается с рядом трудностей. Оправка крепится на подвижном соединении, чтобы регулировкой исключить погрешность формы и соосности, что влечет

за собой появление дисбаланса. Дисбаланс на больших частотах вращения вносит значительный вклад в потерю устойчивости роторной системы. При этом никакие изменения конструкции измерительной системы не должны ухудшать эксплуатационные характеристики роторной системы в целом.

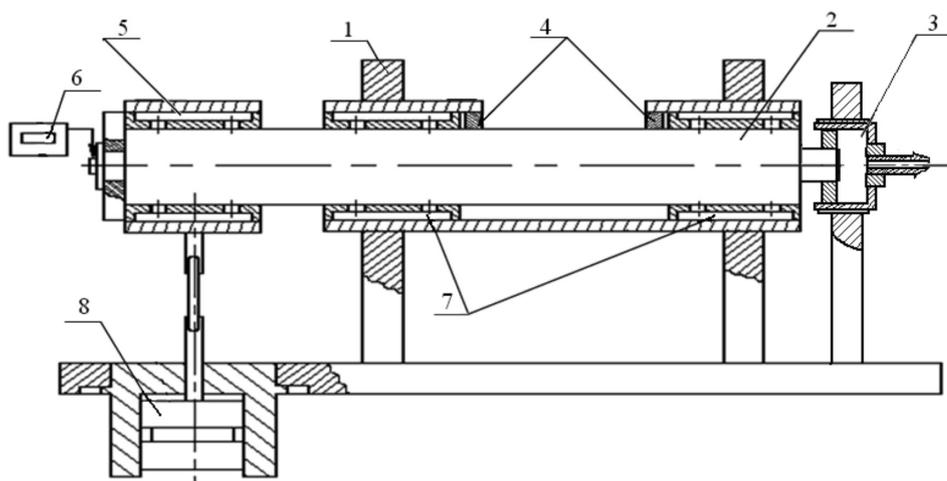
Целью исследования является разработка метода измерения биения ротора на прецизионных бесконтактных опорах с учетом влияния погрешности формы и структуры материала без использования прецизионных оправок.

#### *Описание экспериментального стенда*

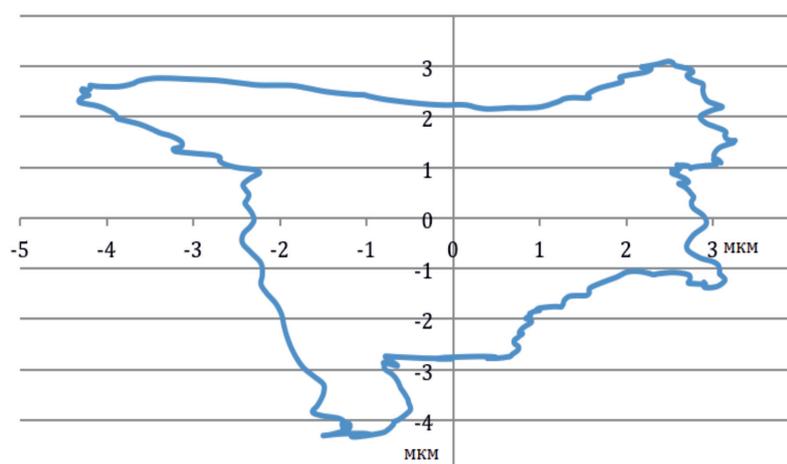
Для исследования колебания оси ротора устанавливают индуктивный датчик перемещения 4 на стационарную опору (рис. 1). Вращение вала 2 на исследуемых бескон-

тактных опорах 7 выполняют с помощью турбинного привода 3. Для комплексного исследования стенд оснащают консольным нагружающим устройством. Бесконтактная опора нагружающего устройства 5 нагружается силой поршня 8. Давление, подаваемое на поршень, регулирует усилие нагружения. Частота вращения определяется с помощью фазохронометрического отметчика.

На рис. 2 изображена круговая траектория движения вала без прецизионной оправки с погрешностью вала порядка 5 мкм. Траектория вала стабильна, однако как таковых перемещений центра вала не происходит. Во время эксперимента происходит регистрация только кумулятивной погрешности – вызванной погрешности формы и неравномерностью свойств материала, так как вибрация оси ротора незначительна.



*Рис. 1. Конструкция экспериментального стенда*



*Рис. 2. Круговая траектория вала с погрешностью формы и неравномерностью свойств материала*

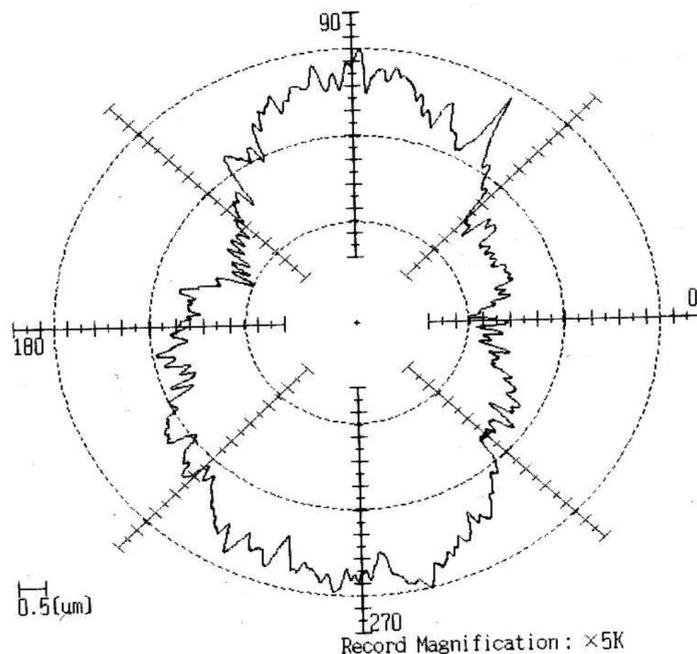


Рис. 3. Круглограмма отклонения от округлости формы ротора

На рис. 3 представлена круглограмма отклонения от округлости формы ротора в зоне измерения круговой траектории индукционными датчиками. Анализ круглограммы и сравнение ее с круговой траекторией вала с погрешностью формы и неравномерностью свойств материала при незначительной вибрации центра ротора позволяет сделать вывод о необходимости учета не только погрешности формы при контроле круговой траектории, но и погрешности неравномерностью свойств материала.

В КНАГУ используется методика компенсации погрешности формы и неравномерностью свойств материала вала, которая заключается в следующем:

- Регистрации круговой траектории при минимальной скорости и отклонениях оси вала.

- Усреднение по нескольким траекториям погрешности формы и неравномерности свойств материала вала.

- Определение по сигналу отметчика реального положения поворота исследуемого вала для каждой точки измеренной круговой траектории, отображающей погрешность формы и неравномерность свойств материала вала.

- По предварительно построенной круговой траектории вала с погрешностью формы и неравномерностью свойств материала при отсутствии возмущающего воз-

действия получают сигнал отклонения формы вала с учетом физических свойств вала. Применение прецизионных кругломеров не дает достоверных результатов, так как в этом случае не учитываются внутренние свойства материала вала.

- Круговую траекторию разбивают на участки (число участков определяется исходя из требуемой точности измерения) и для каждого участка получают функцию погрешности формы и неравномерности свойств материала вала.

- При регистрации сигнала во время проведения экспериментальных исследований динамики опор определяется положение поворота исследуемого вала для каждой точки исследуемой круговой траектории и вычитают соответствующее значение функции погрешности формы и неравномерности свойств материала вала.

На рис. 4 представлена форма траектории оси ротора за вычитанием погрешности формы, показывающие возможности метода вычитания погрешности формы и несовершенства структуры материала.

### Выводы

Разработанная методика позволяет компенсировать погрешность формы неравномерностью свойств материала ротора без применения дорогостоящей аппаратуры лазерной интерферометрии и образцовых оправок.

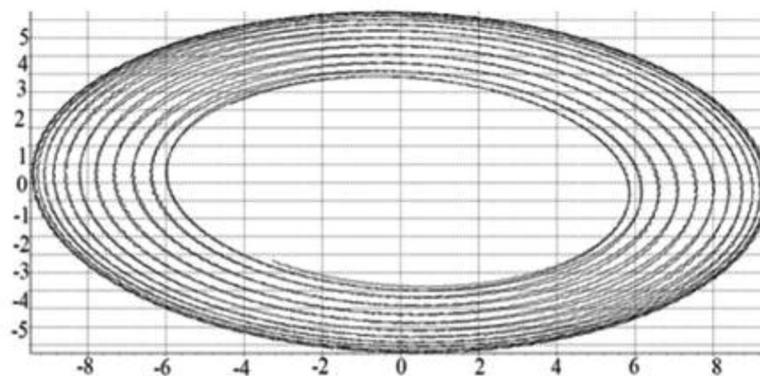


Рис. 4. Форма траектории оси ротора на газостатических подшипниках

Однако при этом остаются погрешности, не связанные с датчиками перемещений, а зависящие от правильности сборки прибора контроля биения ротора, как, например, косинусная погрешность. По данным [2] величина таких погрешностей может достигать нескольких нанометров, что значительно превышает предел ожидаемой точности измерения.

#### Список литературы

1. Хвостиков А.С., Космынин А.В. Динамический анализ судовых энергетических установок // Фундаментальные исследования океанотехники и морской инфраструктуры: Теория. Эксперимент. Практика: материалы Междунар. науч.-техн. конф., (Комсомольск-на-Амуре, 12–16 мая 2015 г.). Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2015. С. 208–210.

2. Khvostikov A.S., Kosmyinin A.V., Shchetinin V.S., Smirnov A.V., Ivanova N.A. A technique of determining the trajectory of a high-speed rotor Measurement Techniques. 2016. vol. 59. no 3. P. 239–242.

3. Потапов В.Т., Жамалетдинов М.Н., Жамалетдинов Н.М., Мамедов А.М., Потапов Т.В. Волоконно-оптическое устройство для измерения абсолютных расстояний

и перемещений с нанометровым разрешением // Приборы и техника эксперимента. 2013. № 5. С. 103–107.

4. Сабиров Ф.С., Савинов С.Ю. Диагностика и контроль точности приводов подачи многокоординатных металлорежущих станков с ЧПУ // Измерительная техника. 2011. № 8. С. 20–22.

5. Козочкин М.П., Порватов А.Н., Сабиров Ф.С. Оснащение технологического оборудования информационно-измерительными системами // Измерительная техника. 2012. № 5. С. 29–32.

6. ГОСТ Р 8.669-2009 Государственная система обеспечения единства измерений. Виброметры с пьезоэлектрическими, индукционными и вихретоковыми вибропреобразователями. Методика поверки. М.: Стандартинформ, 2010. 43 с.

7. ГОСТ 25051.3-83 Установки испытательные вибрационные. Методика аттестации. М.: Издательство стандартов, 2003. 18 с.

8. ГОСТ 25275-82 Система стандартов по вибрации. Приборы для измерения вибрации вращающихся машин. Общие технические требования. М.: Издательство стандартов, 1994. 10 с.

9. Кирьянов А.В., Котов М.С. Разработка средства измерения биения ротора механотронного модуля в нанометровом диапазоне // Сборник научных трудов НГТУ. 2011. № 4 (66). С. 35–46.

10. Лич Р. Инженерные основы измерений нанометровой точности: учебное издание. Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2012. 400 с.