

ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА АКТИВНОГО АЭРОСТАТИЧЕСКОГО ПОДШИПНИКА НА БАЗЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ КОМБИНИРОВАННОГО ТИПА

Алексей Валерьевич Кирьянов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Конструкторско-технологический институт научного приборостроения» СО РАН, кандидат технических наук, научный сотрудник, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, тел. (383) 306-62-20, e-mail: alexey@tdisie.nsc.ru

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет», доцент, 630073, Россия, г. Новосибирск, проспект К. Маркса, 20, тел. (383) 346-11-19, e-mail: oao_nips@bk.ru

Владимир Викторович Чуканов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, ведущий электроник, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, тел. (383) 306-62-20, e-mail: vlchuk@ngs.ru

Валерий Павлович Кирьянов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт автоматики и электрометрии» Сибирского отделения Российской академии наук, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, 630090, Россия, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1, тел.: (383) 330-51-34, e-mail: kiryanov@iae.nsk.su

Сергей Васильевич Перебейнос

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт автоматики и электрометрии» Сибирского отделения Российской академии наук, доктор технических наук, научный сотрудник, 630090, Россия, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1, тел.: (383) 333-23-87, e-mail: perebeynos@iae.nsk.su

В статье рассмотрен принцип построения информационно-управляющей системы для аэростатического подшипника с активной стабилизацией пространственного положения ротора на базе фотоэлектрического преобразователя комбинированного типа. Использование такого преобразователя позволит повысить точность измерений за счет одновременного измерения угла поворота и текущих отклонений ротора аэростатического подшипника в радиальном направлении.

Ключевые слова: фотоэлектрический преобразователь комбинированного типа, аэростатический подшипник, информационно-управляющая система.

THE INFORMATION-CONTROLLING SYSTEM FOR AN ACTIVE AEROSTATIC BEARING ON A BASE OF COMBINED PHOTOELECTRIC ENCODER

Alexey V. Kiryanov

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS, Ph. D., researcher, 630058, Russia, Novosibirsk, 41, Russkaya str., tel. (383)306-62-20, e-mail: alexey@tdisie.nsc.ru
Novosibirsk State Technical University, Assistant professor, 630073, Novosibirsk, 20, Karl Marks Prospekt, tel. (383) 346-11-19, e-mail: oao_nips@bk.ru

Vladimir V. Chukanov

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS, Leading electronics, 630058, Russia, Novosibirsk, 41, Russkaya str., tel. (383)306-62-20, e-mail: vlchuk@ngs.ru

Valeriy P. Kiryanov

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Doctor of Sciences, leading researcher, 630090, Russia, Novosibirsk, 1, Academician Koptyug prosp., tel. (383) 330-51-34, e-mail: kiryanov@iae.nsk.su

Sergey V. Perebeynos

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Doctor of Sciences, researcher, 630090, Russia, Novosibirsk, 1, Academician Koptyug prosp., tel.: 333-23-87, e-mail: perebeynos@iae.nsk.su

The principle of the new type of information-controlling system on a base of combined photoelectric encoder for an active aerostatic bearing is discussed. The use of such encoder will allow increasing the accuracy of angular measurement due to precision measurement of rotation angle and the shifting of encoder axis in the radial direction.

Key words: combined photoelectric encoder, aerostatic bearing, information-controlling system.

1. Введение. Прецизионные аэростатические подшипники являются базовым элементом механотронных модулей круговых перемещений для высокоточного измерительного и технологического оборудования, используемого в нанотехнологиях. К нему относятся: прецизионная фотолитография, прецизионная обработка материалов, прецизионные лазерные генераторы изображений для синтеза топологии чувствительных элементов интегральных датчиков физических величин (ИДФВ), особоточные поворотные столы для исследования в биотехнологии аномальной дифракции в макромолекулах.

До настоящего времени при разработке и создании данных устройств использовались и используются аэростатические подшипники пассивного типа (ПАП), реализующие так называемую катушечную схему аэростатических опор. Для такой кинематической схемы ПАП характерна более высокая жёсткость опор в торцевом и радиальном направлениях и существенно меньшая жёсткость для угловых нагрузок. Для повышения точностных характеристик ПАП широко используются различные приёмы статической и динамической балансировки его вращающихся частей: ротора, двигателя, планшайбы и т.д. Максимальная стабильность оси вращения, достигаемая при использовании данных приемов $\approx 0,10 \div 0,15$ мкм. Однако возможности данных методов к настоящему времени практически исчерпаны, т.к. в конечном счете определяются качеством технологического оборудования, на котором изготавливаются основные детали ПАП. По этой причине эти аэростатические подшипники составляют базу технологических комплексов микронного и субмикронного разрешения.

Для целей нанотехнологий в последнее время за рубежом стали разрабатываться так называемые активные аэростатические подшипники (ААП). В их конструкции используется адаптивная информационно-управляющая система стабилизации пространственного положения ротора, которая состоит из информационно-управляющей и исполнительной части. Как правило, отрицательная обратная связь исполнительной части ААП строится на базе активных жиклёров, перемещаемых пьезоэлектрическими актюаторами, на основе информа-

ции о текущих отклонениях оси ротора, получаемой от информационно-управляющей части. В результате резко повышается статическая жёсткость аэростатических опор подшипника и значительно (в 5 – 6 раз) снижается динамическая погрешность движения ротора. Здесь наиболее далеко продвинулись японские исследователи. При малых оборотах ротора они зарегистрировали предельно низкую (порядка 15 – 20 нм) неопределённость положения оси ротора ААП.

В настоящее время, как показал анализ технической литературы, при разработке информационно-управляющей части системы стабилизации ротора ААП иностранные специалисты используют два принципиально разных типа измерительных преобразователей:

- цифровые преобразователи угла (ЦПУ), которые используются для стабилизации скорости вращения или задания угла поворота при работе в режиме поворотного стола. Фотоэлектрические цифровые преобразователи угла (ФЦПУ) обеспечивают наиболее высокую точность измерений при существенно меньших по сравнению с другими типами ЦПУ массогабаритных показателях и поэтому получили наибольшее распространение в конструкциях ААП [1];

- цифровые преобразователи линейных перемещений (ЦЛП), которые используются для измерения текущих отклонений оси ротора в радиальном направлении. Большинство разработчиков для измерения биения оси с нанометровым разрешением используют *емкостные* преобразователи совместно с эталонной металлической сферой, установленной на вращающийся ротор аэростатического подшипника и тщательно отъюстированной [2].

Однако, обоим типам измерительных преобразователей присущи ограничения, которые затрудняют достижение разработчиками ААП точностных параметров, предъявляемых к изделиям при использовании в нанотехнологиях.

2. Стандартное использование ФЦПУ и ЦЛП в информационно-управляющей части ААП. 1) Типичная конструкция инкрементального ФЦПУ содержит: *измерительный растр* с определённым числом штрихов и *меткой нуля* и так называемую считывающую головку [3]. В её состав входят: осветительный блок, состоящий из *светодиода* и *конденсора*, *индикаторная решётка* и печатная плата с *фотодиодами*. Измерительный растр вместе с индикаторной решёткой образуют так называемое растровое сопряжение. Выбирая параметры углоизмерительного растра и индикаторной решетки можно получить функцию пропускания заданной формы с требуемым коэффициентом модуляции, которая важна для снижения погрешности измерения угла поворота [4]. Основным вклад в результирующую погрешность ФЦПУ вносят такие составляющие погрешности: δ_e – погрешность от эксцентриситета e установки растра на вал, δ_n – погрешность от биения подшипников вала, на который установлен измерительный растр, и δ_p – погрешность, обусловленная качеством изготовления самого измерительного растра.

В настоящее время основным методом снижения погрешности ФЦПУ является использование принципа путевого усреднения [5], основанного на использовании в конструкции преобразователя нескольких дополнительных счи-

тывающих головок, однотипных с основной головкой и расположенных по кругу с равным шагом, выходные сигналы которых суммируют с выходным сигналом основной головки. Эффект снижения погрешности существенно зависит от числа дополнительных головок. Пример повышения точности ФЦПУ при использовании 4-х считывающих головок, приведён на рис. 1. Из графика на рис. 1,а видно, что погрешность измерительного растра $\approx \pm 1,5''$ [6]. При этом погрешность ФЦПУ, созданного на основе подобного растра, не превышает $\pm 0,5''$ (см. рис. 1,б) т.е. почти в 3 раза меньше, чем исходная погрешность растра. Погрешность преобразователя свободна, прежде всего, от δ_3 , а также от всех нечётных гармоник и ряда четных (2, 6, 10 и т.д.) гармоник, вносимых δ_n и δ_p .

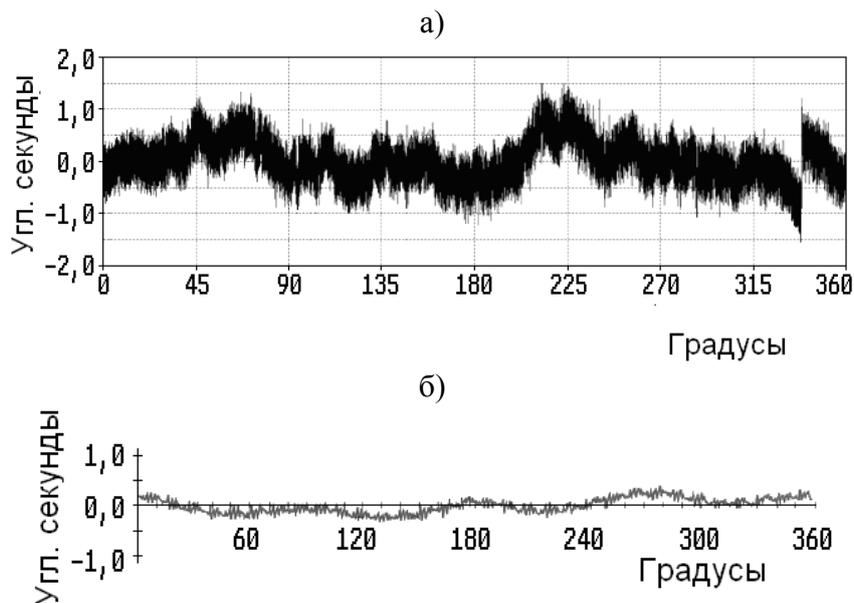


Рис. 1. Погрешность растра и результирующая погрешность преобразователя ROD-800 фирмы Heidenhain, Германия: погрешность растра (а) и результирующая погрешность преобразователя (б)

Однако, данному методу свойственны некоторые ограничения. В результате сложения одноимённых сигналов со всех головок ФЦПУ происходит формирование двух новых квадратурных сигналов, фаза которых не искажена эксцентриситетом установки растра на оси, но амплитуда этих сигналов промодулирована по закону $\cos \frac{2\pi}{w} e$. Глубина модуляции пропорциональна величине отношения эксцентриситета e к периоду w . Например, при $e = \frac{1}{4} w$ имеет место 100% уменьшение амплитуды вновь сформированных квадратур и, как следствие, в некотором угловом секторе полностью нарушается ход преобразования угла поворота в код. Реально нарушения функционирования ФЦПУ возникают при существенно меньшей величине модуляции. Поэтому стараются не допускать модуляцию амплитуды суммарных квадратур более чем на 10% от максимума. Этому соответствует значение допустимого эксцентриситета (как от неточной вклейки растра, так и от биения подшипников) не более 0,1 периода растра.

2) Достаточно широкое использование емкостных преобразователей для измерения биения ротора ААП с нанометровым разрешением объясняется тем, что существующие виброметры с использованием в качестве измерительного узла оптического датчика относительных колебаний имеют чувствительность не менее 10мВ/мкм в частотном диапазоне 22-600 Гц. Серийно выпускаемые акселерометры обеспечивают минимальный уровень виброускорений до 10^{-3} м/с², что на частоте 20 Гц не позволяет фиксировать колебания с амплитудой менее чем 0,09 мкм [7].

Однако и емкостные преобразователи имеют ряд ограничений. Выходной сигнал емкостного преобразователя в общем виде можно представить как:

$$V(t) = F(\Delta X(t)) = F(\Delta R(t) + e_{\text{ротора}}(t) + \Delta_{\text{форма}}(t) + \Delta T(t)), \quad (1)$$

где $\Delta X(t)$ - измеряемая величина, $\Delta R(t)$ - биение оси вращения, $e_{\text{ротора}}(t)$ - эксцентриситет положения ротора в статоре, вызванное, например, неидеальностью жиклеров, $\Delta_{\text{форма}}(t)$ - отклонение реальной формы ротора от идеальной, $\Delta T(t)$ - температурное изменение базы, на которую установлены емкостные преобразователи. И если $e_{\text{ротора}}(t)$ и $\Delta_{\text{форма}}(t)$ являются постоянными величинами и могут быть учтены калибровкой, то изменение $\Delta T(t)$ может вносить заметные изменения в результат измерения.

3. Использование фотоэлектрических преобразователей комбинированного типа в информационно-управляющей части ААП. Точность угловых измерений можно повысить, если использовать подходы, изложенные в [8]. Результат достигается за счёт иной организации процесса компенсации составляющих погрешности измерений, при которой систематические составляющие погрешности измерений измеряются заранее, запоминаются и вычитаются из результата измерений, а случайные – также измеряются, но в реальном времени, и вычитаются из текущего результата измерений.

Систематическая составляющая погрешности измерений – δ_p (погрешность изготовления растра) будет компенсироваться с помощью файла коррекции, получаемого с помощью специальной углоизмерительной установки, например АС-700 [6]. Это первое принципиальное отличие предлагаемого метода от классического. Случайная погрешность измерений, вызванная пространственной нестабильностью положения растра при его вращении вместе с валом, обусловленная совместным действием эксцентриситета установки растра на вал и биениями подшипников будет определяться одновременно с измерением угла поворота с помощью дополнительной измерительной головки. Функционально данная головка регистрирует линейные смещения растра в тангенциальном направлении (относительно используемой считывающей головки для угловых измерений). В этом заключается второе принципиальное отличие данной реализации метода по сравнению с известными преобразователями. В связи с этим данному типу преобразователя разработчики проекта дали название – *фото-*

электрические преобразователи комбинированного типа (ФПКТ). Его устройство показано на рис. 2.

Устройство содержит радиальный растр 1, считывающую головку 2, кольцевую окружность 3; измерительные головки 4 и 5, блоки усилителей сигналов 6 и 7, блок оцифровки и масштабирования 8, блок формирования текущей угловой координаты 9, блок памяти 10, блок обработки сигналов 11 и блок коррекции результата угловых измерений 12.

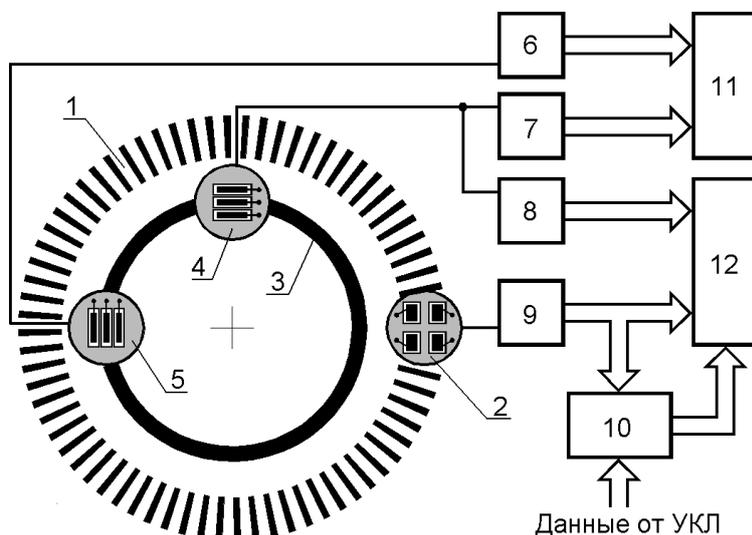


Рис. 2. Устройство фотоэлектрического преобразователя комбинированного типа

Угловые смещения растра 1 регистрируются с помощью головки считывания 2 и блока формирования текущей угловой координаты 9 по хорошо известным алгоритмам. Величину линейного смещения растра 1 в тангенциальном направлении контролируют с помощью кольцевой окружности 3, синтезированной на стеклянной заготовке одновременно с радиальным растром 1. С кольцевой окружностью 3 сопряжены дополнительные измерительные головки 4 и 5, установленные со смещением на угол 90° и 180° относительно позиции считывающей головки 2. Эти головки сформированы на основе позиционно-чувствительного элемента, например, трёхщелевого приёмника [9]. С каждой щелью сопряжён отдельный фотоприёмник. Выходные сигналы фотоприёмников А, В и С складывают между собой с помощью операционного усилителя в соответствии с выражением:

$$U_{\text{вых}} = U_A + U_C - 2U_B, \quad (2)$$

где U_A , U_B и U_C – выходные сигналы фотоприёмников А, В и С, соответственно. Когда граница окружности 3 находится точно посередине окна В, суммарный сигнал $U_{\text{вых}}$ равен нулю.

Выходной сигнал измерительных головок 4 и 5 в информационно-управляющей части системы ААП будет использован двояко. Во-первых, сигнал измерительной головки 4 оцифровывается в блоке 8 и, путём деления его на среднее значение радиуса измерительного растра, переводится в текущее значение угловой поправки, обусловленной пространственной нестабильностью

положения раstra относительно оси вращения вала. Далее в блоке коррекции 12 производится коррекция результатов измерений, поступивших с выхода блока 9, путём учёта данных из блока памяти 10, в котором хранятся данные об угловой погрешности измерительного раstra, и данных с выхода блока 8, и формируется точное значение угла поворота ротора. Во-вторых, измерительные головки 4 и 5, блоки усилителей сигналов 6 и 7, а также блок обработки информации 11 используются для измерения биения оси вращения ротора аэростатического подшипника. В этом случае сигналы с этих головок можно рассматривать как $x(t)$ и $y(t)$ – координаты ротора. Поскольку модуль дисбаланса пропорционален амплитуде колебаний, то величина $\sqrt{x(t)^2 + y(t)^2}$ пропорциональна модулю дисбаланса. Как уже указывалось в п. 2, в состав считывающей головки 2 входит «метка нуля», которая связывает неподвижную систему координат с системой вращающейся вместе со шпинделем. В момент прохождения «нуля» величина $\arctan \frac{y(t)}{x(t)}$ есть угол дисбаланса.

4. Оценка эффективности использования фотоэлектрических преобразователей комбинированного типа. Эффективность новой конструкции для информационно-управляющей части ААП можно оценить на примере гипотетического преобразователя, по габаритным параметрам аналогичного преобразователю ERO-725 (Heidenhain, Германия) [3]. Его параметры следующие: диаметр раstra – 185 мм, число штрихов – 36 000. При изготовлении раstra на лазерном генераторе изображений с круговым сканированием можно ожидать результирующую погрешность на уровне $\leq \pm 0,32''$ [10]. Основное разрешение преобразователя составит $36''$. Если обеспечен коэффициент интерполяции, равный 128, то погрешность квантования не превысит $\pm 0,28''$.

Известно, что трёхщелевой приёмник позволяет достичь чувствительности к смещению края штриха (линии) порядка $\pm (6 \dots 8)$ нм [9]. При таких параметрах измерительной головки 2 текущие биения вала и раstra могут быть скомпенсированы до уровня, при котором их вклад в угловую погрешность данного преобразователя не превысит $\pm (0,04 \dots 0,055)''$.

Погрешность изготовления раstra оценивается с помощью установки АС-700. В соответствии с паспортом на эту установку, невоспроизводимость результатов контроля составляет $\pm 0,3''$.

Статистическое сложение трех неопределённостей, соответствующих операциям контроля погрешности раstra, контроля биений границы кольцевой окружности и погрешности квантования дадут результат $\pm 0,4''$. То есть результирующая погрешность ФПКТ уменьшается в 5 раз по сравнению с моделью ERO-725 (Heidenhain, Германия).

5. Выводы. Использование фотоэлектрического преобразователя комбинированного типа (ФПКТ) в информационно-управляющей части системы активной стабилизации пространственного положения ротора аэростатического подшипника позволит:

– повысить точность угловых измерений за счет внесения поправки, вычисляемой на основе данных, полученных из канала биения оси вращения аэростатического подшипника;

– компенсировать биения оси вращения аэростатического подшипника за счёт использования данных, полученных из канала биения оси вращения аэростатического подшипника, используемых в качестве входных сигналов для исполнительной части системы стабилизации пространственного положения ротора;

– формирование на одном оптическом носителе топологии 2-х измерительных преобразователей (углового и линейного), позволит значительно упростить конструкцию ААП.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ, грант № 13-07-00081-А.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Aerotech [Electronic resource]. – [s.l.: s.n., 2005]. – Access: <http://www.aerotech.com/product-catalog/stages/rotary-stages/abrs.aspx>, free. – Title from screen.
2. Lion Precision [Electronic resource]. – [s.l.: s.n., 2005]. – Access: <http://www.lionprecision.com/sea/index.html>, free. – Title from screen.
3. Angular encoders: General Catalog / Heidenhain GmbH. – Traunreut, Germany: Heidenhain GmbH, 2000. – 82 p.
4. Преснухин Л.Н., Майоров С.А., Меськин И.В., Шаньгин В.Ф. Фотоэлектрические преобразователи информации // Под ред. Л.Н. Преснухина. – М.: Машиностроение, 1974. – 376 с.
5. Ионак В.Ф. Приборы кинематического контроля // М.: Машиностроение, 1981. – 128 с.
6. Кирьянов В.П., Кирьянов А.В., Кручинин Д.Ю., Яковлев О.Б. Анализ современных технологий синтеза углоизмерительных структур для высокоточных угловых измерений // Оптический журнал. – 2007. – №12. – С. 40–49.
7. Азаров В.А., Позняк Г.Г., Рогов В.А. Исследование динамических характеристик шпинделя особоточного токарного станка // Технология машиностроения. – 2003. – № 2. – С. 13-18.
8. Пат. 2433413 С1. Российская Федерация, МПК G01P 3/36. Способ повышения точности измерения угла поворота /А.В. Кирьянов, В.П. Кирьянов; – 2010124366/28; заявл. 15.06.2010; опубл. 10.11.2011 г., Бюл. № 31. – 2с.: ил.
9. Sawabe M., Maeda F., Yamaryo Y., Shimomura T., Saruki H., Aoyagi S. Development of the Vacuum Interferometric Comparator for Calibrating the Fine Linear Encoders and Scales / 7-th International Symposium on Laser Metrology Applied to Science, Industry and Everyday Life. Proc. SPIE. – 2002. – Vol. 4900. – Part 1. – P. 282–289.
10. Кирьянов А.В. Критерий оценки погрешности технологических комплексов для синтеза углоизмерительных структур // Сборник научных трудов НГТУ. – 2008. – №3 (53). – С. 19-26.

© А.В. Кирьянов, В.В. Чуканов, В.П. Кирьянов, С.В. Перебейнос, 2013