ISSN 0320-7102

Том
52

АВТОМЕТРИЯ

OPTOELECTRONICS, INSTRUMENTATION AND DATA PROCESSING

№ 4
2016

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

АВТОМЕТРИЯ

ОСНОВАН В ЯНВАРЕ 1965 ГОДА ВЫХОДИТ 6 РАЗ В ГОД
Том 52 2016 № 4
ИЮЛЬ — АВГУСТ

СОДЕРЖАНИЕ

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

Коноваленко И. В., Пастух О. А., Марущак П. О. Использование нечётких множеств для оценки геометрических параметров повреждений поверхности ... 3

Ющенко В. П., Литвиненко С. А. Влияние диаграммы направленности на качество реконструкции объектов при круговом синтезе апертуры ... 14

Волков В. Г., Демьянов Д. Н. Синтез функциональных наблюдателей с использованием линейных матричных неравенств ... 21

Гончаренко А. И., Таранцев И. Г., Лысаков К. Ф. Слепой алгоритм внедрения цифровых водяных знаков в последовательность телевизионных изображений ... 30

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Кибиткин В. В., Солодушкин А. И., Плешанов В. С. Идентификация поля смещений сдвигового типа и определение его характеристик ... 37

Кирьянов В. П., Кирьянов А. В., Чуканов В. В. Использование дифференциального метода измерений для контроля точности прецизионных углоизмерительных структур ... 45

Григорьев М. А., Райфельд М. А. Обнаружение сейсмоактивного объекта в области размещения охранной системы с применением последовательного критерия Вальда ... 53

Муравьева О. В., Муравьев В. В., Габбасова М. А., Булдакова И. В., Соков М. Ю. Анализ отражённых сигналов при контроле цилиндрических образцов многократным зеркально-теневым методом ... 62

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МИКРО- И ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

Анцыгин В. Д., Лосев В. Ф., Мамрашев А. А., Николаев Н. А., Потатуркин О. И. Особенности исследования анизотропных сред методами импульсной терагерцовой спектроскопии ... 71

Зверев А. В., Макаров Ю. С., Михантьев Е. А., Дворецкий С. А. Ячейка кремниевой интегральной микросхемы считывания со встроенным аналого-цифровым преобразователем. 79

Заболотский А. А. Локальные электрические поля в ансамблях композитных наночастиц ... 88

Скворцов Б. В., Живоносновская Д. М. Метод бесконтактных измерений электромагнитных параметров наноматериалов ... 98

ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Шелковников В. В., Васильев Е. В., Русских В. В., Эктова Л. В., Бережная В. Н., Пен Е. Ф. Свойства монохромных и двухцветных голограмм в слоистых фотополимерных материалах ... 107

Угожаев В. Д. Предельные характеристики перестраиваемого вращением двухлучевого интерферометра с неподвижным фоточувствительным элементом ... 118

ИЗДАТЕЛЬСТВО СО РАН
НОВОСИБИРСК
2016

УДК 53.087.92 + 681.7.064.64

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТОЧНОСТИ ПРЕЦИЗИОННЫХ УГЛОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СТРУКТУР*

В. П. Кирьянов, А. В. Кирьянов, В. В. Чуканов

Институт автоматики и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: alexey@iae.nsk.su

Рассмотрены особенности контроля метрологических параметров оптических шкал, лимбов или кодовых дисков. Предложена концепция построения интеллектуального мехатронного модуля на основе аэростатического подшипника для высокопроизводительной углоизмерительной машины. Положительный эффект достигнут за счёт применения дифференциального метода измерений, позволяющего выделить искажающий вклад, вносимый измерительной установкой, в результирующую погрешность контролируемых структур.

Ключевые слова: углоизмерительные структуры, дифференциальный метод контроля, датчики углового положения, аэростатический подшипник, углоизмерительная машина.

DOI: 10.15372/AUT20160406

Введение. При изготовлении современного углоизмерительного оборудования (теодолитов, тахеометров, гониометров и т. д.) качество продукции повышается, если на 100 % реализован входной контроль метрологических параметров оптических шкал, лимбов или кодовых дисков, входящих в состав отсчётных систем приборов.

Процедура контроля таких изделий (далее углоизмерительные структуры (УИС)) имеет ряд особенностей по сравнению с контролем собранных датчиков углового положения (ДУП). Не всякое отклонение значения угла поворота контролируемой УИС, регистрируемого с помощью измерительной установки (ИУ), от задаваемого может трактоваться как погрешность её изготовления. Заметный вклад в различие регистрируемых значений вносится самой ИУ и, прежде всего, нестабильностью пространственного положения оси ротора её шпиндельного узла, на предметном столике которого размещается контролируемая структура.

Основным приёмом, обеспечивающим объективное оценивание точности контролируемых структур, является отделение вклада, вносимого установкой, в результат контроля УИС. Такую возможность предоставляет, например, фазостатистический метод измерений [1], известный также как метод кросскалибровки [2], который за счёт регистрации относительных смещений штрихов двух шкал при их различных взаимных положениях позволяет разделить вклады от обеих шкал и оценить погрешность каждой из них. Однако для достижения нужного качества контроля метод требует набора достаточно большого объёма измерений. Так, предложенная в [1] реализация метода, выполняемая в автоматическом режиме, даёт возможность производить калибровку ДУП с неопределённостью $\pm 0{,}2''$ за 30 мин при использовании 360 различных взаимных положений шкал (шаг смещения 1°). Для промышленного применения, когда необходимо оперативно получить данные о партии контролируемых изделий, такой подход не всегда приемлем.

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 13-07-00081).

Целью предлагаемой работы является создание концепции построения интеллектуального мехатронного модуля для высокопроизводительной ИУ, обеспечивающей высокоточный контроль метрологических параметров оптических УИС в промышленных условиях. Показано, что необходимый результат может быть достигнут за единичный измерительный цикл, если применяется дифференциальный метод измерений, позволяющий отделить искажающий вклад, вносимый измерительной установкой.

Особенности контроля метрологических параметров углоизмерительных структур. Наиболее часто метрологический контроль УИС осуществляется с помощью специализированных ИУ, использующих прецизионный узел вращения, систему считывания и набор специальных оправок для размещения контролируемых структур соосно с референтным ДУН установки.

Примером может служить установка АС-700, эксплуатируемая на Уральском оптико-механическом заводе [3], упрощённая функциональная схема которой приведена на рис. 1. Статор *1* и ротор *2* образуют шпиндельный узел на основе аэростатического подшипника. На фланце ротора размещён измерительный растр *3* референтного ДУП с 28800 штрихами. В состав датчика входят пять считывающих головок *4*, четыре из которых формируют референтную сетку угловых меток, а одна — нулевую метку. На верхнем торце ротора устанавливают оправку *5* для соосного размещения контролируемых УИС *6*. Регистрация границ топологии УИС, осуществляемая с помощью считывающей головки *7*, происходит с погрешностью $\delta\varphi$, обусловленной, прежде всего, ограниченной точностью ДУП, используемого в качестве референтного. Величина погрешности регистрации границ контролируемых структур δ_l зависит как от точности указанного ДУП, так и от текущего радиуса круговой траектории сканирования. Значение δ_l в микрометрах может быть представлено выражением

$$\delta_l = (4{,}84 \cdot 10^{-6}) r \Delta\varphi, \tag{1}$$

где r — значение радиуса контроля (м), $\Delta\varphi$ — погрешность ДУП (угл. с). Эта составляющая погрешности имеет особое значение при контроле топологии УИС на больших радиусах. Например, чтобы обеспечить неопределённость контроля границ элементов УИС на уровне 0,1 мкм на радиусах порядка 100 мм, необходимо иметь референтный ДУП с погрешностью не хуже $\pm(0{,}2\text{–}0{,}3)''$.

Другим, не менее важным условием достижения высокой точности контроля УИС является требование максимального приближения траектории сканирования структур счи-

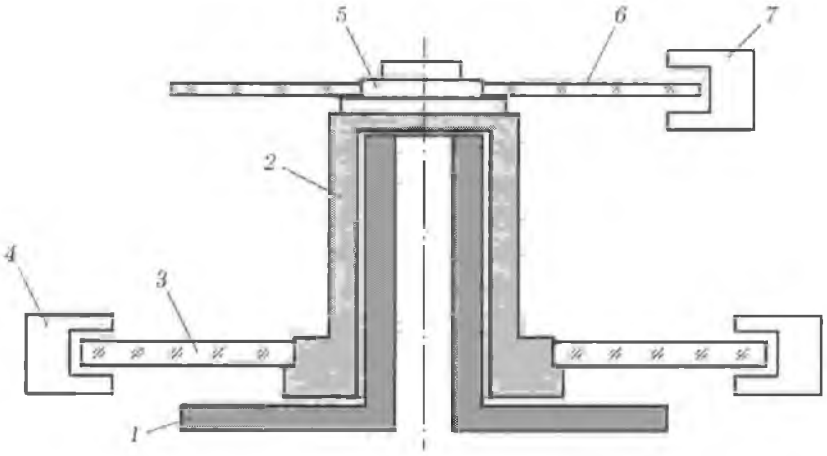

Рис. 1

тывающей головкой ИУ к идеальной круговой, центр которой совпадает с центром симметрии УИС. Так, если сканирование УИС происходит по круговой траектории, центр которой не совмещён с центром симметрии (т. е. имеет место эксцентриситет e), то результат контроля $\delta\varphi$ будет искажён. Текущее искажение фазы сигналов, обусловленное эксцентриситетом e, можно записать как

$$\delta_e = 2\pi\frac{e}{d}\cos(\Phi + \varphi_0), \tag{2}$$

где d — период структуры (радиального растра); Φ — текущий угол поворота ротора; φ_0 — угловая координата центра симметрии УИС в полярной системе координат, привязанной к оси ротора. Спектральный состав погрешности будет содержать только первую гармонику.

Если сканирование топологии УИС происходит по эллиптической траектории, то спектральный состав погрешности будет иметь вторую гармонику.

Вообще говоря, сканирование топологии УИС по сложным траекториям можно представить как суперпозицию двух движений: вращения структуры совместно с ротором шпиндельного узла и относительного смещения считывающей головки в радиальном направлении. Последнее обусловлено смещением самой считывающей головки относительно оси ротора, и, наоборот, смещением в пространстве оси ротора шпиндельного узла установки относительно считывающей головки. Так как положение считывающей головки ИУ контролируется специальной системой радиальных перемещений, наличие сложных траекторий сканирования целесообразно связать с наличием неконтролируемых смещений оси ротора, обусловленных, например, биением подшипников шпинделя. В случае применения узла вращения на основе аэростатических подшипников неконтролируемые движения оси ротора чаще всего вызваны несовпадением центра вращающейся системы масс M, состоящей из самого ротора, соединённого с ним предметного столика (планшайбы), ДУП, двигателя вращения и объекта контроля, закреплённого на планшайбе, с осью вращения, иными словами дисбалансом вращающейся системы масс M из-за экспентриситета центра масс. При вращении с угловой скоростью ω ротора, центр масс которого смещён относительно оси вращения на e, центробежная сила инерции ротора (вместе с присоединёнными узлами) может быть представлена выражением [4]

$$F = Mr'\omega^2 = M(e + z)\omega^2, \tag{3}$$

где $r' = e + z$ — радиус инерции (z — смещение оси вращения ротора под действием дисбаланса и противодействия упругих опор).

В этом случае реакция опор

$$R = kz = F. \tag{4}$$

Для анализа движения оси ротора необходимо принимать во внимание также экваториальный момент инерции ротора $I = I_x = I_y$, полярный момент инерции J, торцевую k_m и угловую k_y жёсткости опор.

Система дифференциальных уравнений движения оси ротора при действии силы F в [5] представлена следующими выражениями:

$$\begin{aligned}
&M\ddot{s} + 2k_s s = 0;\\
&M\ddot{x} + 2k_x x = F\cos\omega t;\\
&M\ddot{y} + 2k_y y = F\sin\omega t;\\
&I\ddot{\beta} - J\omega\dot{\alpha} + 2k_x l^2\beta = Fs\cos\omega t;\\
&I\ddot{\alpha} + J\omega\dot{\beta} + 2k_y l^2\alpha = Fs\sin\omega t,
\end{aligned} \tag{5}$$

где s — смещение в торцевом направлении; l — расстояние от центра масс до опор; α и β — углы наклона оси вращения по координатам x и y; производные от $J\omega\alpha$ и $J\omega\beta$ — так называемые гироскопические члены.

Частные решения системы уравнений (5) имеют вид

$$
\begin{aligned}
x &= \frac{Mr\omega^2}{2k_x - M\omega^2}\cos(\omega t - \varphi);\\
y &= \frac{Mr\omega^2}{2k_y - M\omega^2}\sin(\omega t - \varphi);\\
\alpha &= \frac{Mr\omega^2 s[2k_x I^2 - \omega^2(I+J)]}{(2k_x l^2 - I\omega^2)(2k_y l^2 - I\omega^2) - J^2\omega^4}\sin(\omega t - \varphi);\\
\beta &= \frac{Mr\omega^2 s[2k_y I^2 - \omega^2(I+J)]}{(2k_x l^2 - I\omega^2)(2k_y - I\omega^2) - J^2\omega^4}\cos(\omega t - \varphi).
\end{aligned}
\tag{6}
$$

Колебания произвольной точки с координатой s_i относительно центра масс можно получить, подставляя значения x, y, α, β из (6) в формулы $x_i = x + \beta s$, $y_i = y + \alpha s$.

В итоге в [5] были найдены выражения, связывающие колебания оси ротора с его параметрами и точкой приложения неуравновешенной массы:

$$
\begin{aligned}
x_i &= Mr\omega^2\left\{\frac{1}{2k_x - M\omega^2} + \frac{s^2[2k_x l^2 - \omega^2(I+J)]}{(2k_y l^2 - I\omega^2)(2k_x - I\omega^2) - J^2\omega^4}\right\}\cos(\omega t - \varphi);\\
y_i &= Mr\omega^2\left\{\frac{1}{2k_y - M\omega^2} + \frac{s^2[2k_y l^2 - \omega^2(I+J)]}{(2k_y l^2 - I\omega^2)(2k_x - I\omega^2) - J^2\omega^4}\right\}\sin(\omega t - \varphi).
\end{aligned}
\tag{7}
$$

Следовательно, уравнения движения оси ротора при наличии дисбаланса принимают вид

$$
\begin{aligned}
x &= \frac{Mr\omega^2}{2k_x - M\omega^2}\cos(\omega t - \varphi);\\
y &= \frac{Mr\omega^2}{2k_y - M\omega^2}\sin(\omega t - \varphi);\\
\alpha &= \frac{Mr\omega^2 s}{(2k_x l^2 - \omega^2)(I - J)}\cos(\omega t - \varphi);\\
\beta &= \frac{Mr\omega^2 s}{(2k_y l^2 - \omega^2)(I - J)}\sin(\omega t - \varphi).
\end{aligned}
\tag{8}
$$

Сложная траектория сканирования топологии УИС на поверхности носителя вызвана совокупным (поступательным и вращательным) движением центра масс ротора.

Учёт гироскопических составляющих в уравнениях движения оси ротора позволяет выделить принципиальные изменения в траекториях движения его оси. Так, сложное дви-

жение под действием центробежной силы и реакции опор называют прецессией ротора, а дополнительное (под действием гироскопических составляющих) — нутацией. Направление действия этой составляющей определяется произведением векторов момента инерции и угловой скорости в данный момент времени.

Суммарное действие прецессии и нутации приводит к сложным, в том числе петлеобразным, траекториям движения верхнего конца (апекса) оси ротора [6].

Проанализировать вклад в погрешность контроля УИС, вносимый текущими отклонениями реальных траекторий сканирования от идеальной, достаточно сложно, поэтому в [7] предложено оценивать текущий вклад в погрешность контроля интегрально, используя дифференциальный метод.

Дифференциальный метод контроля метрологических характеристик углоизмерительных структур. На рис. 2 представлена функциональная схема шпиндельного узла [7], реализующая дифференциальный метод выделения вклада, вносимого измерительной установкой, в погрешность контроля УИС. Результат достигается за счёт одновременного определения погрешностей двух объектов: контролируемой УИС и вспомогательного растра, на базе которого создан рабочий ДУП измерительной установки. Затем выявляются отличия текущих результатов контроля погрешности рабочего датчика от его паспортизированных значений и корректируются результаты аттестации контролируемой УИС на основе выявленных различий.

Мехатронный модуль работает следующим образом. Ротор шпинделя *5* с помощью двигателя вращения *6* раскручивается до определённой скорости, которая затем поддерживается неизменной благодаря специальной системе управления (на рисунке не показана). С помощью головки считывания *1* выделяют сигналы прохождения границ топологии УИС, одновременно считывающая головка *3* регистрирует сигналы рабочего ДУП. Оба потока информации сравнивают с сигналами с выхода референтного ДУП. Набор данных контроля осуществляется в течение одного (или нескольких по выбору оператора) оборота ротора шпинделя.

Величина отклонений в моментах формирования сигналов от контролируемой УИС и рабочего ДУП относительно моментов появления сигналов от референтного ДУП является мерой точности изготовления контролируемой структуры и рабочего ДУП.

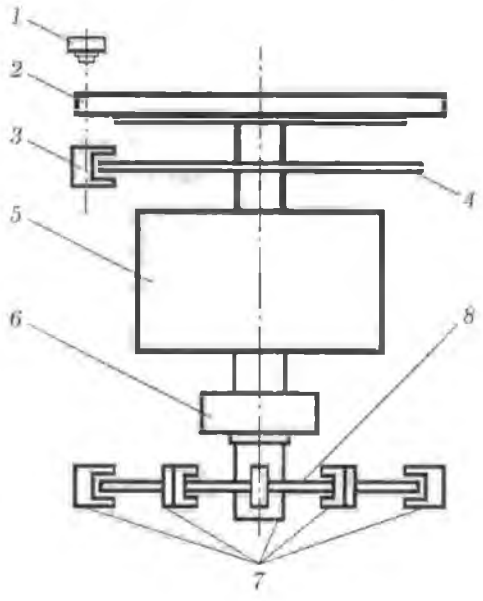

Рис. 2

Для повышения точности формирования опорной сетки сигналов на выходе референтного ДУП используют несколько считывающих головок *7*, которые позволяют за счёт принципа путевого усреднения снизить вклад измерительного растра *8* в итоговую погрешность измерений. Так, например, наличие в конструкции референтного ДУП двух пар считывающих головок, расположенных через 90°, подавляет вклад всех нечётных, а также части чётных гармоник.

При считывании данных с контролируемой УИС *2* полученный результат содержит суперпозицию нескольких составляющих погрешности измерений, обусловленных неточностью изготовления УИС, неточностью задания референтных угловых меток и отклонением реальной траектории сканирования УИС от идеальной. Последняя причина может быть вызвана остаточным дисбалансом вращающихся частей шпиндельного узла и установочным эксцентриситетом УИС относительно оси вращения ротора шпинделя *5*.

При считывании данных с рабочего ДУП результат измерений будет содержать аналогичную суперпозицию составляющих погрешности измерений вследствие неточности изготовления растра *4* рабочего ДУП, неточности задания референтных угловых меток и отклонения траектории сканирования растра *4* рабочего ДУП относительно идеальной из-за дисбаланса вращающихся частей шпиндельного узла и неточности установки (эксцентриситета) растра рабочего ДУП относительно оси вращения ротора шпинделя *5*.

Составляющие погрешности изготовления и эксцентриситета установки растра *4* рабочего ДУП определяются заранее путём специальной операции калибровки базовых датчиков ИУ. Файл калибровочных данных, характеризующих погрешность рабочего ДУП, хранится в памяти управляющего компьютера и используется для сравнения с текущими результатами измерений.

Сравнение выявляет суммарный искажающий вклад в результат текущего измерения погрешности рабочего ДУП, обусловленный текущими неточностью референтных угловых меток и отклонениями траектории сканирования растра рабочего датчика относительно идеальной.

Поскольку контроль испытуемой УИС и рабочего ДУП выполняется одновременно, а считывающие головки *1* и *3* расположены в одной плоскости с одной стороны относительно оси вращения и достаточно близко друг к другу, с высокой вероятностью можно считать, что причины искажений результатов измерений являются подобными для обоих объектов, так как рабочие поверхности испытуемой УИС и растра *4* находятся на разных расстояниях от центра симметрии аэростатического подшипника. Действие этого фактора называется в метрологии нарушением принципа компарирования Аббе [8].

Зарегистрированное различие в метрологических показателях рабочего ДУП умножается на значение фактора, определяемого как отношение расстояний от рабочих поверхностей испытуемой УИС и растра *4* до центра симметрии, и вычитается из результатов аттестации контролируемой УИС как внесённое несовершенством измерительного средства. Тогда файл данных, характеризующий погрешность контролируемой структуры, будет содержать только две компоненты: одну — из-за неточности изготовления растра рабочего датчика, а другую — из-за неточной установки растра *2* относительно оси вращения ротора шпинделя *5* вследствие отклонений траектории сканирования растра *2* головкой *1*. Поскольку вторая составляющая не имеет отношения к качеству изготовления структуры, её обычно удаляют программно, после определения первой гармоники кривой погрешности структуры в результате спектрального анализа файла данных, полученного после вычитания зарегистрированных отклонений.

Практическая реализация метода. В 2012–2014 гг. специалистами Института автоматики и электрометрии Сибирского отделения РАН на основе предложенного дифференциального метода контроля был создан комплекс АЭ.1686, предназначенный для изме-

Рис. 3

рения и определения угловых параметров рабочих образцов и фотошаблонов оптических УИС в автоматическом режиме (рис. 3).

Основные технические характеристики углоизмерительной машины:

1) погрешность измерения углового положения границ элементов топологии ±0,5 угл. с;

2) погрешность измерения угловой привязки положений элементов топологии, находящихся на разных радиусах, ±0,5 угл. с;

3) погрешность определения углового отклонения положения границ элементов топологии и положения осей от номинальных значений, указанных в конструкторской документации, ±0,5 угл. с;

4) погрешность определения ширины элементов топологии УИС ±0,1 мкм;

5) время измерения параметров для УИС, расположенных на одном радиусе, ≤5 мин.

Заключение. Предложенный дифференциальный метод для прецизионного контроля УИС позволяет подавить искажающий вклад от несовершенства измерительной установки, снизить требования к референтному датчику углового положения за счёт того, что с высокой степенью достоверности известны метрологические параметры вспомогательного рабочего датчика.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Portman V., Peschansky B.** Phase-statistical method and device for high precise and high-efficiency angular measurements // Precis. Eng. 2001. **25**, Is. 4. P. 309–315.

2. **Павлов П. А.** Особенности метода кросскалибровки в лазерной гониометрии // Измерительная техника. 2015. № 9. С. 21–24.

3. **Кирьянов В. П., Кирьянов А. В., Кручинин Д. Ю., Яковлев О. Б.** Анализ современных технологий синтеза углоизмерительных структур для высокоточных угловых измерений (Аналитический обзор) // Оптический журнал. 2007. № 12. С. 40–49.

4. **Кирьянов А. В., Кирьянов В. П.** Улучшение метрологических характеристик лазерных генераторов изображений с круговым сканированием // Автометрия. 2010. **46**, № 5. С. 77–93.

5. **Гусаров А. А.** Балансировка роторов машин. М.: Наука. 2004. Кн. 1. 267 с.

6. **Жилин П. А., Сорокин С. А.** Динамика гиростата на упругом основании // Дифференциальные уравнения и процессы управления [Электронный журнал]. 1997. № 1. URL: http://www.math.spbu.ru/diffjournal/pdf/j007.pdf (дата обращения: 17.03.2016).

7. **Пат. 83133 РФ.** Шпиндельный узел /В. П. Кирьянов, А. В. Кирьянов. Опубл. 20.05.2009, Бюл. № 14.

8. **Егер Г.** Трёхмерная координатно-измерительная машина с разрешением 0,1 нм // Автометрия. 2010. **46**, № 4. С. 26–32.

Поступила в редакцию 17 марта 2016 г.