



**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ**

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ(21), (22) Заявка: **2010110638/22, 19.03.2010**(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
19.03.2010(45) Опубликовано: **27.05.2010**Адрес для переписки:
**630097, г.Новосибирск-97, а/я 21, В.В.
Скорму**

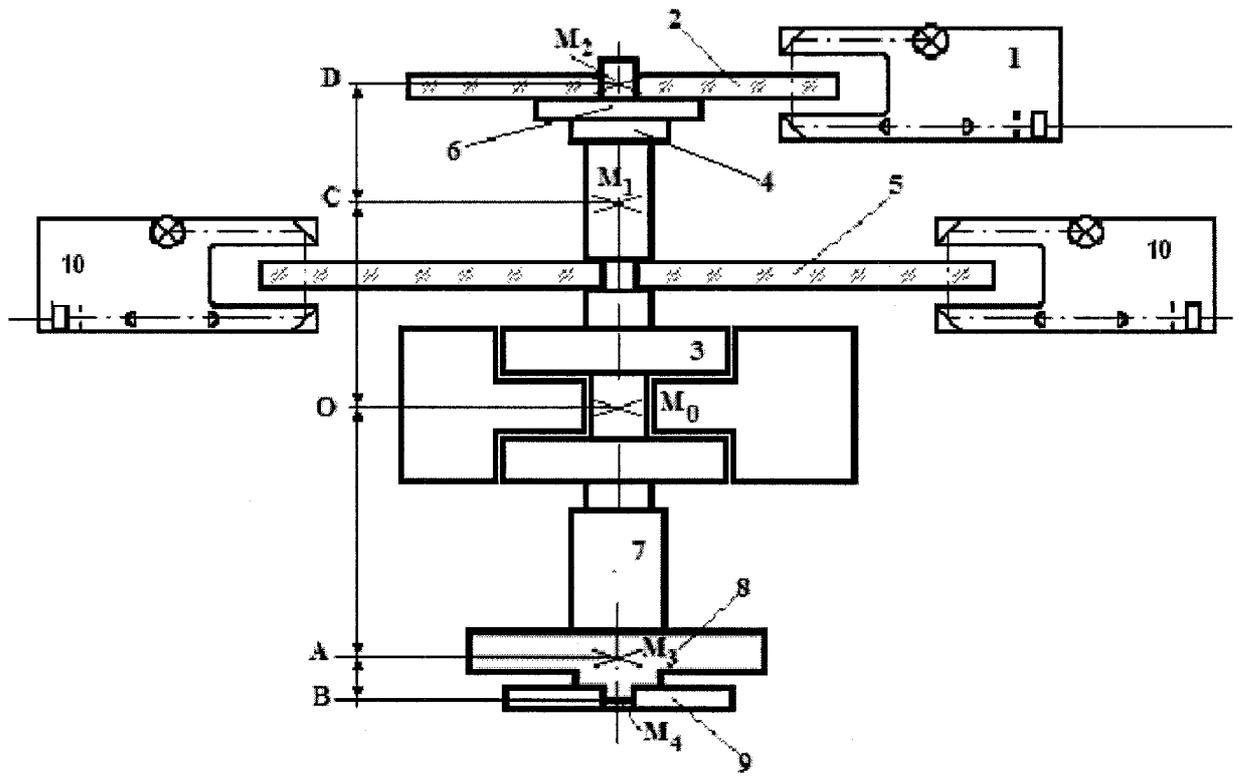
(72) Автор(ы):

Кириянов Алексей Валерьевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

**Конструкторско-технологический институт
научного приборостроения СО РАН (КТИ
НИ СО РАН) (RU)****(54) УГЛОИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА****Формула полезной модели**

Устройство для контроля точности изготовления углоизмерительных структур, содержащее головку считывания данных с контролируемых структур, шпиндель с вертикальной осью вращения, эталонный датчик угла поворота и стеклянный диск с нанесенной на его поверхности контролируемой структурой, отличающееся тем, что на верхнем торце шпинделя размещены фланец и оправка для установки стеклянного диска, а на нижнем - двигатель вращения и дополнительный противовес, полярный момент инерции которого вместе с двигателем вращения, рассчитываемый относительно центра симметрии ротора шпинделя, равен полярному моменту инерции фланца с присоединенным к нему эталонным датчиком угла поворота и оправкой, при этом на нижней поверхности противовеса предусмотрено место для соосной установки имитатора контролируемой структуры, полярный момент инерции которого равен полярному моменту инерции контролируемой структуры.



Полезная модель относится к Критическим технологиям РФ «Технологии механотроники и создание микросистемной техники» и может быть использована в метрологии, измерительной технике, в точном машиностроении, приборостроении и других областях промышленности для контроля точности изготовления шкал, лимбов, растров и других объектов контроля, называемых далее углоизмерительными структурами (УИС).

В настоящее время в различных отраслях промышленности, в частности, в точном машиностроении или приборостроении начинают использоваться различные шкалы, лимбы, растры и другие объекты с УИС, точность изготовления которых лежит в диапазоне 1,0-0,5 угловой секунды. Для контроля подобных объектов необходимы соответствующие метрологические средства контроля с точностью, по крайней мере, в три раза более высокой, чем ожидаемая точность указанных выше объектов.

Для контроля точности угловых преобразователей наибольшее распространение получил динамический метод контроля, реализуемый с помощью устройства, содержащего соосно расположенные и жесткосоединенные между собой прецизионный шпиндель, двигатель вращения и угловой датчик. Например, известна углоизмерительная установка (см. Т. Masuda, М. Kajitani. An automatic calibration system for angular encoders. Precision Engineering, v. 11, No 2, 1989, p.95), содержащая соосно расположенные и жесткосоединенные между собой прецизионный шпиндель, двигатель вращения и угловой датчик, с p позиционно-считывающими головками, где p не менее 2. Угловая точность такой установки достаточно высока за счет использования принципа многоголовочного считывания данных с опорного растра, т.к. в установке установлено пять пар диаметрально расположенных головок считывания. При этом первая пара головок расположена на позициях 0° - 180° , вторая - на позициях 90° - 270° , третья - на позициях 45° - 225° , четвертая - на позициях $22,5^{\circ}$ - $202,5^{\circ}$ и, наконец, пятая пара - на позициях $11,25^{\circ}$ - $191,25^{\circ}$. В результате первая пара головок позволяет сформировать сетку угловых меток, в кривой погрешности относительного расположения меток убраны 1, 3, 5 и т.д. все нечетные гармоники, обусловленные действием погрешностей изготовления опорного растра и погрешностями, вносимые подшипниками шпинделя. Совместное использование первой и второй пары головок позволяет дополнительно подавить в кривой погрешности действие 2, 6, 10 и т.д. гармоник, номера которых образованы умножением 2 на все нечетные числа. Совместное использование первой, второй и третьей пар головок позволяет дополнительно подавить в кривой погрешности действие 4, 12, 20 и т.д. гармоник, номера которых образованы умножением 4 на все нечетные числа. По аналогии с предыдущим совместное использование первой, второй, третьей и четвертой пар головок позволяет подавить в кривой погрешности действие еще 8, 24, 40 и т.д. гармоник, номера которых образованы умножением 8 на все нечетные числа. И, наконец, совместное использование первой, второй, третьей, четвертой и пятой пар головок позволяет подавить в кривой погрешности действие также 16, 48, 80 и т.д. гармоник, номера которых образованы умножением 16 на все нечетные числа. В результате совместного использования пяти пар головок удается подавить действие всех $(2^n - 1)$ первых гармоник (где n - число пар считывающих головок) и большого числа последующих и создать сетку угловых меток, расположенных регулярно в пределах полного оборота с погрешностью положения меток не хуже 0,01 угловой секунды.

Столь глубокое подавление вклада погрешности изготовления опорного растра и погрешности подшипников шпинделя особенно эффективно при контроле

погрешности угловых датчиков в сборе, т.к. в этом случае от углоизмерительной установки требуется только точное задание угла поворота.

При контроле собранных датчиков, имеющих собственную подшипниковую систему, которая вместе с используемым растром определяет итоговую погрешность преобразователя, любое расхождение между показаниями контролируемого преобразователя и заданной угловой позицией трактуется как погрешность преобразователя.

Известно, что контроль точности изготовления УИС имеет ряд существенных отличий от аналогичного контроля готовых угловых преобразователей, которые учитываются в заявляемом устройстве.

Наиболее близким к заявляемому устройству является выбранное в качестве прототипа устройство для контроля погрешности лимбов. (См., Г.В.Егоров, С.М.Латыев, С.С.Митрофанов и В.П.Петров, Авторское свидетельство СССР №1384951, кл. G01C 1/02), содержащее головку считывания данных с контролируемых структур, шпиндель с вертикальной осью вращения, эталонный датчик угла поворота и стеклянный диск с нанесенной на его поверхности контролируемой структурой.

В отличие от установок для контроля готовых угловых датчиков здесь не каждое расхождение между показаниями контролируемого преобразователя и заданной угловой позицией может трактоваться как погрешность изготовления УИС. Например, неточная установка контролируемой УИС относительно оси вращения приводит к появлению погрешности эксцентриситета, которая никак не связана с погрешностью изготовления УИС. Или в связи с тем, что ось ротора шпинделя всегда имеет возможность совершать небольшие качания в вертикальной плоскости, то возникающую погрешность компарирования (погрешность Аббе), также нельзя приписывать УИС. Эту составляющую погрешности целенаправленно уменьшают за счет того, что собственный (референтный) угловой датчик углоизмерительной установки размещают в непосредственной близости от контролируемого объекта (углоизмерительной структуры). Данный прием эффективен только в тех случаях, когда возмущения, вносимые пространственными девиациями оси ротора, проявляют себя идентично как для собственного углового датчика установки, так и для контролируемого преобразователя.

Однако в тех случаях, когда в референтном угловом датчике установки используются n считывающих головок, а для контроля УИС используется одна считывающая головка, данное условие не реализуется. Как было рассмотрено выше, повышение точности углового датчика установки за счет введения, например, пяти пар считывающих головок приводит к появлению эффекта нечувствительности датчика к биениям оси, на которой смонтирован растр референтного углового датчика. В то время как данные, считываемые с контролируемой УИС с помощью дополнительной считывающей головки, искажаются движениями в пространстве оси ротора в полной мере. Например, для УИС диаметром 100 мм качание оси ротора вместе с установленной на нем УИС всего на $\pm 0,1$ мкм приводит к появлению погрешности контроля, равной $\pm 0,4$ угловой секунды, которая в сорок раз превышает достигнутую (например, за счет использования 5 пар считывающих головок) точность задания угла поворота ротора установки. Этот отрицательный эффект от малых спонтанных уходов в пространстве оси вращения будет иметь место даже при условии использования шпинделей самого высокого класса (рассмотренный выше пример, когда биения оси ротора составляют $\pm 0,1$ мкм,

относится к шпинделям высокого класса. Шпиндели новейших разработок характеризуются биениями оси, не превышающими $\pm 0,05$ мкм).

5 Размещение собственного углового датчика углоизмерительной установки в непосредственной близости от контролируемого объекта приводит к существенному изменению в шпиндельном узле положения центра масс вращения (т.е. ротора вместе с присоединенными к нему: промежуточным фланцем, стеклянным диском собственного раstra, предметным столиком и стеклянным диском контролируемой УИС). И так как трудно гарантировать точное совмещение центра масс вращения с осью вращения ротора, то возникающий в результате этого дисбаланс при вращении ротора приводит к появлению динамической неуравновешенности ротора. В свою очередь, динамическая неуравновешенность ротора приводит, как показали исследования (см. А.В.Кириянов, «Снижение погрешности формирования прецизионных углоизмерительных структур». Диссертация и автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, НГТУ, Новосибирск, 2009 г.) к сложным движениям апекса (верхней точки) оси вращения ротора, которые являются следствием возбуждения в этом случае двух типов движений (прецессии и нутации) оси ротора, и резкому ухудшению точности контроля УИС.

20 Целью заявляемого технического решения является устранение погрешностей контроля, связанных с появлением сложных движений в пространстве апекса оси вращающейся системы шпиндельного узла (ротор, промежуточный фланец, стеклянный диск углового датчика, предметный столик (оправка), стеклянный диск контролируемого углового преобразователя) и снижение ее до значений, определяемых только качеством изготовления подшипников шпинделя установки.

25 Указанная цель в заявляемом углоизмерительном устройстве, содержащем головку считывания данных с контролируемых структур, шпиндель с вертикальной осью вращения, эталонный датчик угла поворота и стеклянный диск с нанесенной на его поверхности контролируемой структурой, достигается тем, что на верхнем торце шпинделя размещают фланец и оправку для установки стеклянного диска, а на нижнем - двигатель вращения и дополнительный противовес, полярный момент инерции которого вместе с двигателем вращения, рассчитываемый относительно центра симметрии ротора шпинделя, равен полярному моменту инерции фланца с присоединенными к нему эталонным датчиком угла поворота и оправкой, при этом на нижней поверхности противовеса предусматривают место для соосной установки имитатора контролируемой структуры, полярный момент инерции которого равен полярному моменту инерции контролируемой структуры.

30 На фиг.1 представлено заявляемое устройство для контроля точности изготовления УИС (растров, шкал, лимбов, кодовых дисков и т.д.), содержащее головку считывания 1 данных с контролируемых структур 2 и узел вращения, включающий в себя шпиндель с вертикальной осью вращения, на верхнем торце ротора 3 которого размещены фланец 4 со стеклянным диском 5 эталонного датчика угла поворота и оправка 6 для установки контролируемой структуры 2, а на нижнем торце - двигатель вращения 7, в котором с целью устранения погрешностей контроля, связанных с появлением сложных движений в пространстве апекса оси вращающейся системы шпиндельного узла (включающей в себя ротор шпинделя 3, промежуточный фланец 4, стеклянный диск углового датчика 5, предметный столик (оправка) 6 и стеклянный диск контролируемой УИС 2), нижнему торцу шпинделя присоединен дополнительно противовес 8, полярный момент инерции которого

вместе с присоединенным к нему двигателем вращения 7, рассчитываемый относительно центра симметрии M_0 ротора шпинделя, равен полярному моменту инерции фланца 4 с присоединенным к нему эталонным датчиком 5 угла поворота и оправкой 6, при этом на нижней поверхности противовеса 8 предусмотрено место для соосной установки имитатора 9 контролируемой структуры, полярный момент инерции которого равен полярному моменту инерции контролируемой структуры 2. При этом в состав эталонного датчика угла поворота входят считывающих головок 10.

Предлагаемые изменения конструкции устройства для контроля точности изготовления УИС проявляют свои положительные свойства следующим образом. Пусть в исходном состоянии ротор шпинделя сбалансирован идеально, т.ч. его собственный центр масс M_0 совпадает с центром симметрии аэростатического подшипника O и оставшиеся биения оси ротора обусловлены только качеством изготовления деталей шпинделя.

Поставленная задача устранения погрешности контроля, связанной с появлением сложных движений в пространстве апекса оси вращающейся системы шпиндельного узла, предлагается решить путем выравнивания полярных моментов инерции узлов и деталей, присоединенных к верхнему и нижнему торцам ротора шпинделя, соответственно:

$$\sum_{i=1}^n M_i \cdot r_i^2 = \sum_{k=1}^m M_k \cdot r_k^2, \quad (1)$$

где M_i - масса i -й материальной точки, принадлежащей узлам и деталям, присоединенным к верхнему торцу ротора, r_i - расстояние от i -й материальной точки до центра симметрии аэростатического подшипника, M_k - масса k -й материальной точки, принадлежащей узлам и деталям, присоединенным к нижнему торцу ротора, r_k - расстояние от k -й материальной точки до центра симметрии аэростатического подшипника.

Используя теорему Гюйгенса-Шнейдера, можно перейти от ансамбля материальных точек к реальным узлам и деталям, присоединенным к верхнему и нижнему торцам ротора шпинделя, соответственно. Тогда выражение (1) преобразуется к виду:

$$\sum_{i=1}^n (I_{0i} + M_i \cdot r_i^2) = \sum_{k=1}^m (I_{0k} + M_k \cdot r_k^2), \quad (2)$$

здесь I_{0i} - полярный момент инерции i -й детали, присоединенной к верхнему торцу ротора, относительно оси, проходящей через центр масс данной детали, M_i - масса i -й детали, r_i - расстояние от центра масс i -й детали до центра симметрии аэростатического подшипника; I_{0k} - полярный момент инерции k -й детали, присоединенной к нижнему торцу ротора, относительно оси, проходящей через центр масс данной детали, M_k - масса k -й детали, r_k - расстояние от центра масс k -й детали до центра симметрии аэростатического подшипника. Используя выражение (2), нетрудно определить параметры противовеса 8, с помощью которого устраняется дестабилизирующее действие всех постоянно размещенных сверху узлов. Имитатор 9 используется для устранения дестабилизирующего действия контролируемого объекта 2 и подбирается каждый раз конкретно под его текущие параметры.

Полярный момент инерции стеклянного диска толщиной - d , радиуса R и с внутренним отверстием радиуса r , расположенного на расстоянии OD от центра симметрии подшипника, определится как:

$$I_d = I_{0d} + M_2 \cdot OD^2 = \frac{\pi \cdot d \cdot \rho_{cm}}{2} (R^4 - r^4) + \pi \cdot d \cdot \rho_{cm} (R^2 - r^2) \cdot OD^2 \quad (4)$$

где ρ_{cm} - плотность стекла.

Полярный момент имитатора толщиной $d_{им}$, радиусом $R_{им}$, расположенного на расстоянии OB от центра симметрии подшипника, определится как:

$$I_{им} = I_{0им} + M_4 \cdot OB^2 = 0,5 \cdot \pi \cdot d_{им} \cdot \rho_{им} R_{им}^4 + \pi \cdot d_{им} \cdot \rho_{им} R_{им}^2 \cdot OB^2 = \\ = \pi \cdot d_{им} \cdot \rho_{им} R_{им}^2 (0,5 R_{им}^2 + OB^2) \quad (5)$$

Для оценки параметров имитатора 9 можно принять (погрешность оценок не превысит (10-15)%), что M_2 - вся масса стеклянного диска сосредоточена в центре масс с координатой D , а масса имитатора M_4 - в центре масс с координатой B .

Параметры имитатора можно оценить из следующего соотношения:

$$M_2 \cdot OD^2 = M_4 \cdot OB^2 \quad (6)$$

где OD - расстояние от центра симметрии подшипника до центра масс диска, OB - расстояние от центра симметрии подшипника до центра масс имитатора.

В качестве примеров реализации заявляемого устройства рассмотрим следующие ситуации.

Пример 1. Пусть в составе углоизмерительной установки используется аэростатический шпиндель 3 с гарантированными биениями оси, не превышающими $\pm 0,05$ мкм. Расстояние от центра симметрии подшипника до посадочной плоскости оправки 6-250 мм. Расстояние от центра симметрии подшипника до посадочной плоскости противовеса (для имитатора) - 185 мм. В качестве контролируемой структуры 2 использован стеклянный диск толщиной 5 мм, диаметром 100 мм с внутренним отверстием, диаметром 10 мм, и массой $M_2=353,4$ г. Тогда центр масс УИС совпадает с координатой - 252,5 мм. Полярный момент инерции УИС равен - $6,2 \cdot 10^6$ г·мм².

В качестве имитатора 9 контролируемой структуры используется стальной диск, толщиной 5 мм. В данной конструкции центр масс этого диска совпадает с координатой - 187,5 мм, а полярный момент инерции должен быть равен - $6,2 \cdot 10^6$ г·мм². Следовательно, диаметр стального диска имитатора будет равен 75,8 мм.

Пример 2. Пусть в качестве контролируемой структуры 2 использован диск из стекла, толщиной 10 мм, диаметром 200 мм с внутренним отверстием, диаметром 10 мм. В этом случае центр масс УИС совпадает с координатой 255 мм. Масса диска равна 783,5 г, а полярный момент инерции УИС - 50947087 Г·мм².

В качестве имитатора 9 контролируемой структуры используется стальной диск, толщиной 10 мм. Центр масс этого диска совпадает с координатой - 190 мм. Полярный момент инерции его должен быть равен - 50947087 Г·мм². Следовательно, масса диска должна быть равной - 1411 г, а диаметр имитатора должен быть равным - 151,8 мм.

Таким образом, заявляемое устройство позволяет устранить погрешность контроля, связанную с появлением сложных движений в пространстве апекса оси вращающейся системы шпиндельного узла, снизив ее до значений, определяемых только качеством изготовления подшипников шпинделя установки.

(57) Реферат

Полезная модель относится к Критическим технологиям РФ «Технологии механотроники и создание микросистемной техники» и может быть использована в метрологии, измерительной технике, в точном машиностроении, приборостроении и

других областях промышленности для контроля точности изготовления шкал, лимбов, растров и других объектов контроля, называемых далее углоизмерительными структурами (УИС). Заявляется устройство для контроля точности изготовления углоизмерительных структур, содержащее головку считывания данных с контролируемых структур, шпиндель с вертикальной осью вращения, эталонный датчик угла поворота и стеклянный диск с нанесенной на его поверхности контролируемой структурой. Новым является то, что на верхнем торце шпинделя размещены фланец и оправка для установки стеклянного диска, а на нижнем - двигатель вращения и дополнительный противовес, полярный момент инерции которого вместе с двигателем вращения, рассчитываемый относительно центра симметрии ротора шпинделя, равен полярному моменту инерции фланца с присоединенным к нему эталонным датчиком угла поворота и оправкой, при этом на нижней поверхности противовеса предусмотрено место для соосной установки имитатора контролируемой структуры, полярный момент инерции которого равен полярному моменту инерции контролируемой структуры. Полезная модель включает 1 независимый пункт формулы, 1 рисунок.

20

25

30

35

40

45

50

РЕФЕРАТ

Полезная модель относится к Критическим технологиям РФ «Технологии мехатроники и создание микросистемной техники» и может быть использована в метрологии, измерительной технике, в точном машиностроении, приборостроении и других областях промышленности для контроля точности изготовления шкал, лимбов, растров и других объектов контроля, называемых далее углоизмерительными структурами (УИС).

Заявляется устройство для контроля точности изготовления углоизмерительных структур, содержащее головку считывания данных с контролируемых структур, шпиндель с вертикальной осью вращения, эталонный датчик угла поворота и стеклянный диск с нанесённой на его поверхности контролируемой структурой.

Новым является то, что на верхнем торце шпинделя размещены фланец и оправка для установки стеклянного диска, а на нижнем – двигатель вращения и дополнительный противовес, полярный момент инерции которого вместе с двигателем вращения, рассчитываемый относительно центра симметрии ротора шпинделя, равен полярному моменту инерции фланца с присоединённым к нему эталонным датчиком угла поворота и оправкой, при этом на нижней поверхности противовеса предусмотрено место для соосной установки имитатора контролируемой структуры, полярный момент инерции которого равен полярному моменту инерции контролируемой структуры.

Полезная модель включает 1 независимый пункт формулы, 1 рисунок.

2010110638



МКИ: G01C 1/02

Углоизмерительная установка

Полезная модель относится к Критическим технологиям РФ «Технологии мехатроники и создание микросистемной техники» и может быть использована в метрологии, измерительной технике, в точном машиностроении, приборостроении и других областях промышленности для контроля точности изготовления шкал, лимбов, растров и других объектов контроля, называемых далее углоизмерительными структурами (УИС).

В настоящее время в различных отраслях промышленности, в частности, в точном машиностроении или приборостроении начинают использоваться различные шкалы, лимбы, растры и другие объекты с УИС, точность изготовления которых лежит в диапазоне 1,0 – 0,5 угловой секунды. Для контроля подобных объектов необходимы соответствующие метрологические средства контроля с точностью, по крайней мере, в три раза более высокой, чем ожидаемая точность указанных выше объектов.

Для контроля точности угловых преобразователей наибольшее распространение получил динамический метод контроля, реализуемый с помощью устройства, содержащего соосно расположенные и жёстко соединённые между собой прецизионный шпиндель, двигатель вращения и угловой датчик. Например, известна углоизмерительная установка (см. *T. Masuda, M. Kajitani. An automatic calibration system for angular encoders. Precision Engineering, v. 11, No 2, 1989, p. 95*), содержащая соосно расположенные и жёстко соединённые между собой прецизионный шпиндель, двигатель вращения и угловой датчик, с n позиционно-считывающими головками, где n не менее 2. Угловая точность такой установки достаточно высока за счет использования принципа многоголовочного считывания данных с опорного растра, т.к. в установке установлено пять пар диаметрально расположенных головок считывания. При этом первая пара головок расположена на позициях 0° - 180° , вторая - на позициях 90° - 270° , третья - на позициях 45° - 225° , четвертая - на позициях $22,5^{\circ}$ - $202,5^{\circ}$ и, наконец, пятая пара - на позициях $11,25^{\circ}$ - $191,25^{\circ}$. В результате первая пара головок позволяет сформировать сетку угловых меток, в кривой погрешности относительного расположения меток убраны 1, 3, 5 и т.д. все нечетные гармоники, обусловленные действием погрешностей изготовления опорного растра и погрешностями, вносимые подшипниками шпинделя. Совместное использование первой и второй пары головок позволяет дополнительно подавить в кривой погрешности действие 2, 6, 10 и т.д. гармоник, номера которых образованы умножением 2 на все нечетные числа. Совместное использование первой, второй и третьей пар головок позволяет дополнительно подавить в кривой погрешности действие 4, 12, 20 и т.д. гармоник, номера которых образованы умножением 4 на все нечетные числа. По аналогии с предыдущим

совместное использование первой, второй, третьей и четверной пар головок позволяет подавить в кривой погрешности действие еще 8, 24, 40 и т.д. гармоник, номера которых образованы умножением 8 на все нечетные числа. И, наконец, совместное использование первой, второй, третьей, четвертой и пятой пар головок позволяет подавить в кривой погрешности действие также 16, 48, 80 и т.д. гармоник, номера которых образованы умножением 16 на все нечетные числа. В результате совместного использования пяти пар головок удаётся подавить действие всех $(2^n - 1)$ первых гармоник (где n – число пар считывающих головок) и большого числа последующих и создать сетку угловых меток, расположенных регулярно в пределах полного оборота с погрешностью положения меток не хуже 0,01 угловой секунды.

Столь глубокое подавление вклада погрешности изготовления опорного раstra и погрешности подшипников шпинделя особенно эффективно при контроле погрешности угловых датчиков в сборе, т.к. в этом случае от углоизмерительной установки требуется только точное задание угла поворота.

При контроле собранных датчиков, имеющих собственную подшипниковую систему, которая вместе с используемым растром определяет итоговую погрешность преобразователя, любое расхождение между показаниями контролируемого преобразователя и заданной угловой позицией трактуется как погрешность преобразователя.

Известно, что контроль точности изготовления УИС имеет ряд существенных отличий от аналогичного контроля готовых угловых преобразователей, которые учитываются в заявляемом устройстве.

Наиболее близким к заявляемому устройству является выбранное в качестве прототипа устройство для контроля погрешности лимбов. (См., Г.В. Егоров, С.М. Латыев, С.С. Митрофанов и В.П. Петров, Авторское свидетельство СССР № 1384951, кл. G01 C1/02), содержащее головку считывания данных с контролируемых структур, шпиндель с вертикальной осью вращения, эталонный датчик угла поворота и стеклянный диск с нанесённой на его поверхности контролируемой структурой.

В отличие от установок для контроля готовых угловых датчиков здесь не каждое расхождение между показаниями контролируемого преобразователя и заданной угловой позицией может трактоваться как погрешность изготовления УИС. Например, неточная установка контролируемой УИС относительно оси вращения приводит к появлению погрешности эксцентриситета, которая никак не связана с погрешностью изготовления УИС. Или в связи с тем, что ось ротора шпинделя всегда имеет возможность совершать небольшие качания в вертикальной плоскости, то возникающую погрешность компарирования (погрешность Аббе), также нельзя приписывать УИС. Эту составляющую по-

грешности целенаправленно уменьшают за счёт того, что собственный (референтный) угловой датчик углоизмерительной установки размещают в непосредственной близости от контролируемого объекта (углоизмерительной структуры). Данный приём эффективен только в тех случаях, когда возмущения, вносимые пространственными девиациями оси ротора, проявляют себя идентично как для собственного углового датчика установки, так и для контролируемого преобразователя.

Однако в тех случаях, когда в референтном угловом датчике установки используются *n* считывающих головок, а для контроля УИС используется одна считывающая головка, данное условие не реализуется. Как было рассмотрено выше, повышение точности углового датчика установки за счёт введения, например, пяти пар считывающих головок приводит к появлению эффекта нечувствительности датчика к биениям оси, на которой смонтирован растр референтного углового датчика. В то время как данные, считываемые с контролируемой УИС с помощью дополнительной считывающей головки, искажаются движениями в пространстве оси ротора в полной мере. Например, для УИС диаметром 100 мм качание оси ротора вместе с установленной на нём УИС всего на $\pm 0,1$ мкм приводит к появлению погрешности контроля, равной $\pm 0,4$ угловой секунды, которая в сорок раз превышает достигнутую (например, за счёт использования 5 пар считывающих головок) точность задания угла поворота ротора установки. Этот отрицательный эффект от малых спонтанных уходов в пространстве оси вращения будет иметь место даже при условии использования шпинделей самого высокого класса (рассмотренный выше пример, когда биения оси ротора составляют $\pm 0,1$ мкм, относится к шпинделям высокого класса. Шпиндели новейших разработок характеризуются биениями оси, не превышающими $\pm 0,05$ мкм).

Размещение собственного углового датчика углоизмерительной установки в непосредственной близости от контролируемого объекта приводит к существенному изменению в шпиндельном узле положения центра масс вращения (т.е. ротора вместе с присоединёнными к нему: промежуточным фланцем, стеклянным диском собственного растра, предметным столиком и стеклянным диском контролируемой УИС). И так как трудно гарантировать точное совмещение центра масс вращения с осью вращения ротора, то возникающий в результате этого дисбаланс при вращении ротора приводит к появлению динамической неуравновешенности ротора. В свою очередь, динамическая неуравновешенность ротора приводит, как показали исследования (см. *А.В.Кирьянов, «Снижение погрешности формирования прецизионных углоизмерительных структур». Диссертация и автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук, НГТУ, Новосибирск, 2009 г.*) к сложным движениям апекса (верхней точки) оси враще-

ния ротора, которые являются следствием возбуждения в этом случае двух типов движений (прецессии и нутации) оси ротора, и резкому ухудшению точности контроля УИС.

Целью заявляемого технического решения является устранение погрешностей контроля, связанных с появлением сложных движений в пространстве апекса оси вращающейся системы шпиндельного узла (ротор, промежуточный фланец, стеклянный диск углового датчика, предметный столик (оправка), стеклянный диск контролируемого углового преобразователя) и снижение её до значений, определяемых только качеством изготовления подшипников шпинделя установки.

Указанная цель в заявляемом углоизмерительном устройстве, содержащем головку считывания данных с контролируемых структур, шпиндель с вертикальной осью вращения, эталонный датчик угла поворота и стеклянный диск с нанесённой на его поверхности контролируемой структурой, достигается тем, что на верхнем торце шпинделя размещают фланец и оправку для установки стеклянного диска, а на нижнем – двигатель вращения и дополнительный противовес, полярный момент инерции которого вместе с двигателем вращения, рассчитываемый относительно центра симметрии ротора шпинделя, равен полярному моменту инерции фланца с присоединёнными к нему эталонным датчиком угла поворота и оправкой, при этом на нижней поверхности противовеса предусматривают место для соосной установки имитатора контролируемой структуры, полярный момент инерции которого равен полярному моменту инерции контролируемой структуры.

На фиг. 1 представлено заявляемое устройство для контроля точности изготовления УИС (растров, шкал, лимбов, кодовых дисков и т.д.), содержащее головку считывания 1 данных с контролируемых структур 2 и узел вращения, включающий в себя шпиндель с вертикальной осью вращения, на верхнем торце ротора 3 которого размещены фланец 4 со стеклянным диском 5 эталонного датчика угла поворота и оправка 6 для установки контролируемой структуры 2, а на нижнем торце – двигатель вращения 7, в котором с целью устранения погрешностей контроля, связанных с появлением сложных движений в пространстве апекса оси вращающейся системы шпиндельного узла (включающей в себя ротор шпинделя 3, промежуточный фланец 4, стеклянный диск углового датчика 5, предметный столик (оправка) 6 и стеклянный диск контролируемой УИС 2), нижнему торцу шпинделя присоединён дополнительно противовес 8, полярный момент инерции которого вместе с присоединённым к нему двигателем вращения 7, рассчитываемый относительно центра симметрии M_0 ротора шпинделя, равен полярному моменту

инерции фланца 4 с присоединённым к нему эталонным датчиком 5 угла поворота и оправкой 6, при этом на нижней поверхности противовеса 8 предусмотрено место для соосной установки имитатора 9 контролируемой структуры, полярный момент инерции которого равен полярному моменту инерции контролируемой структуры 2. При этом в состав эталонного датчика угла поворота входят n считывающих головок 10.

Предлагаемые изменения конструкции устройства для контроля точности изготовления УИС проявляют свои положительные свойства следующим образом. Пусть в исходном состоянии ротор шпинделя сбалансирован идеально, т.ч. его собственный центр масс M_0 совпадает с центром симметрии аэростатического подшипника O и оставшиеся биения оси ротора обусловлены только качеством изготовления деталей шпинделя.

Поставленная задача устранения погрешности контроля, связанной с появлением сложных движений в пространстве апекса оси вращающейся системы шпиндельного узла, предлагается решить путём выравнивания полярных моментов инерции узлов и деталей, присоединённых к верхнему и нижнему торцам ротора шпинделя, соответственно:

$$\sum_{i=1}^n M_i \cdot r_i^2 = \sum_{k=1}^m M_k \cdot r_k^2, \quad (1)$$

где M_i – масса i – й материальной точки, принадлежащей узлам и деталям, присоединённым к верхнему торцу ротора, r_i – расстояние от i – й материальной точки до центра симметрии аэростатического подшипника, M_k – масса k – й материальной точки, принадлежащей узлам и деталям, присоединённым к нижнему торцу ротора, r_k – расстояние от k – й материальной точки до центра симметрии аэростатического подшипника.

Используя теорему Гюйгенса-Шнейдера, можно перейти от ансамбля материальных точек к реальным узлам и деталям, присоединённым к верхнему и нижнему торцам ротора шпинделя, соответственно. Тогда выражение (1) преобразуется к виду:

$$\sum_{i=1}^n (I_{0i} + M_i \cdot r_i^2) = \sum_{k=1}^m (I_{0k} + M_k \cdot r_k^2), \quad (2)$$

здесь I_{0i} – полярный момент инерции i – й детали, присоединённой к верхнему торцу ротора, относительно оси, проходящей через центр масс данной детали, M_i – масса i – й детали, r_i – расстояние от центра масс i – й детали до центра симметрии аэростатического подшипника; I_{0k} – полярный момент инерции k – й детали, присоединённой к нижнему торцу ротора, относительно оси, проходящей через центр масс данной детали, M_k – масса k – й детали, r_k – расстояние от центра масс k – й детали до центра симметрии аэростатического подшипника. Используя выражение (2), нетрудно определить параметры противовеса 8, с помощью которого устраняется дестабилизирующее действие всех посто-

янно размещённых сверху узлов. Имитатор 9 используется для устранения дестабилизирующего действия контролируемого объекта 2 и подбирается каждый раз конкретно под его текущие параметры.

Полярный момент инерции стеклянного диска толщиной – d , радиуса R и с внутренним отверстием радиуса r , расположенного на расстоянии OD от центра симметрии подшипника, определится как:

$$I_d = I_{0d} + M_2 \cdot OD^2 = \frac{\pi \cdot d \cdot \rho_{cm}}{2} (R^4 - r^4) + \pi \cdot d \cdot \rho_{cm} (R^2 - r^2) \cdot OD^2 \quad (4)$$

где ρ_{cm} – плотность стекла.

Полярный момент имитатора толщиной $d_{им}$, радиусом $R_{им}$, расположенного на расстоянии OB от центра симметрии подшипника, определится как:

$$\begin{aligned} I_{им} = I_{0им} + M_4 \cdot OB^2 &= 0,5 \cdot \pi \cdot d_{им} \cdot \rho_{им} R_{им}^4 + \pi \cdot d_{им} \cdot \rho_{им} R_{им}^2 \cdot OB^2 = \\ &= \pi \cdot d_{им} \cdot \rho_{им} R_{им}^2 (0,5 R_{им}^2 + OB^2) \end{aligned} \quad (5)$$

Для оценки параметров имитатора 9 можно принять (погрешность оценок не превысит (10-15)%), что M_2 – вся масса стеклянного диска сосредоточена в центре масс с координатой D , а масса имитатора M_4 – в центре масс с координатой B . Параметры имитатора можно оценить из следующего соотношения:

$$M_2 \cdot OD^2 = M_4 \cdot OB^2 \quad (6)$$

где OD – расстояние от центра симметрии подшипника до центра масс диска, OB – расстояние от центра симметрии подшипника до центра масс имитатора.

В качестве примеров реализации заявляемого устройства рассмотрим следующие ситуации.

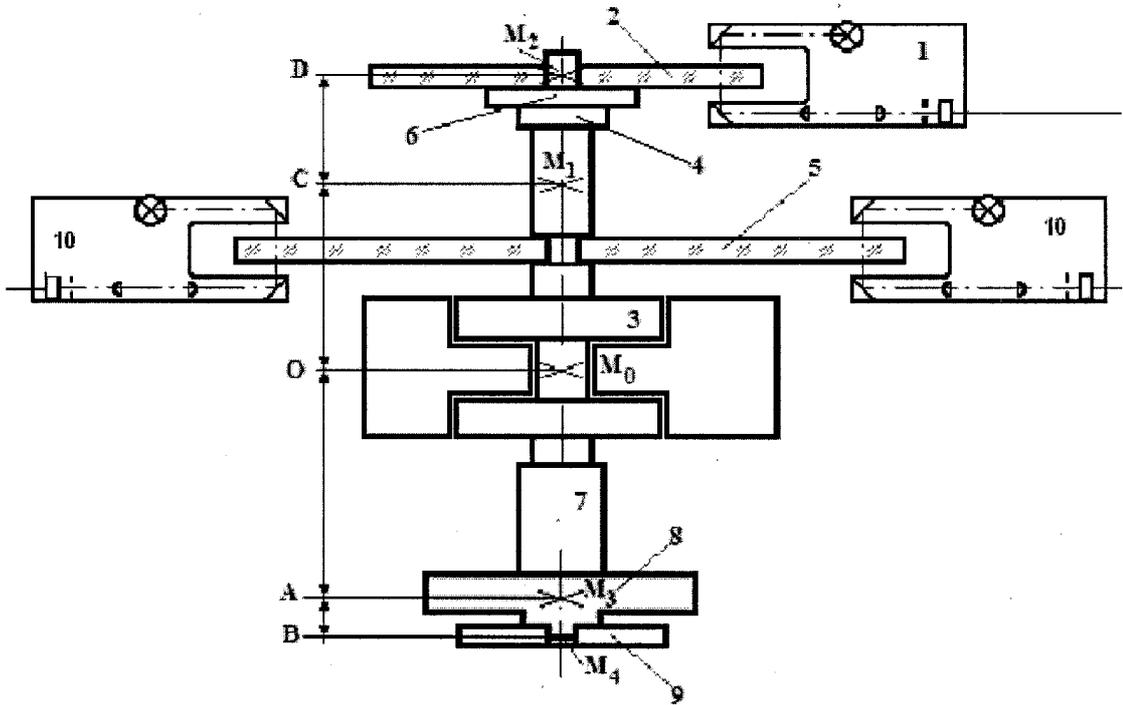
Пример 1. Пусть в составе углоизмерительной установки используется аэростатический шпиндель 3 с гарантированными биениями оси, не превышающими $\pm 0,05$ мкм. Расстояние от центра симметрии подшипника до посадочной плоскости оправки 6 – 250 мм. Расстояние от центра симметрии подшипника до посадочной плоскости противовеса (для имитатора) – 185 мм. В качестве контролируемой структуры 2 использован стеклянный диск толщиной 5 мм, диаметром 100 мм с внутренним отверстием, диаметром 10 мм, и массой $M_2 = 353,4$ г. Тогда центр масс УИС совпадает с координатой – 252,5 мм. Полярный момент инерции УИС равен – $6,2 \cdot 10^6$ г·мм².

В качестве имитатора 9 контролируемой структуры используется стальной диск, толщиной 5 мм. В данной конструкции центр масс этого диска совпадает с координатой – 187,5 мм, а полярный момент инерции должен быть равен $-6,2 \cdot 10^6$ г·мм². Следовательно, диаметр стального диска имитатора будет равна 75,8 мм.

Пример 2. Пусть в качестве контролируемой структуры 2 использован диск из стекла, толщиной 10 мм, диаметром 200 мм с внутренним отверстием, диаметром 10 мм. В этом случае центр масс УИС совпадает с координатой 255 мм. Масса диска равна 783,5 г, а полярный момент инерции УИС – 50 947 087 Г·мм².

В качестве имитатора 9 контролируемой структуры используется стальной диск, толщиной 10 мм. Центр масс этого диска совпадает с координатой – 190 мм. Полярный момент инерции его должен быть равен - 50 947 087 Г·мм². Следовательно, масса диска должна быть равной – 1411 г, а диаметр имитатора должен быть равным – 151,8 мм.

Таким образом, заявляемое устройство позволяет устранить погрешность контроля, связанную с появлением сложных движений в пространстве апекса оси вращающейся системы шпиндельного узла, снизив её до значений, определяемых только качеством изготовления подшипников шпинделя установки.



Фиг.1