

УДК 621.87

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ПЕРВИЧНЫХ ОТКЛОНЕНИЙ  
МЕХАНИЗМОВ МНОГОКООРДИНАТНЫХ СТАНКОВ С ЧПУ**

© Николай Алексеевич Серков, Игорь Викторович Никуличев

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Российской Академии  
Наук Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН,  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
профессионального образования Московский Государственный Технологический Универси-  
тет «СТАНКИН», Москва, Россия*

[zkpserkov@imash.ru](mailto:zkpserkov@imash.ru)

***Аннотация.** Прецизионные высокоскоростные многокоординатные станки с ЧПУ являются основой современного инновационного машиностроения. К ним предъявляются повышенные требования к точности воспроизведения пространственной траектории движения инструмента относительно обрабатываемой детали. Одним из основных направлений повышения точности станков является коррекция первичных отклонений подвижных узлов станка. В настоящей статье рассмотрены современные методы и средства измерения первичных отклонений механизмов несущих систем многокоординатных станков.*

***Ключевые слова:** точность станка с ЧПУ, измерение отклонений, первичные и суммарные отклонения, коррекция отклонений, измерительные средства.*

**METHODS AND MEASUREMENT TOOLS OF PRIMARY DEVIATIONS FOR  
LOAD-BEARING SYSTEM'S MECHANISMS OF MULTICOORDINATE CNC MACHINE  
TOOLS.**

***Annotation:** Precision high-speed multicoordinate CNC machine tools are a basis of modern innovative mechanical engineering. Increased requirements to accuracy of reproduction of a spatial trajectory for the tool's movement concerning a processed detail are presented to them. In the article, modern methods and measurement tools of primary deviations for load-bearing system's mechanisms of multicoordinate machine tools are considered.*

***Keywords:** accuracy of the CNC machine tool, measurement of deviations, primary and total deviations, correction of deviations.*

**1. Введение.** В работах [1,2] отмечается, что одними из основных направлений повышения точности обработки в машиностроении являются: 1) усиление роли метрологии в производстве, с целью обеспечения «обратной связи по точности» во всем цикле производства машины, 2) повышение точности станка коррекцией первичных отклонений звеньев механизмов его несущей системы. Коррекция выполняется программным обеспечением системы ЧПУ в соответствии с алгоритмами коррекции и данными об первичных отклонениях, содержащимися в файлах коррекции.

Развитию методов и средств эффективной калибровки станка и программных алгоритмов коррекции посвящено большое число отечественных и зарубежных исследований. В настоящей работе последовательно рассмотрены методы и средства, позволяющие измерять весь спектр первичных отклонений звеньев механизмов несущей системы многокоординатных станков.

Кратко рассмотрим основные устоявшиеся понятия метрологии, необходимые для дальнейшего рассмотрения методов и средств измерения первичных отклонений.

*Измерение* – совокупность преимущественно экспериментальных операций, выполняемых с помощью технического средства, хранящего единицу величины, позволяющего сопоставить измеряемую величину с её *единицей* и получить искомое значение величины. Это значение называют результатом измерений [3].

*Единица измерения физической величины* – физическая величина фиксированного размера, которой условно присвоено значение, равное 1, и применяемая для количественного выражения однородных с ней физических величин. В случае линейных измерений – метр (м), угловых – радиан (угол сектора, в котором дуга равна радиусу (мкм/м, угловая секунда)).

Измерения разделяются на виды по способу получения информации (рис. 1), среди которых можно выделить два основных измерения [4]:

*Прямое измерение* (прямой метод измерения) - измерение, при котором искомое значение физической величины получают непосредственно (сравнением величины с её единицей).



Рис. 1. Виды измерений (по способу получения информации).

*Косвенное измерение* (косвенный метод измерения) - измерение, при котором определение искомого значения физической величины получают на основании результатов прямых измерений других физических величин, функционально связанных с искомой величиной.

При калибровке и аттестации металлорежущих станков осуществляются как прямые измерения, так и косвенные.

Применительно к 5 координатному станку мод. МС 300 (ОАО «НИАТ» на рис. 2, б) представлены 30 первичных отклонений для 5 подвижных узлов станка и 8 параметров, осуществляющих согласование систем координат, связанных с основными узлами станка (рис. 2, а).

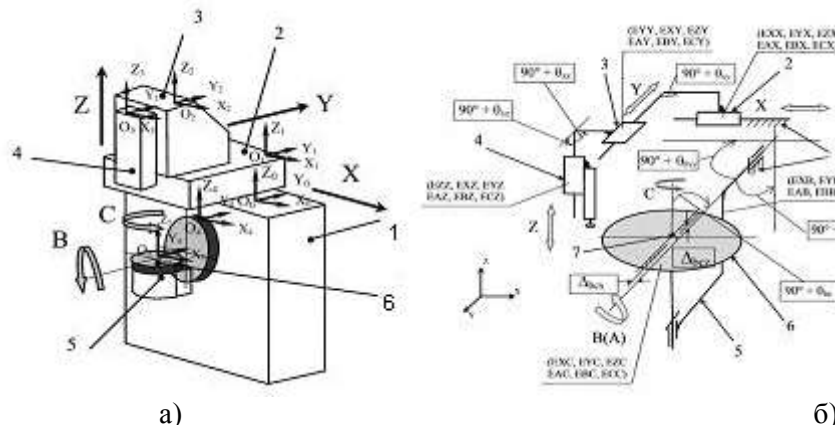


Рис. 2. Станок мод. МС 300: а) компоновочная схема станка с системами координат, расположенными на звеньях механизмов несущей системы, б) структурная схема механизмов станка. 1 - станина, 2 – салазки, 3 – стойка, 4 – шпиндельная бабка, 5 – корпус планшайбы, 6 – планшайба.

Ниже, последовательно, рассмотрены различные методы и средства измерения первичных отклонений для многокоординатных станков с ЧПУ.

**Измерение первичных отклонений.** Набор первичных отклонений для звеньев, входящих в поступательные и вращательные пары [5] механизмов несущей системы станка мод. МС - 300, состоит из 38 отклонений:

- 1)  $E_{XX}, E_{YY}, E_{ZZ}, E_{BB}, E_{CC}$  - отклонения позиционирования по линейным и угловым координатам,
- 2)  $E_{YX}, E_{ZX}, E_{XY}, E_{ZY}, E_{XZ}, E_{YZ}$  - отклонения от прямолинейности движения,
- 3)  $E_{AX}, E_{BX}, E_{CX}, E_{AY}, E_{BY}, E_{CY}, E_{AZ}, E_{BZ}, E_{CZ}$  — отклонения углового положения узлов станка при движении по линейным координатам (постоянство углового положения),
- 4)  $E_{AB}, E_{CB}, E_{BC}, E_{AC}$  — отклонения от вертикали и горизонтали осей поворота поворотных столов В и С (постоянство углового положения),
- 5)  $E_{XB}, E_{ZB}, E_{XC}, E_{YC}$  — радиальное биение поворотных столов,
- 6)  $E_{YB}, E_{ZC}$  — аксиальное биение поворотных столов,
- 7)  $\theta_{xy}, \theta_{xz}, \theta_{yz}, \theta_{bc}, \theta_{bxz}, \theta_{byz}$  - отклонений от перпендикулярности движений,
- 8)  $\Delta_{bcx}, \Delta_{bcy}$  — отклонения от «пересечения» осей В и С.

Следует отметить, что применительно к 5 координатным станкам других структур количество указанных параметров остаётся прежним — 38, но их обозначения другие.

Измерения проводятся различными методами.

**Метод измерений** – прием или совокупность приёмов сравнения измеряемой физической величины с её единицей.

На рис. 3 представлены основные методы измерений в соответствии с [3, 4, 6]. Здесь:  $A_d$  – действительная величина (действительный размер),  $A_m$  – величина меры (размер меры),  $A_n$  – номинальная (заданная) величина (размер),  $\delta$  - отклонение действительной величины  $A_d$  от номинальной  $A_n$



Рис. 3. Основные методы измерений.

**Метод непосредственной оценки** – метод измерений, при котором значение величины определяют непосредственно по показывающему средству измерений (микрометр, штангенциркуль, интерферометр).

Суть метода непосредственной оценки, как любого метода измерения состоит в сравнении измеряемой величины с мерой, принятой за единицу, но в этом случае мера "заложена" в измерительный прибор опосредованно, через шкалу или длину волны как в интерферометре.

*Метод сравнения с мерой* – метод измерений, в котором измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой, типичный пример - весы.

Различия между двумя методами измерений заключаются в том, что метод непосредственной оценки реализуют с помощью приборов без дополнительного применения мер, а метод сравнения с мерой предусматривает обязательное использование овециствованной меры, выделенной отдельно от прибора.

Метод сравнения с мерой реализуется в нескольких разновидностях, среди которых различают:

- дифференциальный и нулевой методы измерений,
- метод совпадений,
- метод измерений замещением и метод противопоставления,
- метод измерений дополнением.

Следует отметить, что при линейных и угловых измерениях в машиностроении в основном применяются дифференциальный и нулевой методы измерений.

Дифференциальный метод измерений – метод измерений, при котором измеряемая величина сравнивается с однородной величиной, имеющей известное значение, незначительно отличающееся от значения измеряемой величины, и при котором измеряется разность между этими двумя величинами.

Нулевой метод измерений – метод сравнения с мерой, в котором результирующий эффект воздействия измеряемой величины и меры на прибор сравнения доводят до нуля. (Хотя нулевой метод является частным случаем дифференциального метода, он выделен в отдельный метод в виду его широкого применения на практике).

Измерения отличаются не только по методам, но и по принципу измерения.

*Принцип измерений* – физическое явление или эффект, положенный в основу измерений.

Для измерения первичных отклонений звеньев, входящих в поступательные и вращательные пары, преимущественно используют следующие принципы:

- принцип «рычага» - механическая передача с определенным передаточным отношением (измерительные головки),
- индукция (индуктивные датчики),
- заряд конденсатора (емкостные датчики),
- явление интерференции волн (интерферометры),
- явление гравитации (уровнемеры),
- распространение луча света (оптические приборы),
- фотоэлектрический, термоэлектрический, пьезоэлектрический и др. эффекты.

Ниже последовательно рассмотрены основные измерительные средства, применяемые для измерения первичных отклонений звеньев механизмов несущей системы многокоординатных станков.

*Средство измерений* – техническое средство, предназначенное для измерений, имеющее нормированные метрологические характеристики, воспроизводящее и (или) хранящее единицу физической величины, размер которой принимают неизменным (в пределах установленной погрешности) в течение известного интервала времени.

**2. Измерение отклонений позиционирования вдоль линейных и угловых координат.** Отклонение от заданного положения – разность между действительным и заданным положением рабочего органа станка (ГОСТ 27843-88 «Станки металлорежущие. Методы проверки точности позиционирования»).

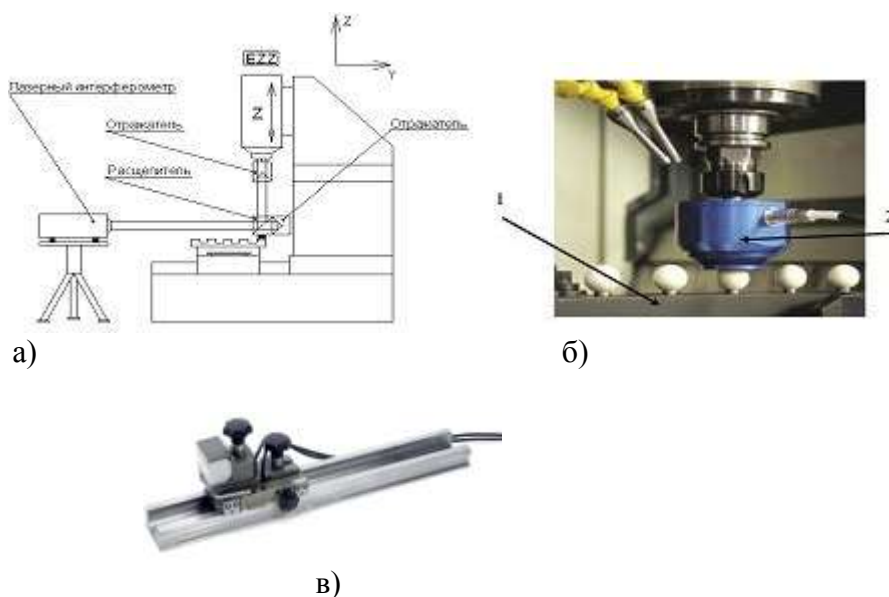
При измерении отклонений позиционирования вдоль линейной координаты (ЕХХ, ЕУУ, ЕZZ) используются измерительные средства метода непосредственной оценки:

- 1) лазерный интерферометр, оснащенный линейной оптикой (допустимая погрешность измерения с использованием лазерного интерферометра мод. ML 10 ф. Renishaw составляет с блоком компенсации EC10 +/- 0,7мкм (4 $\sigma$ ) [7]),
- 2) штриховые линейки (допустимая погрешность измерений с использованием штриховой линейки мод. VM 182 ф. DR. JOHANNES HEIDENHAIN GmbH составляет  $\pm 1 \mu\text{m}$  [8]),

и измерительные средства метода сравнения с мерой, в качестве которой наиболее часто выступает:

- калибровочная линейка с шарами (допустимая погрешность измерений с использованием калибровочной линейки мод. MTB-500SC ф. IBS Precision Engineering составляет  $u = 0,8 \text{ мкм} + L/1000$ , где L — измеряемая длина в мм ( $k=2, 2\sigma$ )[9]).

На рис. 4 представлены указанные выше средства измерения отклонений позиционирования по линейной координате.



**Рис. 4.** Современные приборы для измерения отклонений позиционирования: а) лазерный интерферометр, например, мод. ML 10, б) калибровочная линейка с шарами мод. MTB-500SC, в) штриховая линейка мод. VM 182.

При измерении точности позиционирования вдоль угловой координаты (ЕВВ, ЕСС) используются измерительные средства метода непосредственной оценки:

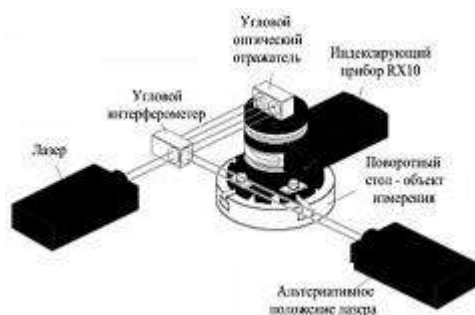
- 1) лазерные интерферометры с угловой оптикой и индексирующим устройством, например, RX 10 ф. Renishaw (допустимая погрешность измерения угла поворота составляет +/- 1" (4 $\sigma$ ) индексація - 5°),
- 2) автоколлиматор с шестигранной призмой (допустимая погрешность измерения угла, например, для автоколлиматора цифрового двухкоординатного ОПТРО-АК-012 ф. ООО "Оптротех" [10] составляет в диапазоне измерений угла  $\pm 5'$  по горизонтальной оси  $\pm 5'$  и по вертикальной оси - не более  $\pm 0,5''$ , автоматизирована процедура записи (съёма) результатов измеренных отклонений). В погрешность измерения угловых отклонений при позиционировании поворотного стола входят также погрешности используемой оптической шестигранной призмы.

На рис. 5, а) представлена схема измерений углового положения поворотного стола с помощью лазерного интерферометра ML10, оснащенного угловой оптикой и устройством



RX 10, а на рис. 5 б) - общий вид устройства RX 10, установленного для измерений угла поворота вокруг горизонтальной оси (ось В для станка мод. МС – 300).

При использовании лазерного интерферометра с угловой оптикой и индексирующего устройства мод. RX 10 для измерения отклонений позиционирования поворотных столов и поворотных головок существенно уменьшается трудоёмкость процесса измерения за счет автоматизации процедуры измерения.



а)



б)

**Рис. 5.** Индексирующий прибор RX10 и его применение для измерения углового отклонения вокруг горизонтальной оси.

**3. Измерение отклонений от прямолинейности (EYX, EZX, EXY, EYZ, EXZ, EYZ).** Отклонение от прямолинейности перемещения (ГОСТ 22267-98 «Станки металлорежущие. Схемы и способы измерений геометрических параметров») проверяемого рабочего органа в заданной плоскости – наибольшая алгебраическая разность ординат траектории функциональной точки проверяемого рабочего органа или ординат траектории относительного движения функциональной точки неподвижной части станка по отношению к проверяемому рабочему органу, в прямоугольной системе координат, ось абсцисс которой проходит через начало и конец траектории. Функциональная точка – точка, которая определяет формообразование обрабатываемого изделия.

Для измерения отклонений от прямолинейности применяются следующие измерительные средства метода непосредственной оценки:

- 1) лазерные интерферометры с оптикой для измерения отклонений от прямолинейности (допустимая погрешность измерения при применении ML 10 составляет  $\pm 0,5$  мкм,  $4\sigma$ ),
- 2) штриховые линейки (допустимая погрешность измерений при применении мод. VM 182 составляет  $\pm 1,5$  мкм на длине 420 — 1520 мм),
- 3) электронные уровнемеры и автоколлиматоры, а также измерительные средства метода сравнения с мерой:
  - 1) поверочные твердокаменные линейки (допуск плоскостности линейки класса точности 00 с широкой рабочей поверхностью ТУ 2-034-816-81 из твердокаменных пород (ОАО «Ставропольский инструментальный завод») составляет 2 мкм [11]),
  - 2) струна и микроскоп (погрешность измерения отклонений от прямолинейности составляет  $\approx 30$  мкм для длины 10 м и  $\approx 130$  мкм для длины 30 м [12, с. 284]).

В настоящее время находит всё большее применение лазерный интерферометр для измерения отклонений от прямолинейности движения подвижных узлов станка. На рис. 6, а) представлен набор оптики для лазерного интерферометра ML 10 ф. Renishaw и показан ход

лучей для случая установки расщепителя луча в шпинделе станка, а на рис. б, б) - штриховая линейка мод. VM 182 ф. DR. JOHANNES HEIDENHAIN GmbH.



**Рис. 6.** Перспективные средства измерения отклонений от прямолинейности: а) набор оптики и схема направления лучей лазера при измерении отклонений от прямолинейности движения расщепителя, установленного в шпинделе, б) общий вид штриховой линейки мод. VM 182, установленной на столе станка.

**4. Измерение угловых отклонений подвижного узла при линейных и угловых перемещениях (EAX, EBX, ECX, EAY, EBY, EBY, ECY, EAZ, EBZ, ECZ, EAB, ECB, EAC, EBC).** Для измерения угловых отклонений подвижного узла при линейном перемещении применяются следующие измерительные средства метода непосредственной оценки:

- 1) лазерный интерферометр с угловой оптикой (допустимая погрешность измерения угла при использовании лазерного интерферометра мод. ML 10 составляет:  $\pm 0.6\%A \pm 0.5 \pm 0.1M$  мкм/м, где  $A$  - измеряемый угол (мкм/м),  $M$  – расстояние от расщепителя луча до оптического отражателя в м),
- 2) электронный уровень (допустимая погрешность измерения угла при использовании прибора мод. EMP-832P-50-W2 (Mahr Federal Inc., USA) составляет:  $0.5\%A$ , (где  $A$  – измеряемый угол в угл. сек), но не более  $\pm 0.5$  угл. сек[13]).

Применение электронного уровня очень удобно в виду простоты его настройки в процессе измерений. Однако он обладает двумя существенными недостатками:

- результаты можно снимать только в «покое»,
- нельзя измерять повороты в плоскости, перпендикулярной вертикали.

Применение лазерного интерферометра дает то преимущество, что можно проводить измерения угловых отклонений при движении измеряемого объекта. Лазерные интерферометры типа ML 10 позволяют измерять угловые отклонения вокруг только двух осей, расположенных в плоскости перпендикулярной лучу лазера. Таким образом, применяя лазерный интерферометр мод. ML 10 и электронный уровень мод. EMP-832P-50-W2, можно измерять все угловые отклонения при линейных перемещениях, за исключением отклонения ECZ.

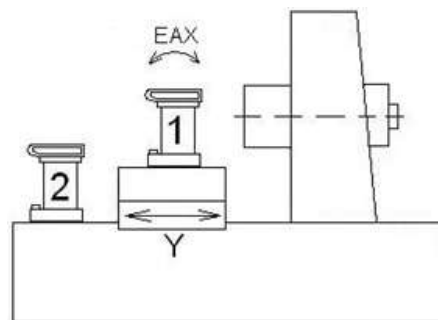
На рис. 7 представлены современные средства измерения угловых отклонений линейно перемещаемых узлов. На рис. 7, а) показан общий вид станка, на котором проводится измерение относительного перемещения корпуса шпинделя и стола с помощью лазерного интерферометра ML 10. На рис. 7, б) приведена схема использования электронных уровнемеров для измерения углов отклонения EAX при движении стола вдоль оси Y

Для измерения отклонений ECZ - угла поворота вокруг оси Z в функции движения по оси Z, применяется метод сравнения с мерой [14], контрольная плита с двумя индуктивными головками (преобразователями).

Авторам в настоящее время не известны примеры проведения прямых измерений отклонений EAB, ECB, EAC, EBC на многокоординатных станках с ЧПУ.



а)



б)



в)

**Рис. 7.** Приборы для измерения угловых отклонений при линейных перемещениях узла станка: а) угловая оптика лазерного интерферометра, б) схема измерения углового отклонения EAX уровнем 1 и 2, в) общий вид уровня мод. EMP-832P-50-W2.

**5. Измерение осевого и радиального биения поворотных столов (EXB, EYB, EZB, EXC, EYC, EZC).** Измерение радиального биения оси вращения в соответствии с ГОСТ 22267-98 осуществляется по методу прямого измерения отклонения образцовой детали (кольца или шара). Образцовую деталь устанавливают на плоскость, перпендикулярную оси вращения (в случае планшайбы, на её зеркало). Далее, методом «выстукивания» при вращении планшайбы выставляют эталонную деталь с минимальным биением (алгебраической разностью между максимальным и минимальным линейным отклонением эталонной поверхности в плоскости, перпендикулярной оси вращения). Величина минимального биения является оценкой радиального биения поворотного стола.

Осевое биение рабочего органа станка (ГОСТ 22267-98) – разность между наибольшим и наименьшим расстоянием от данной точки оси вращения рабочего органа до плоскости, перпендикулярной к этой оси.

Измерение осевого и радиального биения поворотных столов, как правило, осуществляют с помощью измерительных головок, работающих на самых разнообразных принципах по методу непосредственной оценки. Одна из таких головок (система измерительная портативная с индуктивным преобразователем БВ-6436 [15]) показана на рис. 8. Прибор имеет основную погрешность измерения отклонения  $L$ , мкм не более  $1 + L/333$ , мкм при дискретности отсчета — 1 мкм,  $0,1 + L/333$ , мкм при дискретности отсчета — 0,1 мкм и  $0,01 + L/333$ ,



мкм при дискретности отсчета — 0,01 мкм. Для измерения осевого биения используются плоские измерительные наконечники и эталонный шарик небольшого диаметра  $\varnothing \leq 5$  мм, устанавливаемый на проверяемой узле, например, в центре планшайбы.



*Рис. 8. Система измерительная портативная с индуктивным преобразователем БВ-6436.*

**6. Измерение отклонений от перпендикулярности движений подвижного узла, участвующего в двух взаимно перпендикулярных перемещениях ( $\theta_{xy}$ ,  $\theta_{xz}$ ,  $\theta_{yz}$ ).** В ГОСТ 22267-98 приводятся два определения отклонения от перпендикулярности:

- отклонение от перпендикулярности направлений прямолинейных перемещений равно алгебраической разности показаний показывающего прибора в крайних положениях проверяемого узла на заданной длине;

- отклонение от перпендикулярности траектории и направления прямолинейных перемещений равно наибольшей алгебраической разности показаний показывающего прибора на всей длине перемещений.

В последнем случае результаты измерения включают отклонение от прямолинейности траектории перемещения узла относительно поверочного угольника.

Для измерения отклонений от перпендикулярности движений подвижного узла ( $\theta_{xy}$ ,  $\theta_{xz}$ ,  $\theta_{yz}$ ) применяется при реализации метода непосредственной оценки лазерный интерферометр (рис. 9), оснащенный оптическим квадрантом с угловой оптикой (точность измерения отклонения от перпендикулярности при использовании прибора мод. ML 10 [7] составляет:  $(\pm 0.005A \pm 2.5 \pm 0.8 M)$  [ $\mu$  rad (0,2 угл. сек)], где  $A$  — отклонение на дисплее ( $\mu$  rad),  $M$  — расстояние от расщепителя луча до оптического отражателя в м).

Альтернативным средством измерения отклонений от перпендикулярности при реализации метода измерения сравнения с мерой является обычный поверочный угольник из твердокаменных пород (допуск на отклонение от перпендикулярности для угольника поверочного ТУ 2-034-220832-018-90 с размерами 400x250x60 мм класса точности 00 составляет +/- 1,6 мкм (ОАО «Ставропольский инструментальный завод»). При проведении измерений используются в качестве прибора сравнения, например, индуктивный преобразователь с показывающим прибором "Микрон-02", индуктивный преобразователь БВ-6436 и др.

Для измерения отклонений от перпендикулярности при больших диапазонах перемещений исполнительных органов станка ( $\geq 1,5$  м) для измерения перпендикулярности движений в особо точных станках и станках с большими рабочими перемещениями может применяться косвенный метод измерений, основанный на использовании лазерного интерферометра для измерения катетов и диагонали в прямоугольнике, например, как в работах [14,16].



а)



б)

**Рис.9.** Измерение отклонений от перпендикулярности движений исполнительных органов станка: а) набор оптики и принцип направления лучей лазера, б) измерение отклонений от перпендикулярности в пл. XZ на станке с вертикальным шпинделем.

**7. Измерение отклонений от «пересечения» осей В и С ( $\Delta_{bcz}$ ,  $\Delta_{bcx}$ ).** В соответствии с ГОСТ 22267-98 измерение отклонений от пересечения осей осуществляется через «материализацию» осей поворота цилиндрическими оправками. Процедура «материализации» выполняется путем выставления цилиндрических оправок («выстукивания») при вращении поворотных столов, что является трудоёмкой процедурой. Отклонение от пересечения выставленных оправок измеряется стандартным измерительным приёмом с двумя измерительными головками.

Для измерения отклонений от «пересечения» осей В и С ( $\Delta_{bcz}$ ,  $\Delta_{bcx}$ ) стандартных средств измерения в настоящее время нет, и для решения этой задачи в каждом конкретном случае приходится создавать оригинальные измерительные приспособления. В ИМАШ РАН совместно с ОАО НИАТ было разработано измерительное устройство с образцовым шаром [17] для станка мод. МС — 300. Из рис. 2 и рис. 10 видно, что для согласования систем координат корпуса планшайбы ( $X_4Y_4Z_4$ ) и планшайбы ( $X_5Y_5Z_5$ ) наряду с отклонением  $\theta_{bc}$  от перпендикулярности между осями С и В необходимо знать отклонение от «пересечения» осей С и В.

Отклонение от «пересечения» осей С и В есть наименьшее расстояние между осями С и В (общий перпендикуляр к осям С и В) [18]. Прямое измерение наименьшего расстояния между осями С и В представляет сложную метрологическую задачу. Однако, принимая во внимание, что отклонения от перпендикулярности  $\theta_{bc}$ ,  $\theta_{bcz}$  и  $\theta_{bcy}$  осей С и В практически не превышают  $30''$ , величину отклонения от пересечения осей С и В с достаточной точностью можно оценить проекцией  $\Delta_{bcx}$  на ось X. Уменьшая величину  $\Delta_{bcx}$ , мы стремимся к пересечению осей С и В.

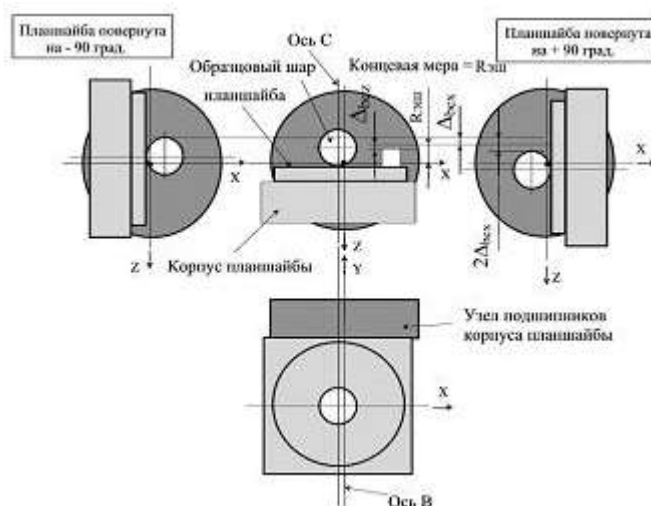


Рис. 10. Схема измерений отклонений  $\Delta_{bcx}$  и  $\Delta_{bcz}$

Для 5 координатной обработки кроме требования к пересечению осей  $C$  и  $B$  необходимо выдержать, чтобы ось  $B$  «лежала» в плоскости «зеркала» планшайбы. Это требование регламентируется допуском на отклонение  $\Delta_{bcz}$  – проекцию расстояния середины отклонения пересечения осей  $C$  и  $B$  от «зеркала» планшайбы на ось  $Z$ . Для измерения отклонений  $\Delta_{bcx}$  и  $\Delta_{bcz}$  удобно пользоваться измерительным приспособлением, принцип действия которого основан на замечательном свойстве шара – равноудалённости каждой точки поверхности от его центра.

На рис. 10 представлена схема измерения отклонений  $\Delta_{bcx}$  и  $\Delta_{bcz}$  с помощью образцового шара и концевой меры, равной радиусу образцового шара  $R_{шп}$ . Образцовый шар и концевая мера устанавливаются на «зеркале» планшайбы.

На рис. 11, показан общий вид приспособления, с помощью которого реализуется



Рис. 11. Общий вид приспособления для измерения  $\Delta_{bcx}$  и  $\Delta_{bcz}$  при горизонтальном положении планшайбы.

приведенная на рис. 10 схема измерений отклонений  $\Delta_{bcx}$  и  $\Delta_{bcz}$ . Приспособление установлено на «зеркале» планшайбы при горизонтальном её расположении.

Результаты опробования разработанной методики показали, что после проведения юстировки станка отклонения «пересечения» осей поворота на станке мод. МС - 300 составили  $\Delta_{bcx} = \pm 3$  мкм и  $\Delta_{bcz} = 9$  мкм и не превышают установленного допуска 10 мкм.

**8. Измерение отклонений от взаимной перпендикулярности осей В и С ( $\theta_{bc}$ ) и отклонений от перпендикулярности оси В к пл.  $X_0 Z_0$  ( $\theta_{bxz}$ ,  $\theta_{bxy}$ ).** В настоящее время универсальных средств измерения отклонений  $\theta_{bc}$ ,  $\theta_{bxz}$ ,  $\theta_{bxy}$  нет. Требуется разработка специальных измерительных приспособлений. На практике для контроля указанных отклонений используются интегральные измерения, в результаты которых входят наряду с другими отклонениями указанные отклонения. Принимается, что если результаты интегральных отклонений «укладываются» в допуск, то и указанные первичные отклонения соответствуют нормам точности.

Заканчивая рассмотрение основных средств измерения первичных отклонений звеньев механизмов несущей системы многокоординатных станков, необходимо указать, что в настоящее время появилось измерительное средство [19] – лазерный интерферометр ф. Automated Precision Inc., позволяющий за один прогон движущегося узла одновременно измерять 6 отклонений (6D). Например, для движущегося узла вдоль оси X применение такого лазерного интерферометра позволяет одновременно измерять все 6 отклонений (EXX, EYX, EZX, EAX, EBX, EZX), что значительно упрощает процедуру измерений, снижает трудоёмкость и время проведения измерительной операции. На рис. 12, а) представлен общий вид лазерного интерферометра мод. XD Laser и оптического отражателя, на рис. 12, б) индикация измеряемых отклонений, а на рис. 12, в) схема измерений 6 отклонений шпиндельной бабки при движении по координате Z.

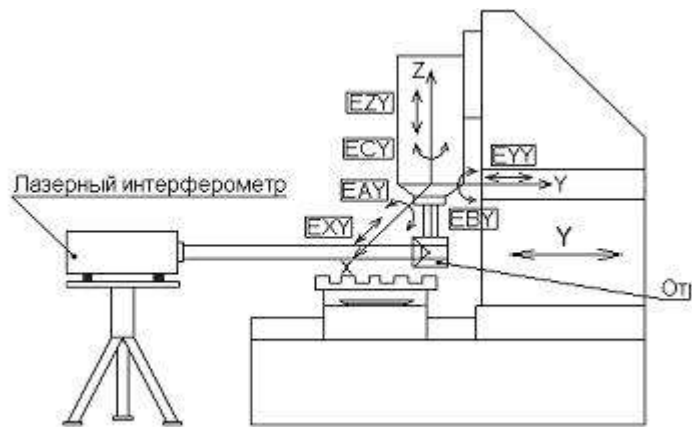
Фирма ETALON AG (Germany, Braunschweig) разработала прибор Tracker мод. Etalon Laser TRACER [20], с помощью которого удастся определять первичные отклонения механизмов несущей системы станка в комплексе в полуавтоматическом режиме. На рис. 13, а) показан общий вид прибора. На рис. 13, б) приведена конструктивная схема прибора: 1 — лазерный интерферометр, 2 — базовый образцовый шар, 3 — конструктивный элемент опоры шара. На рис. 13, в) представлена схема, поясняющая принцип действия прибора. Этот принцип измерений был предложен в работах [21-22] для аттестации промышленных роботов.



а)



б)

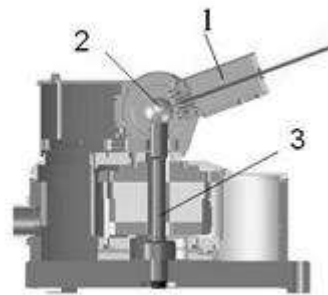


в)

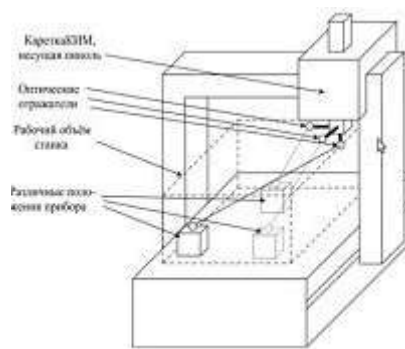
Рис. 12. Лазерный интерферометр мод. XD Laser: а) общий вид интерферометра, б) индикация измеряемых отклонений в процессе измерения, в) схема измерения отклонений.



а)



б)



в)

Рис. 13. Измерительный прибор мод. Etalon Laser TRACER: а) общий вид прибора, б) схема прибора, в) принцип измерений.



Прибор мод. Etalon Laser TRACER имеет следующие характеристики:

- Разрешающая способность интерферометра 0,001 мкм.
- Базовая образцовая сфера с погрешностью формы < 0,050 мкм.
- Допустимая погрешность измерения длины  $U = 0.2 \text{ мкм} + 0.3 \text{ мкм/м}$  ( $k=2, 2\sigma$ ) в диапазоне 0,2 м ÷ 15 м.
- Вес прибора - 15 кгс, вес контроллера — 10 кгс, высота прибора — 200 мм.

Следует отметить, что измерительный прибор мод. Etalon Laser TRACER работает по принципу, основанному на измерении только изменения длины лазерного луча при 4 — 6 положениях прибора в рабочем объеме станка.

**9. Выводы.** 1) За последнее десятилетие наблюдается существенный прогресс в повышении точности и уровня автоматизации измерений первичных отклонений звеньев механизмов несущей системы многокоординатных станков. Существенный прорыв в этом направлении достигнут на базе оптических измерений с использованием лазерных интерферометров. 2) Ведутся интенсивные работы по автоматизации измерений первичных отклонений звеньев, входящих во вращательные пары (поворотные столы, поворотные головки). 3) Существенные трудности остаются при измерении отклонений от перпендикулярности осей поворота (вращения) в 5 координатных станках.

### Литература

1. Schwenke H., Knapp W., Haitjema H., Weckenmann A., Schmitt R., Delbressine F. *Geometric error measurement and compensation of machines//CIRP Annals – Manufacturing Technology* – 57(2008). - pp. 660-675.
2. Серков Н.А.: *Основные направления повышения точности металлообрабатывающих станков//Проблемы машиностроения и автоматизации – 2010. - № 2.- С. 26-35.*
3. Кузнецов В.А., Ялунина Г.В. *Общая метрология. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 272 с.*
4. РМГ 29-99 «Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения» (взамен ГОСТ 16263-70 и МИ 2247-93).
5. Серков Н.А. *Первичные отклонения звеньев механизмов с поступательными и вращательными парами//Проблемы машиностроения и надежности машин – 2011. - № 2.- С. 15-21.*
6. <http://www.Support17.com>. Методы измерений.mht
7. [laser measurement and ballbar diagnosis.pdf](http://www.renishaw.com/en/laser-interferometer-systems--6800)  
<http://www.renishaw.com/en/laser-interferometer-systems--6800>
8. *Measuring Systems For Machine Tool Inspection and Acceptance Testing*  
[http://www.pdb.heidenhain.com/ansicht/Heidenhain/media/img/208\\_871-27.pdf](http://www.pdb.heidenhain.com/ansicht/Heidenhain/media/img/208_871-27.pdf).
9. *Machine Tool Calibration: • MT-Check • R-test • Spindle Error Analyzer*  
[http:// www.ibspe.de](http://www.ibspe.de)
10. *Оптические цифровые измерительные системы*  
<http://www.optrotech.ru/prod.php>
11. *Линейки поверочные*  
<http://www.stizinstrument.ru/>
12. *Точность и производственный контроль в машиностроении: Справочник/И. И. Балонкина, А. К. Кутай, Б. М. Сорочкин, Б. А. Тайц; - Л.: Машиностроение, 1983. -386 с.*

13. CATALOG ELECTRONIC LEVELS EMP-832P-50-W2.

<http://www.mahr.com/scripts/relocateFile.php?ContentID=11831&NodeID=13742&FileID=4313&ContentDataID=34975&save=0>

14. G. Zhang, et al., "Error Compensation of Coordinate Measuring Machines", *Annals of the CIRP* 34/1/1985, pp. 445-448.

15. [http://www.micron.ru/production/universal\\_instruments/bv-6436/](http://www.micron.ru/production/universal_instruments/bv-6436/)

16. O. Svoboda, "Testing the diagonal measuring technique" // *Precision Engineering* /30/ (April 2006) /132-144.

17. Серков Н. А., Шлесберг И. С., Никуличев И. В. Особенности построения 5 координатных станков с ЧПУ. *Научные труды Международной научно-практической конференции «Фундаментальные проблемы и современные технологии в машиностроении»*, М.: Машиностроение. 2010. С. 95-102.

18. ОТКЛОНЕНИЕ И ДОПУСКИ РАСПОЛОЖЕНИЯ (ГОСТ24642-83)

[http://www.propro.ru/graphbook/eskd/eskd/GOST/2\\_308/002.htm#b07](http://www.propro.ru/graphbook/eskd/eskd/GOST/2_308/002.htm#b07)

19. XD LASER MEASUREMENT SOLUTION

<http://www.apisensor.com>

20. *The LaserTRACER – Calibration and Testing with Sub-Micron accuracy*  
<http://www.etalon-ag.com>

21. Колисков А.Ш., Коченов М.И. Методы проверки точности функционирования промышленных роботов // *Станки и инструмент*. 1978. № 8. С. 7-10.

22. Колисков А.Ш. Разработка и исследование промышленных роботов на основе I – координат // *Станки и инструмент*. 1982. № 12. С. 21-24.

Поступила: 12.12.11.