УДК 621.87

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ОБЪЁМНОЙ ТОЧНОСТИ МНОГОКООРДИНАТНЫХ СТАНКОВ С ЧПУ.

© Николай Алексеевич Серков

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук.
zkpserkov@imash.ru

Аннотация. *5 координатные станки с ЧПУ являются основой современного машиностроения. К современным 5 координатным станкам с ЧПУ предъявляются повышенные требования к точности воспроизведения пространственной траектории движения режущего инструмента относительно обрабатываемой детали. В настоящей статье рассмотрены современные методы и средства измерения отклонений воспроизведения эталонной пространственной траектории.*

Ключевые слова*: точность станка с ЧПУ, методы и средства измерения, первичные и суммарные отклонения, объёмная точность, воспроизведение траектории.*

METHODS AND MEASUREMENT TOOLS FOR “VOLUMETRIC” ACCURACY OF MULTIAXIS CNC MACHINE TOOLS.

Precision five-axis machines are the basis for modern engineering. The problem of how to secure the needed “volumetric” accuracy of a precision five-axis machine during its manufacturing and operation is important for modern machinery manufacturing. In the article modern methods and measurement tools of relative position of the executive bodies of multiaxis CNC machine tools are considered.

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

1. Введение. В работе [1] рассмотрены методы и средства измерения первичных отклонений звеньев механизмов несущей системы (НС) многокоординатных станков на примере 5 координатного станка мод. МС – 300 (ОАО «НИАТ»). Измерение первичных отклонений, как правило, осуществляется в статическом (квазистатическом) режиме (с остановками для снятия показаний с измерительных приборов). Первичные отклонения звеньев механизмов НС станка характеризуют точность станка при движении по одной координате. Однако процесс резания на станке осуществляется путем относительного перемещения режущего инструмента и обрабатываемой детали, как правило, при взаимосвязанных движениях по нескольким координатам. Скорости и ускорения движения узлов станка из года в год увеличиваются. При этом на звенья механизмов, входящих в НС станка, действуют различные силы (веса, резания, инерции, трения и др.), которые вызывают деформации звеньев и дополнительные относительные перемещения их между собой. Эти деформации и дополнительные перемещения накладываются на первичные отклонения.

Степень влияния указанных деформаций и дополнительных перемещений может быть оценена путём сравнения результатов моделирования интегрального отклонения рабочих органов станка и измеренных отклонений воспроизведения траектории движения рабочих органов станка в пространстве («объёмная» точность). Вопросы расчёта интегрального отклонения рабочих органов станка по первичным отклонениям звеньев механизмов рассмотрены в [2]. Ниже рассмотрены методы и средства измерений отклонений воспроизведения траектории движения рабочих органов станка от заданной «эталонной» траектории.

2. «Объёмная» точность станка. «Объёмная» точность станка - это оценка его точностных возможностей при обработке 3-мерных (3D) («скульптурных») поверхностей. Это определение ввел McKeown в работе [3]. Аналогично в работе [4] отмечается, что «При испытании высокоточных фрезерно-расточных станков была сделана попытка оценить ошибки перемещения органов станка во всем объеме рабочего пространства, там, где может быть установлена обрабатываемая деталь. Такая «объёмная» точность станка, формирование пространственного «поля ошибок» и оценка влияния на них тепловых деформаций является, по мнению проф. Е. А. Матиаса, более полной характеристикой станка».

Критерий оценки «объёмной» точности обработки «скульптурной» поверхности должен показывать степень «близости» точек действительной (обработанной на станке) поверхности и заданной (теоретической) поверхности. В работе [5] в качестве критерия степени близости двух поверхностей предлагается использовать объём пространства, заключённый между этими поверхностями,

$$J = \frac{1}{N}\iint_F |\,\delta(x,y)\,|\,dx\,dy\ ,$$

где $\delta(x,y)$ - отклонение (погрешность) обработки детали в точке с координатами *x, y*; *F* – обрабатываемая поверхность. Отклонения $\delta(x,y)$ измеряются по нормали к поверхности (теоретической или действительной).

В отклонения обработанной поверхности $\delta(x,y)$ непосредственно входят (принцип суперпозиции – наложения) отклонения, определяемые станком, и отклонения, связанные с другими источниками, например, с режущим инструментом, приспособлением и обрабатываемой деталью.

Выделить в отклонениях обработанной поверхности $\delta(x,y)$ долю, вносимую станком, и по ней оценивать «объёмную» точность станка, представляет самостоятельную задачу, решению которой посвящено огромное число теоретических и экспериментальных исследований.

3. Методы и средства оценки «объёмной» точности станка. На рис. 1 представлены методы оценки «объёмной» точности станка. Два метода оценки «объёмной» точности станка основаны на измерении отклонений действительной траектории от «эталонной» на холостом ходу станка.

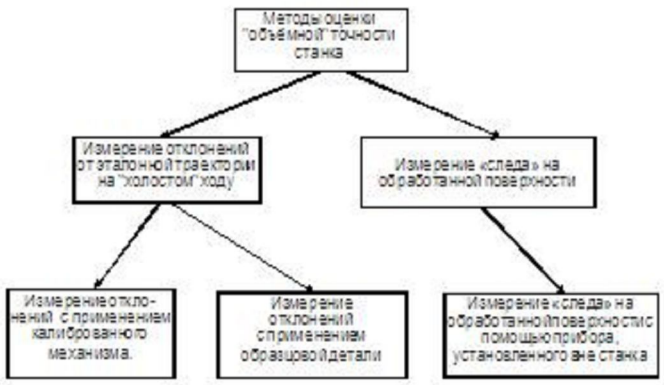


Рис. 1

Этими методами являются:

1) метод измерения отклонений с применением калибровочного механизма,
2) метод измерения отклонений с применением образцовой детали.

Третий метод основан на измерении отклонений обработанной поверхности от расчетной. (Измерение «следа» на обработанной поверхности).

Для реализации любого из представленных методов необходимы:

- прибор сравнения, на который поступают действительное и эталонное значение измеряемой величины,

- мера – материальное воплощение эталонной величины,

- измеряемый объект (станок) – «источник» действительного значения измеряемой величины.

В качестве меры применяются:

1) *образцовая деталь* с точно изготовленными функциональной и присоединительными поверхностями (эталонная траектория располагается на функциональной поверхности),

2) *измерительный прибор* (устройство), устанавливаемый на станке,

3) *измерительный прибор, установленный вне станка* (координатная измерительная машина, контурограф и др.).

Прибор сравнения зависит от того, какая используется мера:

1) В случае применения *образцовой детали* – это **измерительные головки**, которые устанавливаются в шпиндель станка и контактируют измерительным наконечником с образцовой деталью.
2) При применении *измерительного прибора,* установленного на станке - это **компьютер** (вычислительное средство), в котором сравнивается вычисленная по информации с датчиков, траектория движения и эталонная траектория.
3) При применении *измерительного прибора,* установленного вне станка - это **компьютер прибора**, в котором сравнивается измеренная поверхность на обработанной детали и заданная поверхность.

Ниже на рис. 2-4 представлены схемы распределения потоков информации в измерительных устройствах, реализующих рассмотренные методы измерения отклонений воспроизведения эталонной траектории.

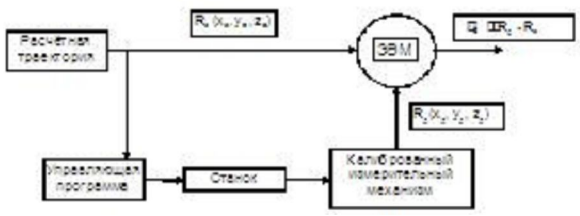


Рис. 2. Схема потоков информации при способе измерения отклонений воспроизведения эталонной траектории с помощью калиброванного измерительного механизма.

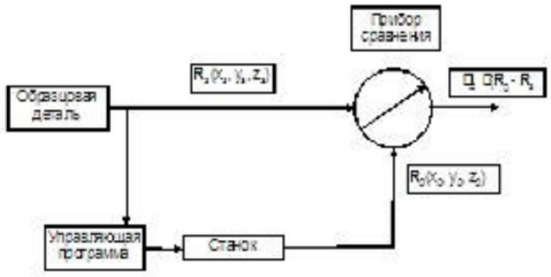


Рис. 3. Схема потоков информации при способе измерения отклонений воспроизведения эталонной траектории с помощью образцовой детали и измерительной головки отклонения.

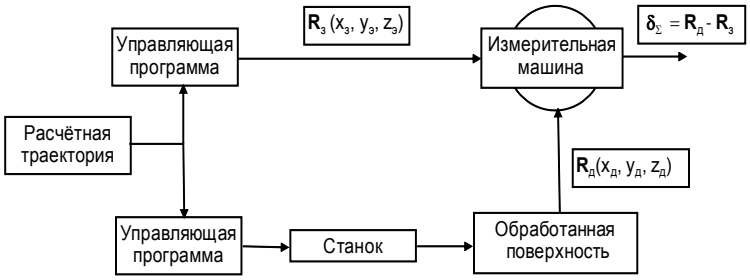


Рис. 4. Схема потоков информации при оценке объёмной точности станка по «следу» на обработанной поверхности.

Ниже последовательно рассмотрены приборы (устройства), реализующие рассмотренные три метода оценки «объёмной» точности станка.

4. Оценка объёмной точности станка измерением отклонений воспроизведения эталонной траектории. Рассмотрение *приборов (устройств), реализующих метод измерения с применением калиброванного механизма*, будем проводить в соответствии с предложенной ниже классификацией.

Всё множество приборов, реализующих этот метод, можно разбить на группы в соответствии с числом степеней подвижности, используемых в калиброванном механизме, и в зависимости от того, какими кинематическими парами они реализуются (поступательными или вращательными). В табл. 1 представлено разбиение всего множества приборов на группы в соответствии с указанными признаками.

Табл. 1

	Поступательные пары (L)				
Вращательные пары (C)		0	1	2	3
	0	L_0C_0	L_1C_0	L_2C_0	L_3C_0
	1	L_0C_1	L_1C_1	L_2C_1	
	2	L_0C_2	L_1C_2		
	3	L_0C_3			

Приборы с нулевой степенью подвижности L_0C_0 не реализуемы.

Приборы со степенью подвижности 1 реализуются по структурам: L_0C_1, L_1C_0.

Приборы со степенью подвижности 2 реализуются по структурам L_0C_2, L_1C_1, L_2C_0.

Приборы со степенью подвижности 3 реализуются по структурам L_0C_3, L_1C_2, L_2C_1, L_3C_0.

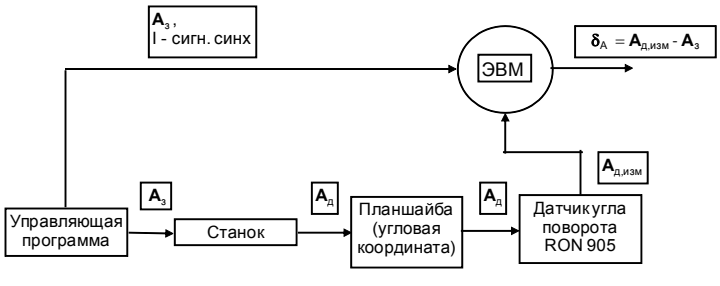
Приборы для измерения отклонений воспроизведения эталонной траектории строятся таким образом, что с помощью их измеряются координаты точки однозначно связанной с исполнительным органом машины (станка). Практически - это центр шара, жестко закрепленного на выходном звене механизма прибора. Этот шар соединяется с конусом, жестко закреплённым в исполнительном органе станка (чаще всего в шпинделе), и удерживается в соприкосновении магнитом и, таким образом, образуется сферическая кинематическая пара соединения выходного звена прибора с исполнительным органом станка.

Приборы со степенью подвижности 1.

Приборы структуры L0C1. Такими приборами являются датчики углового перемещения. Они могут использоваться для исследования движения по угловым координатам машины. Характерным примером такого прибора может служить датчик мод. RON 905 фирмы Heidenhain GmbH (Germany). Конфигурация системы измерения в этом случае представлена на рис. 5.

Датчик угла поворота мод. RON 905 является надежным устройством и отличается высокой точностью ± 0.4″(допустимая погрешность измерения угла поворота в диапазоне 360°).

С помощью прибора можно записывать переходные процессы, т.е. кривые разгона и торможения при отработке угловых координат (A = A(t)). Однако для выделения отклонения необходимо реализовывать вычислительную процедуру: $\delta\mathbf{A} = \mathbf{A}_{д,\,изм} - \mathbf{A}_з$, для выполнения которой необходимо синхронизировать записи сигналов $\mathbf{A}_з$ – заданного сигнала угла поворота и $\mathbf{A}_{д,\,изм}$ – сигнала измерения угла поворота.

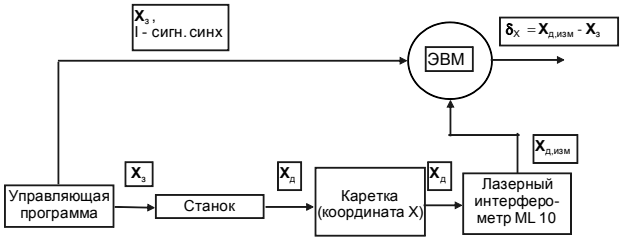


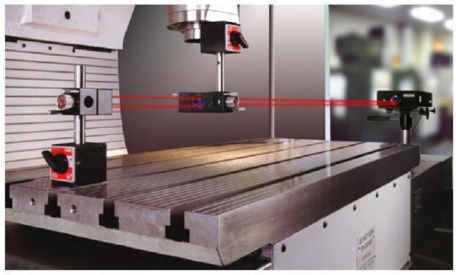


а) б)

Рис. 5. Измерение угла поворота планшайбы: а) блок-схема, б) датчик угла поворота, устанавливаемый на поворотном узле станка.

Приборы структуры L_1C_0. Характерным примером прибора такой структуры является лазерный интерферометр с линейной оптикой (рис. 6).





а) б)

Рис. 6. Измерение перемещения по координате X: а) блок-схема измерений, б) схема измерений перемещений x(t) с помощью лазерного интерферометра, работающего в режиме «динамических измерений».

С помощью лазерного интерферометра можно записывать переходные процессы при отработке линейных координат (X = X(t)). При этом необходимо осуществлять синхронизацию записи сигнала с датчика и программы управления станком.

Приборы со степенью подвижности 2.

Приборы структуры L_0C_2. Конструкция такого прибора может быть аналогична конструкции робота типа «Skara», в котором вместо двигателей установлены датчики углового положения. На рис. 7, а) представлена структурная схема взаимодействия устройства L_0C_2 с исполнительными органами станка. Здесь: 1 – Подставка, устанавливаемая на стол станка, 2 – первое поворотное звено, 3 – второе поворотное звено, 4 – стойка станка (координата Y), несущая шпиндель, который связывается со звеном 3 через сферический шарнир, 5 – каретка (координата X), движущаяся по станине.

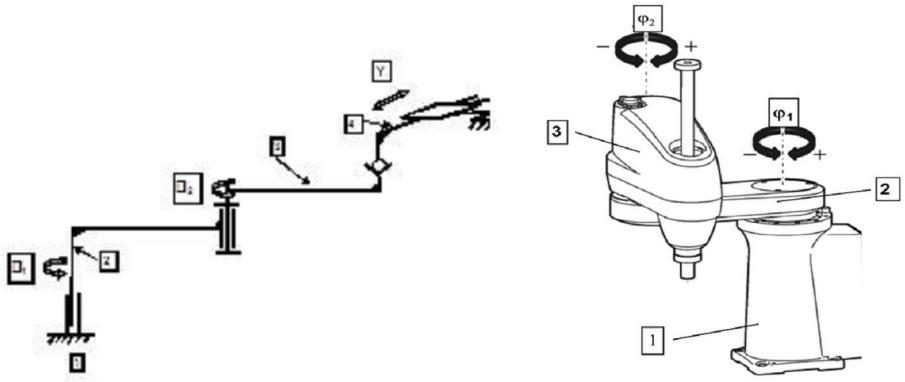
На рис. 7, б) изображен общий вид робота мод.KR 5 SCARA 350 ф. Kuka roboter GmbH (Germany). В настоящее время не известна реализация такого прибора. Прибор прост в конструкции и может быть удобен в эксплуатации, однако, имеет «мертвые» точки, когда звено 2 и 3 расположены на одной прямой.

Механизм устройства имеет 2 степени подвижности (W = 2):

$$W = 6 \cdot n - (5 \cdot p_1 + 4 \cdot p_2 + 3 \cdot p_3 + 2 \cdot p_4 + p_5),$$

где: n = 4 - число подвижных звеньев,

p_1 = 3 - число кинематических пар с 1 степенью подвижности,



а) б)

Рис. 7. Прибор L_0C_2: а) структурная схема, б) общий вид робота мод.KR 5 SCARA 350 ф. Kuka roboter GmbH (Germany).

$p_2 = 1$ - число кинематических пар с 2 степенями подвижности (цилиндрический шарнир),

$p_3 = 1$ - число кинематических пар с 3 степенями подвижности (сферическая пара),

$p_4 = 0$ - число кинематических пар с 4 степенями подвижности,

$p_5 = 0$ - число кинематических пар с 5 степенями подвижности.

$W = 6 \cdot 4 – (5 \cdot 3 + 4 \cdot 1 + 3 \cdot 1) = 24 – 22 = 2.$

Приборы структуры L_1C_1. Такую структуру имеет прибор QC-10 [6] ф. “Renishaw” (England), получивший широкое применение для измерения отклонений от «эталонной окружности» при её отработке на станке с ЧПУ. Приборы этого типа получили название

«double ball bar» (DBB). На рис. 8, а) представлен общий вид прибора, а на рис. 8, б) - структурная схема механизма прибора.

Звено 1 – стойка, несущая шарик, устанавливается, как правило, на стол станка. К этому шарику магнитом притягивается конус звена 2. Звено 2 и звено 3 соединяются между собой через индуктивный датчик. На конце звена 3 расположен шарик, который магнитом подвижно соединяется с конусом звена 4.

Звено 4 устанавливается в шпиндель станка и может совершать взаимосвязанные движения по координатам X, Y, Z, по эталонной траектории, расположенной на сфере номинального диаметра. Отклонения от эталонной траектории на сфере номинального диаметра воспринимаются индуктивным датчиком.

Механизм прибора при измерении отклонений от эталонной траектории на сфере номинального диаметра имеет 4 степени подвижности (W = 4):

$W = 6 \cdot n – (5 \cdot p_1 + 4 \cdot p_2 + 3 \cdot p_3 + 2 \cdot p_4 + p_5),$

где:

$n = 5$ - число подвижных звеньев,

$p_1 = 4$ - число кинематических пар с 1 степенью подвижности,

$p_3 = 2$ - число кинематических пар с 3 степенями подвижности (сферическая пара),

$p_2 = p_4 = p_5 = 0.$

$W = 6 \cdot 5 – (5 \cdot 4 + 3 \cdot 2) = 30 – 26 = 4.$

Здесь: dR – перемещение штока в индуктивном датчике, равное отклонению действительной траектории от номинальной окружности, φ_1 - угол поворота звена 2 вокруг оси Zd (система координат Xd, Yd, Zd связана со звеном 2, ось Xd проходит через центры шаров, ось Yd параллельна пл. XY), φ_2 - угол поворота звена 2 вокруг оси Yd, поворот φ_3 звена 2 и 3 вокруг оси Xd.

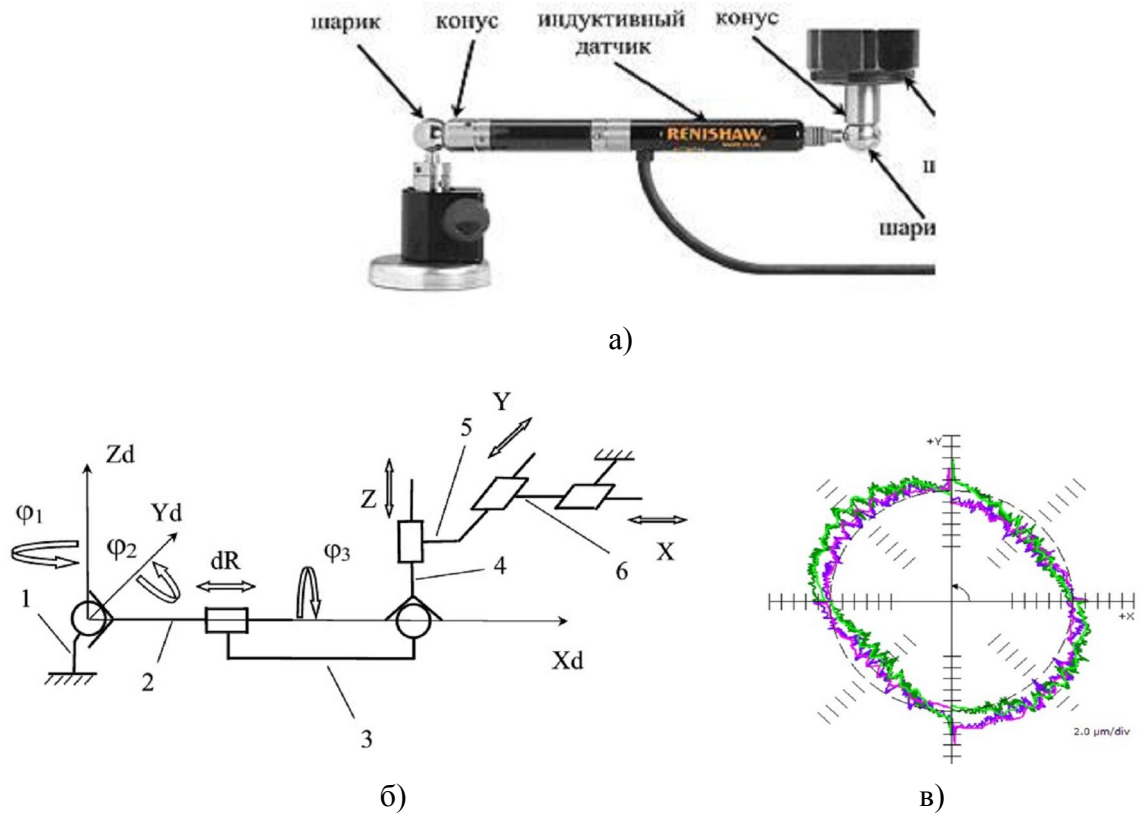


Рис. 8. Прибор мод. QC-10 для измерения отклонений от «эталонной окружности»: а) общий вид прибора, б) структурная схема прибора QC-10 в его взаимодействии с исполнительными органами станка, в) результаты измерения отклонений от эталонной окружности в пл. XY на скорости обхода контура S = 1000 мм/мин на станке мод. МС – 300 (по часовой стрелке - зелёная кривая и против часовой стрелки - сиреневая кривая).

При присоединении прибора QC-10 к исполнительным органам станка, как показано на рис. 8, б), у механизма прибора для измерения отклонений воспроизведения эталонной окружности используются лишь 2 степени подвижности:

1 – перемещение в индуктивном датчике dR – отклонения воспроизведения эталонной окружности,

2 – поворот звена 2 вокруг оси Zd – параметр, «привязывающий» отклонения воспроизведения эталонной окружности к точке на окружности,

Поворот звена 2 вокруг оси Yd используется для компенсации отклонения воспроизведения эталонной окружности вдоль оси Zd, вызванные станком, а поворот звена 2 вокруг оси Xd используется для «разматывания» шнура питания.

Основные технические характеристики прибор QC-10 [6] следующие:

- скорость считывания и записи информации при движении исполнительных органов станка - 250 точек/сек,

- номинальные радиусы окружности (расстояние между центрами шаров): 50, 100, 150, 250, 400 мм,

- допустимая величина перемещения штока -1.25/+1.75 мм,

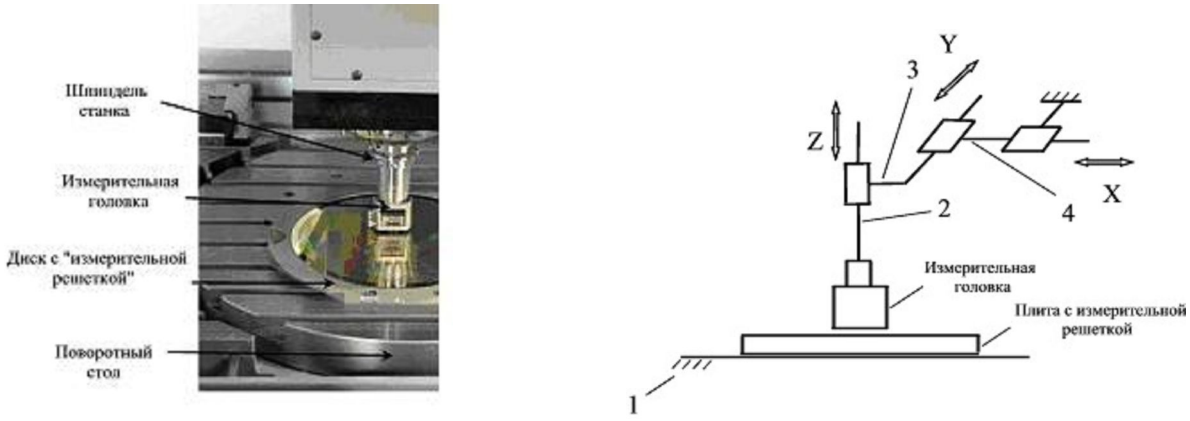
- разрешающая способность (дискретность) – 0,1мкм

- диапазон измерения +/- 1 мм

- точность измерений отклонений от эталонной траектории «окружность» составляет ± 1,0 мкм (при 20°С).

Прибор QC-10 позволяет измерять отклонения воспроизведения «эталонной окружности» в плоскости, произвольно расположенной в рабочем объёме станка, но строго фиксированных радиусов. Однако, как правило, при испытаниях станка окружность располагают в координатных плоскостях (XY, XZ, YZ).

Приборы структуры L_2C_0. Прибор мод. Measuring Systems for Inspecting Linear Axes KGM 181 and KGM 182 Grid Encoders ф. DR. JOHANNES HEIDENHAIN GmbH [7] имеет структуру L_2C_0. Он позволяет измерять отклонения от «плоской» траектории в круге ø 140 мм и ø 230 мм с точностью ±2 мкм на скорости до 80 м/мин. На рис. 9, а) представлен общий вид прибора «Grid Encoders KGM». Считывающая головка устанавливается в шпиндель станка и совершает плоскопараллельное движение (L_2) относительно измерительной «решётки», нанесённой на диск, устанавливаемый на столе станка. На рис. 9, б) приведена схема присоединения прибора к станку. Здесь: 1- стол станка, на который устанавливается плита с «измерительной решеткой», 2 – шпиндель станка, к которому жестко присоединяется измерительная головка, 3 – стойка станка (координата Y), 4 – каретка станка (координата X).



а) *б)*

Рис. 9. Прибор «Grid Encoders KGM» ф. Heidenhain GmbH (Germany): а) общий вид прибора, установленного на столе станка, б) схема присоединения прибора к станку.

Прибор Grid Encoders KGM позволяет исследовать станок на точность отработки траектории в различных динамических режимах и, в частности, на круговой траектории аналогично прибору QC 10. У прибора Grid Encoders KGM радиус окружности может быть произвольным в диапазоне 115 – 0,1 мм. Особо следует отметить, что измерительная «решётка» выполнена из материала, имеющего температурный коэффициент линейного расширения равный $\alpha_e = 8 \times 10^{-6}\ K^{-1}$. Благодаря этому температура окружающей среды мало влияет на результаты измерений.

Другим примером прибора структуры L_2C_0 является прибор LB-500 (Laser/Ballbar) [8] ф. Optodyne , Inc. (USA), разработанный на базе лазерного устройства MCV-500 (лазерное устройство для измерения перемещений, работающее на принципе Доплера). Прибор предназначен для измерения отклонений от «эталонной плоской траектории», в частности, окружности.

Точностные возможности прибора следующие: точность измерения линейных перемещений – 1мкм, дискретность отсчёта – 0,01 мкм, диапазон измерения – 1м, частота опроса – 1000 значений/сек.

Данный прибор имеет точностные возможности, аналогичные прибору QC-10. ф. Renishaw. Прибор ориентирован на измерение отклонений от эталонной окружности любого радиуса в определенном диапазоне, но может использоваться для измерения отклонений по радиус-вектору при воспроизведении любой траектории в плоскости.

Для проведения измерений необходимо наличие двух лазерных интерферометров и двух отражающих зеркал. Схема измерений представлена на рис. 10.

Можно отметить, что измерения отклонений от эталонной окружности по схеме ф. Optodyne , Inc. более громоздки, чем по схеме ф. Renishaw. Однако, при измерениях по схеме ф. Renishaw отклонения мы получаем по радиусу, а при измерениях по схеме ф. Optodyne , Inc. как и с помощью прибора «Grid Encoders KGM» отклонения получаются по координатам (ΔX, ΔY)). В некоторых случаях это является существенным преимуществом.

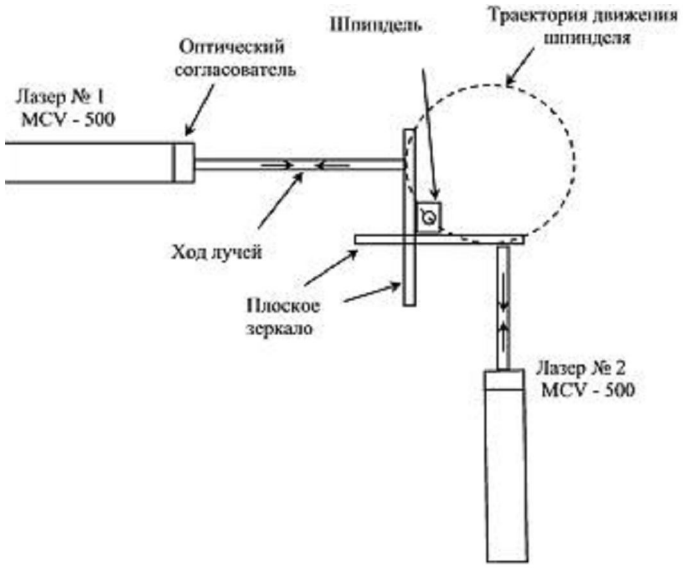


Рис. 10. Схема измерений отклонений от эталонной окружности с использованием прибора LB-500 ф. Optodyne , Inc.

Приборы со степенью подвижности 3.

Приборы структуры L_0C_3. В работе [9] описан прибор структуры L_0C_3 для измерения отклонений от траектории движения в пространстве (ΔX, ΔY, ΔZ) (the rotary encoder and link mechanism (RELM)). На рис. 11, а) показана схема расположения датчиков и поворотных звеньев механизма прибора, а на рис. 11, б) представлен общий вид прибора, установленного на столе станка. Структурная схема механизма прибора, показана на рис. 12. Соединение прибора со станком осуществляется путем крепления основания на столе станка и присоединения стального шарика к шпинделю станка с помощью конуса и магнита.

Механизм прибора при измерении отклонений от эталонной траектории (X, Y, Z) имеет 3 степени подвижности (W = 3, повороты: φ_1, φ_2, φ_3):

$$W = 6 \cdot n - (5 \cdot p_1 + 4 \cdot p_2 + 3 \cdot p_3 + 2 \cdot p_4 + p_5),$$

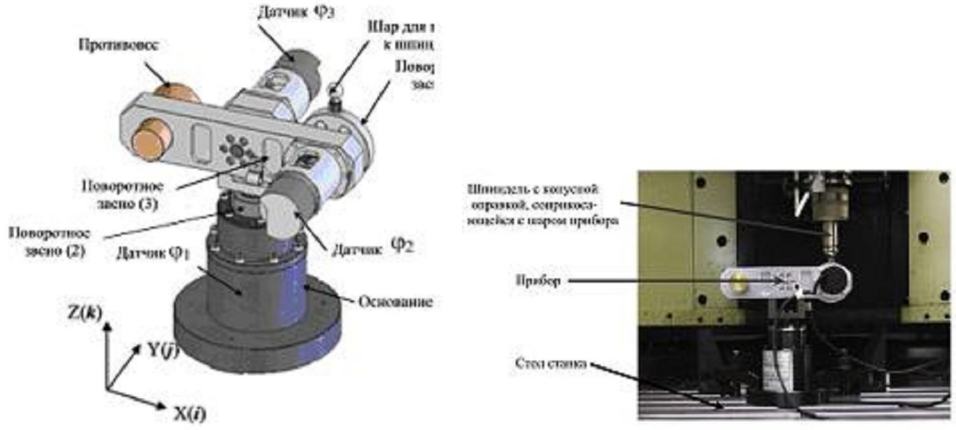
где: n = 6 - число подвижных звеньев,

$p_1 = 6$ - число кинематических пар с 1 степенью подвижности,

$p_3 = 1$ - число кинематических пар с 3 степенями подвижности (сферическая пара),

$p_2 = p_4 = p_5 = 0.$

$W = 6 \cdot 6 – (5 \cdot 6 + 3 \cdot 1) = 36 – 33 = 3.$



а) б)

Рис. 11. Прибор RELM: а) схема расположения датчиков и поворотных звеньев механизма, б) общий вид прибора (L_0C_3), установленного на столе многоцелевого станка с ЧПУ.

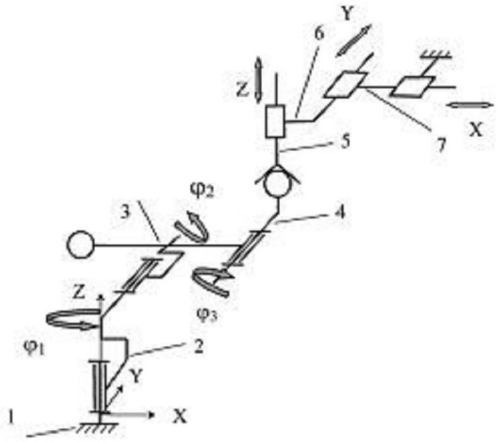


Рис. 12. Структурная схема прибора RELM и механизмов несущей системы станка, имеющего 3 линейные координаты (X, Y, Z).

Здесь: 1 – основание, закрепленное на неподвижном столе станка, 2 - поворотное звено (2), 3 – поворотное звено (3), поворотное звено (4), 5 - шпиндель станка с конусной оправкой, притягивающейся к шару прибора с помощью магнита, 6 – стойка, несущая шпиндельную бабку, 7 – салазки, несущие стойку.

Для обеспечения необходимой точности измерений прибор калибруется. В процессе калибровки определяются 11 параметров (размеров) звеньев механизма прибора. В соответствии с ними, уточняются параметры кинематической модели расчета отклонений ΔX, ΔY, ΔZ действительной траектории от номинальной. Предложенный метод и прибор были опробованы на тестовых задачах измерения эталонных траекторий. Результаты из-

мерений [9] сопоставимы с результатами, полученными с помощью приборов «double ball bar» и «Grid Encoders KGM».

Приборы структуры L_1C_2. В работе [10] описан прибор структуры L_1C_2 для измерения отклонений от траектории движения в пространстве, в котором используются лазерный интерферометр и два датчика угла поворота. Структурная схема механизма прибора и его связи с механизмами несущей системы станка, имеющего 3 линейные координаты (X, Y, Z), представлена на рис. 13.

Основу прибора составляет механизм с 3 степенями подвижности: две степени обеспечиваются вращательными парами и одна – поступательной парой. (W = 3, линейное перемещение dL и повороты: φ_1, φ_2):

$$W = 6 \cdot n - (5 \cdot p_1 + 4 \cdot p_2 + 3 \cdot p_3 + 2 \cdot p_4 + p_5),$$

где: n = 6 - число подвижных звеньев,

$p_1 = 6$ - число кинематических пар с 1 степенью подвижности,

$p_3 = 1$ - число кинематических пар с 3 степенями подвижности (сферическая пара),

$p_2 = p_4 = p_5 = 0$.

$$W = 6 \cdot 6 - (5 \cdot 6 + 3 \cdot 1) = 36 - 33 = 3.$$

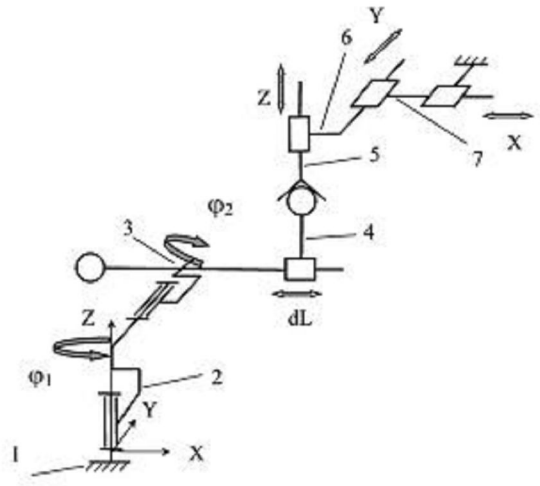


Рис. 13. Структурная схема механизма прибора (L_1C_2).

В приборе снимается информация с кругового датчика, установленного на звене 2, о величине угла поворота φ_1 вокруг оси Z, а с кругового датчика, установленного на звене 3, о величине угла поворота вокруг оси Y. С помощью лазерного интерферометра в приборе измеряются перемещения по линейной координате прибора dL. По этой информации рассчитываются отклонения движения исполнительных органов станка от заданной траектории. Прибор устанавливается основанием 1 на стол станка, а шар, закреплённый на звене 4, соединяется с шпинделем станка с помощью конуса и магнита.

Такую же структуру L_1C_2 имеют прибор Leica Absolute Tracker [11] ф. Leica Geosystems AG (Switzerland) и прибор Laser Tracker V.E.C. ф. Automated Precision Inc. (USA) [12]. Приборы позволяют измерять отклонения от траектории движения в пространстве исполнительных органов машин.

Допустимая погрешность прибора MPE при измерении расстояния вдоль линии лазерного луча составляет ± 10 мкм и перпендикулярно линии лазерного луча ± 15 мкм + 6 мкм/м в рабочем диапазоне 2 ÷ 40 м.

На рис. 14 представлен общий вид прибора Laser Tracker V.E.C. при измерении с целью калибровки 5 координатного многоцелевого (фрезерного) станка портальной конструкции мод. MAG UG 1500.

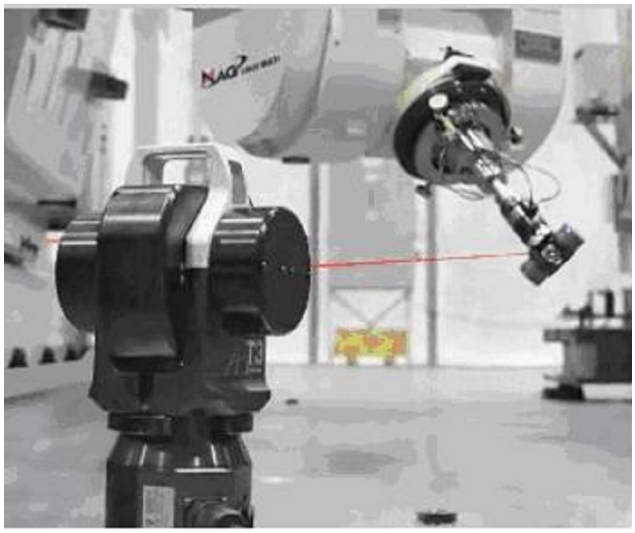


Рис. 14. Общий вид прибора Laser Tracker V.E.C.

Прибор Laser Tracker очень удобен для испытаний и аттестации крупногабаритных станков, используемых, в частности, в аэрокосмической промышленности и в тяжелом и энергетическом машиностроении.

Приборы структуры L_3C_0. Фирма ETALON AG (Germany, Braunschweig) разработала прибор Tracker мод. Etalon Laser TRACER [13] (рис. 15) для измерения прецизионных станков средних размеров, который работает по принципу, основанному на измерении только изменения «длины лазерного луча».

Принцип работы прибора соответствует работе приборов структуры L_3C_0.

Прибор мод. Etalon Laser TRACER имеет допустимую погрешность измерения длины U= 0,2 мкм + 0,3 мкм/м (k=2, 2σ) в диапазоне 0,2 м ÷ 15 м.



а) б)

Рис. 15. Измерительный прибор мод. Etalon Laser TRACER: а) общий вид прибора, б) конструктивная схема: 1 — лазерный интерферометр, 2 — базовый эталонный шар, 3 — конструктивный элемент опоры шара.

Другим интересным примером прибора структуры L_3C_0 может быть лазерный ball bar. Он является дальнейшим развитием прибора double ball bar [14]. Прибор имеет конструкцию аналогичную прибору ф. Renishaw. В нём вместо индуктивного датчика применяется лазерный интерферометр. Этот прибор создан в University of Florida, Machine Tool Research Center (USA).

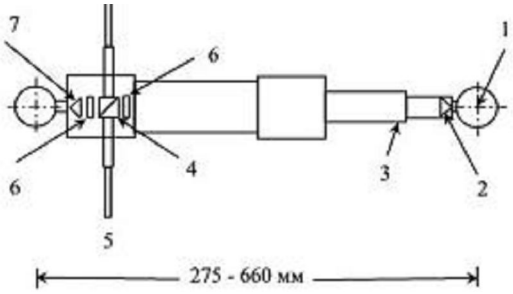
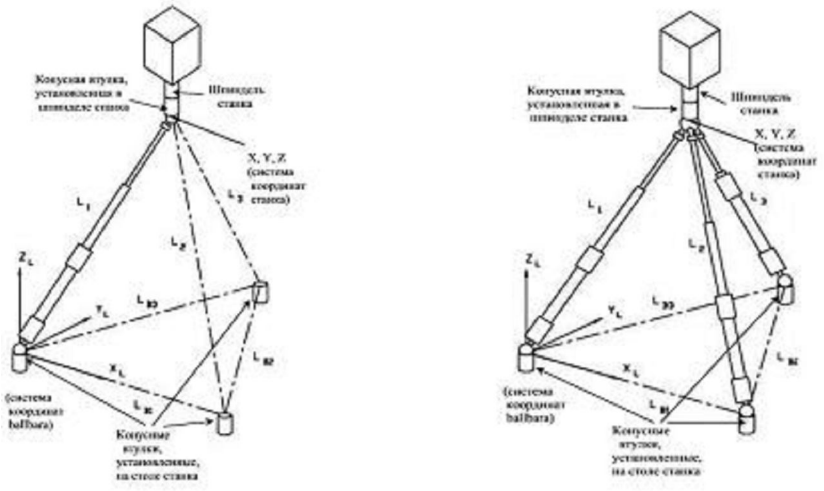


Рис. 16. Принципиальная схема прибора «лазерный ball bar»

Здесь: 1- прецизионный шар ø 25,4 мм сферического шарнира, 2 - подвижный отражатель, 3 - телескопическое соединение (трубка), 4 - поляризационный расщепитель луча, 5 - оптический кабель от лазера, 6 - «четвертьволновая фазовая» пластинка, 7 - неподвижный отражатель, 8 - оптический кабель к интерферометру.

С помощью прибора «лазерный ball bar» можно измерять точность позиционирования в пространстве (ΔX, ΔY, ΔZ). При этом используется схема измерения, представленная на рис. 17, а). Ранее эта схема измерений была предложена в работах [15-16] для аттестации точности роботов (подробное описание представлено в [17]). Процедура измерения включает в себя последовательное определение расстояний L_1, L_2, L_3 и последующее вычисление отклонений в точке позиционирования с использованием точных (калибровочных) значений расстояний L_{b1}, L_{b2}, L_{b3}. Метод трилатерации развит в работах [18-19].

Эта же схема измерений может использоваться для оценки точности воспроизведения траектории движения исполнительного органа станка (рис. 17, а).



а) б)

Рис. 17. Схемы измерений с помощью прибора «лазерный ball bar»: а) схема измерения с помощью прибора с одним лазерным интерферометром, б) схема измерения с тремя лазерными интерферометрами (модифицированный прибор).

Однако при этом не удается достигнуть требуемой точности измерений. Неточность возникает в результате существенной нестабильности начальных условий последо-

вательных прогонов движения по траектории при установке прибора для измерений расстояний L_1, L_2, L_3. Для повышения точности измерений был предложен модифицированный прибор с одновременным использованием 3-х лазерных интерферометров.

В работе [20-21] представлены результаты теоретических и экспериментальный исследований точности воспроизведения пространственной траектории движения на станке с ЧПУ с использованием прибора «лазерный ball bar». Результаты экспериментальных исследований говорят о «микронном» уровне точности измерений воспроизведения пространственной траектории.

На рис. 18 представлена структурная схема механизма модифицированного прибора «лазерный ball bar».

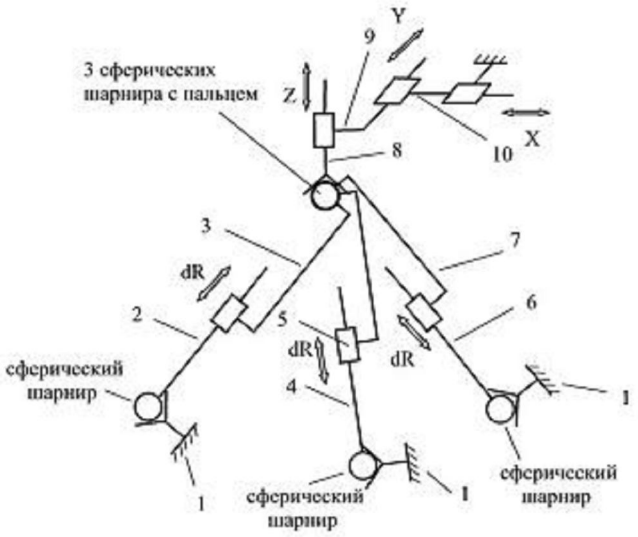


Рис. 18. Структурная схема механизма модифицированного прибора «лазерный ball bar».

Здесь: 1- стол, на котором установлены конусные втулки, 2, 4 , 6 – прецизионные шары со штоками, телескопически связанные с другими прецизионными шарами со штоками 3, 5, 7, входящими в совмещённый сферический шарнир с пальцем, 8 – конус, устанавливаемый в шпиндель станка и соединяемый с совмещённым сферическим шарниром с пальцем по средством магнита, 8, 9, 10 – привода станка по координатам X, Y, Z.

Механизм прибора имеет 3 степени подвижности.

$W = 6 \cdot 9 – (5 \cdot 6 + 4 \cdot 3 + 3 \cdot) = 54 – 51 = 3,$

$n = 9$ - число подвижных звеньев,

$p_1 = 6$ - число кинематических пар с 1 степенью подвижности (поступательные пары),

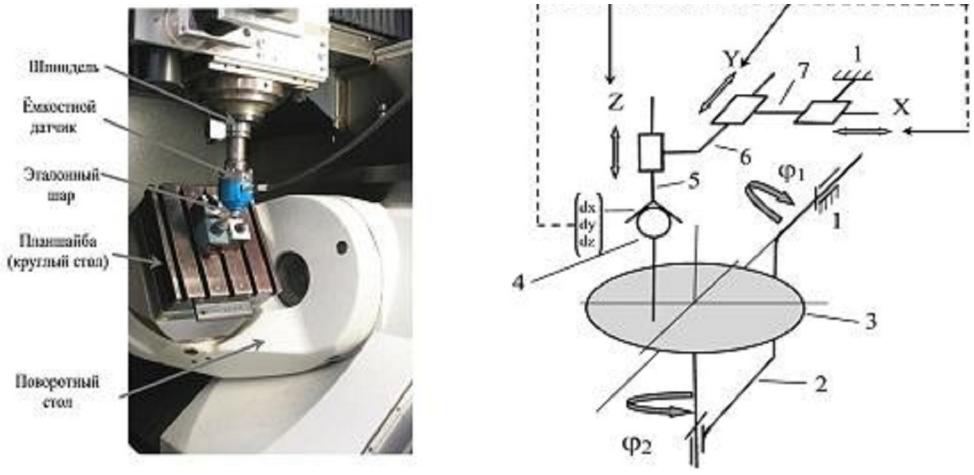
$p_3 = 3$ - число кинематических пар с 3 степенями подвижности (сферический шарнир),

$p_2 = 3$ - число кинематических пар с 2 степенями подвижности (сферический шарнир с пальцем),

$p_4 = p_5 = 0$.

Три степени подвижности прибора соответствуют 3 степеням подвижности несущей системы станка с линейными координатами X, Y, Z. Соединение станка и прибора осуществляется через совмещенный сферический шарнир с пальцем (три в одном).

К этой же схеме L_3C_0 приводится и устройство, предложенное ф. IBS Precision Engineering и ф. Lion Precision (Netherlands) [23], предназначенное для оценки точностных параметров поворотных столов 5 координатных станков. На рис. 19, а) представлен общий вид устройства, а на рис. 19, б) его структурная схема: 1- станина, 2 – корпус планшайбы, 3 – планшайба, 4 –образцовый шар, 5 - ёмкостной датчик МТР-003, установленный в шпинделе, 6 – привод по Y, 7 – привод по X.



а) б)

Рис. 19. Устройство для оценки точностных параметров поворотных столов 5 координатных станков: а) общий вид устройства, установленного на станке, б) структурная схема устройства при его взаимодействии со станком .

Процедура использования указанного устройства является следующей:

I) Рассчитывается траектория движения центра образцового шара в системе координат (X, Y, Z) при ведущих движениях φ_1, φ_2 планшайбы (ось C) и поворотного стола (ось B), исходя из номинального положения осей C и B и номинального положения центра шарика относительно планшайбы.

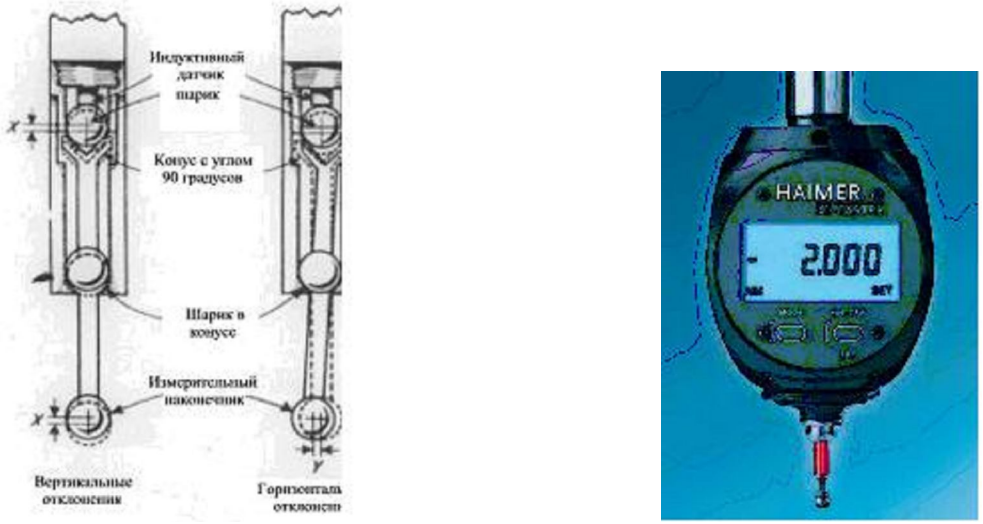
II) Движение шпинделя с ёмкостным датчиком осуществляется с помощью приводов линейных координат (X, Y, Z) по сигналу, снимаемому с ёмкостного датчика, в соответствии с алгоритмом, «направленным» на уменьшение сигнала с ёмкостного датчика. Движение проводится в режиме слежения, аналогично тому, как это осуществляется в КИМ ф. ZEISS [24-25]. Ведущей координатой является одна или две (взаимосвязанные) поворотные координаты.

III) Действительная траектория движения центра шарика определяется из текущих координат (X, Y, Z) (сигналы с датчиков обратной связи приводов по линейным координатам X, Y, Z) и отклонений (dX, dY, dZ), снимаемых с ёмкостного датчика.

IV) Отклонения действительной траектории движения центра шарика от номинальной траектории являются исходной информацией для расчёта отклонений действительного расположения осей C и B в системе координат (X, Y, Z).

Приборы, реализующие способ измерения с применением образцовой детали. Сразу после появления станков с ЧПУ (1960-е годы) возникла острая необходимость иметь средст-

ва измерения деталей, обрабатываемых на них. Одна из идей, возникшая в то время, состояла в использовании для целей измерения того же самого станка, на котором проводится обработка детали [26].



а) б)

Рис. 20. Модульные измерительные головки: а) измерительная головка (E.I.D.) размерности $2^1/_2$ [26], измерительная головка Digitaler 3D – Taster [27] .

Для измерения на станке отклонений обработанной поверхности (контура) тогда использовалась модульная головка, представленная на рис. 20, а). Если вместо обработанной детали установить образцовую деталь (artefakt), то данная схема измерения и прибор - модульная головка, могут использоваться для измерения отклонений воспроизведения эталонной траектории на станке с ЧПУ. Такой подход был использован для исследования точности воспроизведения траектории на координатной измерительной машине мод. КА-50 с ЧПУ [28].

Следует отметить, что описанный способ и устройство приводятся как альтернатива прибору «double ball bar» в ГОСТ 30544-97 «Методы проверки точности и постоянства отработки круговой траектории».

Однако модульные головки имеют недостаточную точность для оценки точности воспроизведения траектории современных станков класса точности П и выше. Так, модульные головки мод. Digitaler 3D – Taster ф. Haimer GmbH (Germeny) имеет допустимую погрешность измерения – 0,005 мм. В качестве прибора сравнения наряду с модульными головками могут применяться компонентные головки [25, 29].

5. Оценка объёмной точности станка измерением «следа действительной траектории» на обработанной поверхности.

Обработанная поверхность есть «слепок» процессов, происходящих в системе «Станок – приспособление – инструмент - деталь». Относительные перемещения режущего инструмента и обрабатываемой детали непосредственно оставляют «след» на обработанной поверхности. Если эти перемещения имеют колебательный характер, то «след» называют «вибрационным». Если заготовки тестовых деталей сделаны из легко обрабатываемого материала (алюминиевые сплавы) и имеют жесткую конструкцию и режущий инструмент хорошо заточен и имеет жесткую конструкцию, то на обрабатываемую поверхность будут, в основном, переноситься относительные перемещения «шпиндель – рабочий стол». В этом случае, по «следу» на обработанной поверхности можно оценивать отклонения действительной траек-

тории движения ИО станка от номинальной (заданной). «След» несёт информацию, как о статических, так и динамических свойствах станка. На рис. 21 приведен «след» обработки

тестовой детали на станке «Гексамех-1» [30-31]. Представленные профилограммы получены на контурографе мод. Mar Surf XC-10.

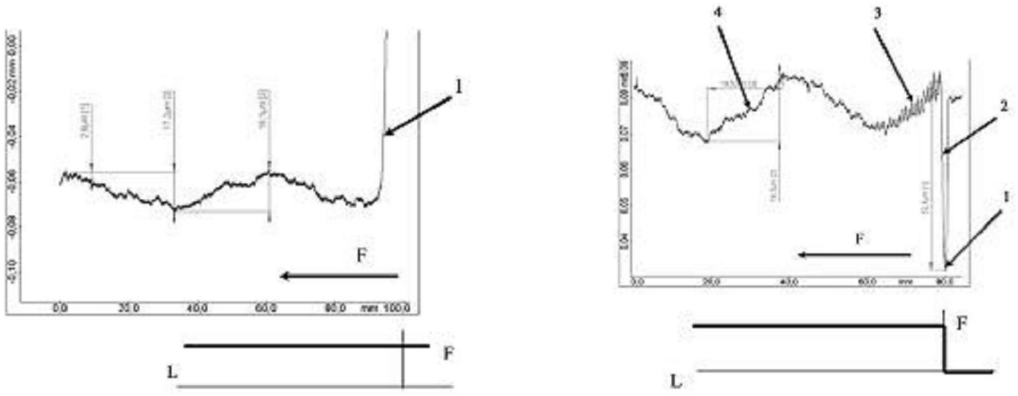
С помощью профилограмм можно оценить отклонения действительной траектории от номинальной с допускаемой погрешностью ≤ 1 мкм. В нашем случае четко видны:

1. Волнообразное отклонение от прямолинейности с амплитудой 17-18 мкм и шагом ≈ 40 мм.

2. Величина «зареза» (статические деформации в системе СПИД — разница между участком поверхности, где инструмент стоит и участком, где осуществляется движение инструмента) — 52 мкм

3. Затухающие (свободные) колебания платформы Гауфа — Стюарта с частотой 15 - 17 Гц и начальной амплитудой ≈8 мкм.

Таким образом, измерение обработанной поверхности является хорошим инструментом для определения отклонений действительной траектории движения инструмента от номинальной.



а) б)

Рис. 21. Профилограмма поверхности, обработанной с подачей: а) F = 540 мм/мин и S = 6000 об./мин, при «плавном» врезании 1, F – направление подачи; б) F = 720 мм/мин и S = 6000 об./мин, при «ступенчатом» нарастании подачи: 1- выстой, 2- участок разгона, 3- участок свободных затухающих колебаний, 4 - участок с установившимся движением, F – направление подачи

В работе [32] отмечается, что в целях грубого сравнения точностных характеристик станков с программным управлением целесообразно принять в качестве простейших типовых траекторий (профилей) окружность и квадрат. В настоящее время указанные профили обязательно входят в форму образцов-изделий, по которым осуществляются испытания станков с ЧПУ под нагрузкой. (ГОСТ 25443-82 Станки металлорежущие. Образцы-изделия для проверки точности обработки. Общие технические требования).

Для целенаправленного исследования влияния динамики приводов на действительную траекторию движения исполнительных органов станка в работе могут использоваться специальные траектории, разработанные в [32]. Отклонения от этих траекторий легко могут быть измерены на контурографе мод. Mar Surf XC-10 с учетом ограничений по габаритам образца-изделия и рабочего поля прибора 50x120 мм.

6. Выводы.

1. Существует большое разнообразие методов и средств оценки «объёмной» точности многокоординатных станков.

2. Наиболее развиты и широко применяются в промышленности методы и средства измерения отклонений действительной траектории, расположенной в плоскости (приборы ballbar и Grid Encoders KGM).

3. Наблюдается большое разнообразие приборов для измерения отклонений воспроизведения эталонных траекторий в пространстве. Однако среди них мало таких, которые широко применяются в промышленности.

4. Способ измерения отклонений действительной траектории от номинальной в пространстве, основанный на использовании прибора Tracer (L_1C_2) , нашел применение в станкостроении для аэрокосмической промышленности и тяжелого машиностроения.

5. Прибор Etalon laser TRACER, родившийся из идеологии приборов Tracer (L_1C_2), по существу является прибором структуры (L_3C_0) и имеет широкие перспективы для измерений первичных отклонений механизмов станков и их калибровки.

6. Способ измерения отклонений действительной траектории от номинальной в пространстве, основанный на измерении « следа» на обработанной поверхности, является простым и универсальным, но трудоёмким.

Литература

1. Серков Н.А., Никуличев И.В. Методы и средства измерения первичных отклонений механизмов многокоординатных станков с ЧПУ // «Вестник научно-технического развития» - 2012. - № 2(54)). – С. 30-44. [Электронный ресурс] URL: http:// www.vntr.ru (дата обращения: 19.02.2012).

2. Серков Н.А. Модель отклонения взаимного положения исполнительных органов многокоординатного станка//Проблемы машиностроения и надёжности машин – 2011. - № 3. - С.- 68-78.

3. McKeown PA.,Loxham J (1973) Some Aspects of The Design of High Precision Measuring Machines. Annals of the CIRP 22(1).

4. Проников А.С. Программный метод испытания металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1985.-288с., ил.

5. Саламандра Б.Л., Серков Н.А.: К оценке эффективности систем повышения точности обработки на металлорежущих станках//Машиноведение - 1972. - № 5. – С. 23-30.

6. Руководство по эксплуатации прибора оценки точности отработки окружности. QC 10 ballbar user guide. Ballbar 5 YPS software. Version 5.06. Renishaw plc.

7. [Электронный ресурс] http://www.heidenhain.com/en_US/services-and-documentation /documentation-information/brochures/setup-and-measurement/+pdf. Measuring Systems For Machine Tool Inspection and Acceptance Testing. (September 2007) (дата обращения: 19.02.2012).

8. [Электронный ресурс] http://www.optodyne.com/opnew4/tech4.html (дата обращения: 19.02.2012).

9. HiroakiIwai , KimiyukiMitsui. Development of a measuring method for motion accuracy of NC machine tools using links and rotary encoders. International Journal of Machine Tools & Manufacture 49 (2009), Pages 99–108.

10. Koichiro Iwasawa, Akito Iwama and Kimiyuki Mitsui. Development of a measuring method for several types of programmed tool paths for NC machine tools using a laser displacement interferometer and a rotary encoder. Precision Engineering. Volume 28, Issue 4, October 2004, Pages 399-408.

11. Leica Absolute Tracker -AT 401 – ASME Specifications_en.pdf [Электронный ресурс] http://www.leica-geosystems.com/en/Leica-Absolute-Tracker-AT401_81625.htm (дата обращения: 19.02.2012).

12. XD LASER MEASUREMENT SOLUTION [Электронный ресурс] http://www.apisensor.com (дата обращения: 19.02.2012).

13. Presentation – Etalon – en 0912[1].pdf [Электронный ресурс] http:// www.etalon-ag.com (дата обращения: 19.02.2012).

14. Ziegert, J.C. and Mize, C.D. Laser Ball Bar: A Precision Instrument for Machine Tool. Metrology. Precision Engineering, Volume 16, Issue 4, October 1994, Pages 259-267.

15. Колискор А.Ш. Разработка и исследование промышленных роботов на основе l – координат// Станки и инструмент. - 1982. - № 12. - С. 21-24.

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

17. Корендясев А.И., Саламандра Б.Л., Тывес Л.И. Теоретические основы робототехники/Отв. ред. С.М. Каплунов/В двух книгах. - Ин-т машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. - М.: Наука. - Кн.1. 2006 – 383 с. - Кн.2. 2006 – 376 с.

18. Canning, J.S., Ziegert, J., and Schmitz, T., 2005, Uncertainty of Spatial Coordinate Measurements Using Trilateration, Transactions of NAMRI/SME, 33: 121-128.

19. J. Suzanne Canning, John C. Ziegert, Tony L. Schmitz. Coordinate metrology uncertainty using parallel kinematic techniques, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Volume 47, March 2007, Pages 658-665.

20. Schmitz, T. and Ziegert, J. Premachining CNC Contour Validation, Precision Engineering. Volume 22, Issues 1, 1998, Pages 10-18.

21. Kulkarni, Rajeev. "Design and Evaluation of a Technique to Find the Parametric Errors of a Numerically Controlled Machine Tool Using a Laser Ball Bar," M.S. Thesis, University of Florida, Gainesville, FL, 1996.

22. Tony Schmitz and John Ziegert Dynamic evaluation of spatial CNC contouring accuracy. Precision Engineering, Volume 24, Issue 2, April 2000, Pages 99-118.

23. Benes J. Five-axis Accuracy. A quick, easy-to-use technique accurately analyzes 5-axis errors/ American Machinist, February, 2009, p. 43-44.

24. Ertl F. und Lenz K. J. Beschreibung und rechnerunterstützte Korrektur der Fehler von mehrachsigen Maschinen. Feinwerktechnik und Messtechnik 85 (1977), № 6, s. 239-243.

25. Координатные измерительные машины и их применение/ В.-А.А. Гапшис, А.Ю. Каспарайтис, М.Б. Модестов, В.-З.А. Раманаускас, Н.А.Серков, В.А. Чудов. - М.: Машиностроение, 1988. - 328 с., ил.

26. Elton H.J., Munroe F.E.: A numerically controlled measuring machine/Control, Feruary, 1963, p. 71-75.

27. [Электронный ресурс] http://www.haimer.de/deutsch/taster-digital.php (дата обращения: 19.02.2012).

28. Кобринский А.Е., Саламандра Б.Л. Серков Н.А и Степанцев Б.М: Измерительные машины с ЧПУ для адаптивных систем управления станками//Станки и инструмент. - 1974.- № 8. - С. 37-39.

29. Kochsick M., Kunzman H., Lüdicke F. : Entwicklung und Untersuchung eines inductiven Drei-Koordinaten-Wegaufnehmers//Feinwerktechnik und Meβtechnik, 1975, Jg. 83, № 5, S.209-213.

30. Мерзляков А.А., Серков Н.А., Сироткин Р.О. Экспериментальные исследования динамических свойств станка с параллельной кинематикой //Проблемы машиностроения и надёжности машин – 2008. - № 1. - С.98-102.

31. Вайнштейн И.В., Серков Н.А., Сироткин Р.О., Мерзляков А.А. Экспериментальные исследования жесткости 5-ти координатного станка с параллельной кинематикой//СТИН, 2009. - № 1. - С.6-11.

32. Андрейчиков Б.И. Динамическая точность систем программного управления станками.- М.: Машиностроение, 1964. – 368 с., ил.

Поступила: 01.02.12.