

**Ключевые слова:**

5-координатные станки ЧПУ, управляемые координаты, угловые координаты, поворотный стол, шпиндель, планшайба

Keywords:

5-axis CNC machine, operated coordinates, angular coordinates, rotary table, spindle, face-plate

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ 5-КООРДИНАТНЫХ СТАНКОВ С ЧПУ И ВОПРОСЫ ЮСТИРОВКИ ПОВОРОТНЫХ СТОЛОВ

Николай СЕРКОВ, Илья ШЛЕСБЕРГ

Приведена классификация многокоординатных станков в зависимости от места расположения механизмов поворота. Представлен краткий обзор 5-координатных станков с ЧПУ. Рассмотрена методика юстировки «непересечения» осей поворота глобусного стола 5-координатного станка.

The article provides classification of multi-axis machine tools depending on the location of the rotation mechanism. It briefly overviews the 5-axis CNC machine tools. It considers the method of conducting inspections of 5-axis machines on geometric precision of the angular coordinates at idle.

ВВЕДЕНИЕ

Ключевыми направлениями импортозамещения в машиностроении являются: многокоординатная обработка, ультрапрецизионное оборудование, тяжелые станки, металлообрабатывающий инструмент.

Эффективная обработка сложных поверхностей ответственных деталей: рабочих колес турбин, винтовых пар насосов, гребных винтов, прессформ и др. – возможна лишь при взаимосвязанном относительном движении инструмента и заготовки по пяти координатам.

ОСНОВНЫЕ СТРУКТУРЫ 5-КООРДИНАТНЫХ СТАНКОВ С ЧПУ

Как правило, 5-координатные станки с ЧПУ имеют три линейные и две угловые координаты. Вопросы, относящиеся к основным компоновкам станка и связанные с расположением линейных координат, к настоящему времени изучены дос-

таточно хорошо и представлены в ГОСТ 30027-93. Подробнее следует рассмотреть классификацию многокоординатных станков в зависимости от места расположения механизмов поворота. В станке механизмы поворота воздействуют либо на корпус шпинделя, разворачивая ось вращения шпинделя, либо на стол с приспособлением для обрабатываемой детали. В соответствии с этим признаком можно выделить основные структуры многокоординатных станков, которые представлены в таблице, где каждая из приведенных групп имеет соответствующую маркировку:

- на первом месте – число управляемых координат (5К – пять координат);
- сокращение от «Станок» – СТ;
- первая цифра внизу – число угловых координат, реализуемых через движение стола с приспособлением для обрабатываемой детали;
- вторая цифра внизу – число угловых координат, реализуемых через движение корпуса шпинделя.

Таблица. Основные структуры многокоординатных станков

		Число угловых координат, реализуемых через движение корпуса шпинделя		
		0	1	2
Число угловых координат, реализуемых через движение стола с приспособлением для обрабатываемой детали	0	3-координатный станок с тремя линейными координатами 3КСТ _{0,0}	4-координатный станок с тремя линейными координатами и одной угловой координатой 4КСТ _{0,1}	5-координатный станок с тремя линейными координатами и двумя угловыми координатами 5КСТ _{0,2}
	1	4-координатный станок с тремя линейными координатами и одной угловой координатой 4КСТ _{1,0}	5-координатный станок с тремя линейными координатами и двумя угловыми координатами 5КСТ _{1,1}	6-координатный станок с тремя линейными координатами и тремя угловыми координатами 6КСТ _{1,2}
	2	5-координатный станок с тремя линейными координатами и двумя угловыми координатами 5КСТ _{2,0}	6-координатный станок с тремя линейными координатами и тремя поворотными координатами 6КСТ _{2,1}	7-координатный станок с тремя линейными координатами и четырьмя поворотными координатами 7КСТ _{2,2}

Рассмотрим последовательно примеры трех типов 5-координатных станков с ЧПУ: 5КСТ_{2,0}, 5КСТ_{1,1}, 5КСТ_{0,2}.

Станки группы 5КСТ_{2,0}. В этой группе механизмы поворота воздействуют на стол с приспособлением для обрабатываемой детали. Характерным примером этой группы является станок модели МС 300 (ОАО НИАТ) рис. 1 [1]. На рис. 1а показано расположение управляемых координат, а на рис. 1б – общий вид станка. Здесь поворотные узлы координат В и С присоединяются консольно к станине, а оси поворота располагаются под углом 90°.

Эта несложная консольная конструкция поворотного стола широко используется в прецизионных 5-координатных многоцелевых станках с ЧПУ класса точности А и выше с малыми рабочими объемами (400×400×400 мм). Для поворотных столов больших размеров и большей грузоподъемности используются двухопорные конструкции типа «люлька», обладающие повышенной жесткостью (рис. 1в) [2].



Рис. 1. Схемы расположения управляемых координат в 5-координатных станках группы 5КСТ_{2,0}: а – схема компоновки станка модели МС 300, б – общий вид станка модели МС 300, в – станок модели FSP 300X ф. Moore Tool Company, Inc. с поворотным столом типа «люлька»

Станки группы 5КСТ_{1,1}. Для обработки деталей средних размеров, требующих рабочего объема более 1000×1000×1000 мм, чаще применяются 5-координатные станки группы 5КСТ_{1,1}, которые конкурируют со станками группы 5КСТ_{2,0}, оснащенными глобусными столами. Характерным представителем станков группы 5КСТ_{1,1} является станок модели STC 800 – 5-координатный обрабатывающий центр (рис. 2) [3].

Станки группы 5КСТ_{0,2}. Станки этой группы предназначены для обработки длинномерных деталей, в основном – в авиационной промышленности. Характерным примером является станок модели MAG U5 (Группа MAG, Cincinnati, США) [4], представленный на рис. 3а. На рис. 3б отдельно показана поворотная головка, несущая шпиндель и реализующая две угловые координаты.

Представленный обзор 5-координатных станков с ЧПУ показывает их большое разнообразие, которое обуславливается разноплановостью технологических задач в различных отраслях маши-

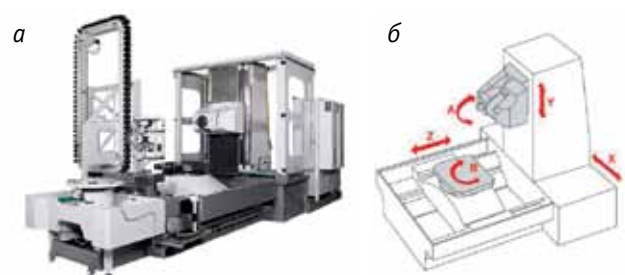


Рис. 2. Станок группы 5КСТ_{1,1} модели STC 800: а – общий вид, б – расположение управляемых координат

ностроения. Представленная классификация 5-координатных станков с ЧПУ помогает ориентироваться в многообразии конструкций и выявлять общие трудности создания станков различных групп.

Обеспечение необходимой «объемной» точности 5-координатных станков при их изготовлении и эксплуатации является важной задачей, решению которой посвящено большое число теоретических и экспериментальных исследований.

Современные системы CAD/CAM позволяют генерировать траекторию движения исполнительных органов станка с практически неограниченной точностью: например, с погрешностью аппроксимации порядка 0,00005 мм [5]. Однако в настоящее время получить на станке указанную точность воспроизведения траектории в реальности не удастся. Так, одна из ведущих станкостроительных фирм DIXI для 4- и 5-координатных станков моделей DHP 50 и DHP 80 гарантирует точность позиционирования по одной координате в пределах 0,99 мкм, но, по данным americanmachinist.com [6], точность в объеме 3D для 4-координатного станка той же фирмы DIXI составляет 15 мкм, а для 5-координатных станков – уже 25 мкм.

Объемная точность 5-координатных станков с ЧПУ нормируется ГОСТ 30027-93 «Модули гибкие производственные и станки многоцелевые сверльно-фрезерно-расточные. Нормы точности».

На рис. 4 представлена схема станка модели MC 300, на которой приведены системы координат отдельных подсистем несущей системы (НС) станка. Интегральное отклонение взаимного положения исполнительных органов станка (шпинделя –

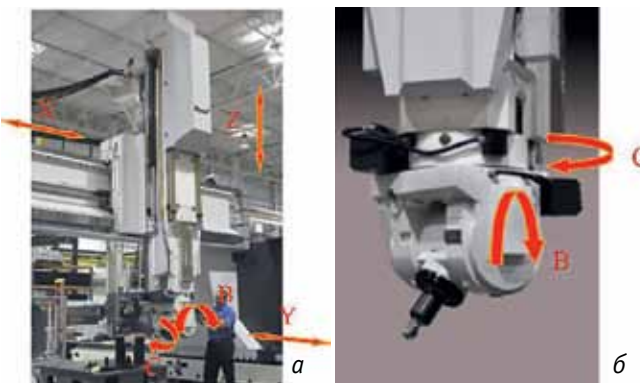


Рис. 3. Станок группы 5KCT_{0,2} модели MAG U5: а – общий вид станка и расположение управляемых координат, б – общий вид поворотной головки, несущей шпиндель и установленной на станке модели MAG U5

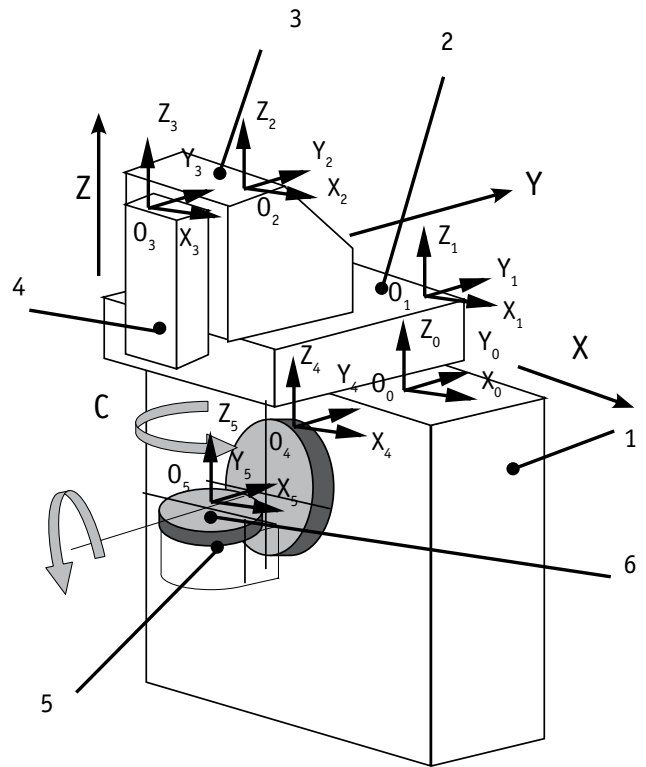


Рис. 4. Схема соединения подсистем несущей системы станка: 1 – станина, 2 – салазки, 3 – стойка, 4 – шпиндельная бабка, 5 – корпус планшайбы, 6 – планшайба

/X₃, Y₃, Z₃/ и планшайбы – /X₅, Y₅, Z₅/) складывается из первичных отклонений движений всех приведенных подсистем НС станка. Последовательная цепочка от станины к шпинделю состоит из трех подсистем:

- станина (X₀, Y₀, Z₀) + салазки (X₁, Y₁, Z₁);
- салазки (X₁, Y₁, Z₁) + стойка (X₂, Y₂, Z₂);
- стойка (X₂, Y₂, Z₂) + шпиндельная бабка (X₃, Y₃, Z₃).

Последовательная цепочка от станины к планшайбе, несущей обрабатываемую деталь, состоит из двух подсистем:

- станина (X₀, Y₀, Z₀) + корпус планшайбы (X₄, Y₄, Z₄);
- корпус планшайбы (X₄, Y₄, Z₄) + планшайба (X₅, Y₅, Z₅).

Первичные отклонения звеньев и кинематических пар в механизмах подсистем регламентируются нормами точности на изготовление станка. Требуемая точность станка достигается как технологией изготовления деталей, так и технологией сборки узлов и станка в целом. В настоящее время при сборке станка для достижения необходимой точности широко используются

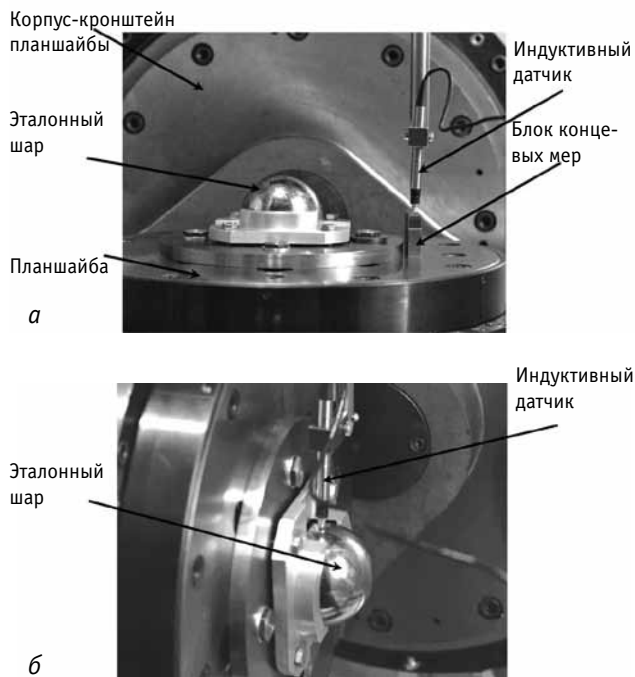


Рис. 5. Общий вид приспособления для измерения величины «непересечения» осей *C* и *B*: *a* – при горизонтальном положении планшайбы, *б* – при вертикальном положении планшайбы

различные методы коррекции первичных отклонений [7], например через систему ЧПУ [8]. Для проведения коррекции необходимо измерять первичные отклонения с помощью хорошо развитых методов и средств измерения (ГОСТ 22267-98). Современные средства измерения, используемые для целей проведения коррекции в 5-координатных станках, обобщены и описаны в работе [9].

Наличие двух угловых координат в 5-координатных станках требует проведения отдельных проверок на геометрическую точность на холостом ходу:

- измерения отклонений «непересечения» осей поворота;
- измерения отклонений от перпендикулярности осей поворота;
- привязки осей поворота к линейным координатам.

Для станков группы 5КСТ_{2.0} в ИМАШ РАН совместно с ОАО НИАТ разработана методика измерения и изготовлено устройство для юстировки «непересечения» осей вращения планшайбы (ось *C*) и оси вращения корпуса планшайбы (ось *B*). На рис. 5 показан общий вид приспособления при горизонтальном и вертикальном расположении планшайбы.

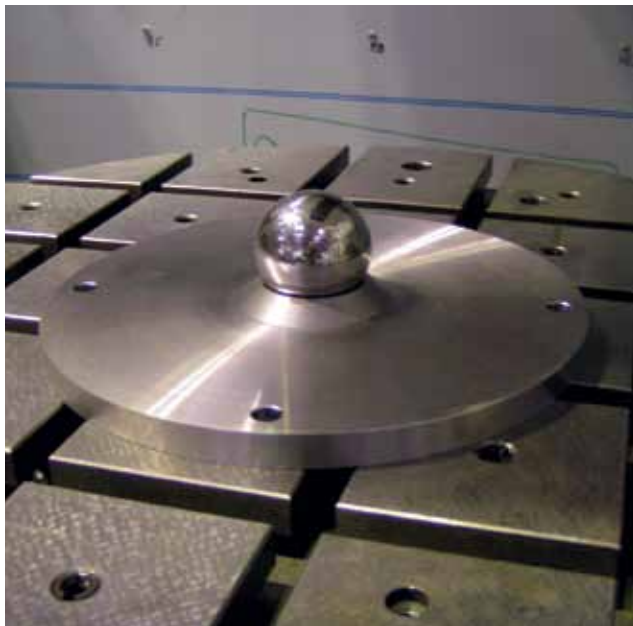


Рис. 6. Крепление эталонного шара с помощью постоянного неодимового магнита

Эталонный шар выставляют так, чтобы ось поворота планшайбы проходила через центр шара. Это достигается путем вращения планшайбы (ось С) с периодическим отслеживанием показаний индуктивного датчика приспособления с эталонным шаром.

Далее, поворачивая корпус планшайбы вокруг оси В на 90° и -90° , можно по показаниям датчика линейных перемещений, касающегося поверхности эталонного шара в самой верхней ее точке, определить отклонение «непересечения» осей δ_x вдоль оси Х:

$$\delta_x = (a_{+90^\circ} - a_{-90^\circ})/2,$$

где a_{+90° – показания датчика при повороте корпуса планшайбы на 90° , a_{-90° – показания датчика при повороте корпуса планшайбы на -90° .

В конструкции станка модели МС 300 предусмотрены регулировочные винты для смещения корпуса планшайбы в направлении оси Х. Эта процедура носит итерационный характер и проводится до тех пор, пока величина δ_x не станет меньше заданного допуска. Итерационный характер процедуры обусловлен контактными деформациями сопрягающихся поверхностей при затяжке крепежных винтов.

Положение корпуса датчика по координате Z корректируется в соответствии с оставшейся величиной δ_x , и данные индуктивного датчика обнуляются. Положение корпуса датчика в направлении оси Z не должно изменяться при выполнении последующей процедуры итерационного процесса.

Следует отметить, что ось В может лежать на «зеркале» планшайбы с отклонением, регламентированным допуском на «непересечение». Регулировка положения планшайбы в направлении оси Z осуществляется с помощью регулировочных винтов по результатам измерения δ_z блока концевых мер, набранного на размер радиуса эталонного шара R и устанавливаемого на зеркало планшайбы в соответствии с рис. 5.

В настоящее время разработано аналогичное устройство, в котором крепление шара с помощью резьбовых соединений заменено на крепление с помощью постоянного неодимового магнита (рис. 6). Такая конструкция устройства облегчает доступ к поверхности эталонного шара и упрощает процедуру юстировки поворотного стола.

ЛИТЕРАТУРА

1. Многокоординатный обрабатывающий центр модели МС-300. <http://www.niat.ru/data/org/1429224423/1429809598/1429809796/1450013742>.
2. FSP high speed machine system, Moore Tool Company, Inc. http://mooretool.com/pdf/F_1633.pdf
3. STC 800 – 5-axis machining center <https://www.starrag.com/en-us/machine-361/stc-series-1/stc-800130-6>
4. U5 1500 Rail - type - Features and Benefits https://www.hillaryinc.com/index_htm_files/u5.pdf
5. In the pursuit of 5-axis precision. American Machinist. 2010. № 2. <http://americanmachinist.com/cadcam-software/pursuit-5-axis-precision>
6. Accuracy Drives Machine Tools. <http://americanmachinist.com/machining-cutting/accuracy-drives-machine-tools>
7. **Серков Н.А.** Точность многокоординатных машин с ЧПУ: Теоретические и экспериментальные основы. М.: ЛЕНАНД, 2015. 304 с.
8. SINUMERIK 840D/840Di/810D / Extended Functions. 840D_FB2.pdf // [сайт]. https://support.industry.siemens.com/cs/attachments/108605870/FB2_0306_en.pdf?...
9. **Schwenke H., Knapp W., Haitjema H., Weckenmann A., Schmitt R. and Delbressine F.** Geometric error measurement and compensation of machines-An update. CIRP Annals – Manufacturing Technology. 2008. Vol. 57. Is. 2. P. 660–675.

СЕРКОВ Николай Алексеевич –

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ИМАШ РАН

ШЛЕСБЕРГ Илья Семенович –

заместитель генерального директора ОАО НИАТ