



Ключевые слова:
ЧПУ, калибровка,
точность позиционирования,
диагностика точности станка

ЭЛЕМЕНТЫ КАЛИБРОВКИ И ДИАГНОСТИКИ ТОЧНОСТИ ПРИ СБОРКЕ 5-КООРДИНАТНОГО СТАНКА С ЧПУ

Николай СЕРКОВ

Предложена методика диагностики точности 5-координатного станка с ЧПУ на базе назначения «нормы» точности позиционирования для оценки возможности проведения коррекции без дополнительных мероприятий. Рассмотрен алгоритм действий при превышении измеренными параметрами точности установленных норм коррекции.

ВВЕДЕНИЕ

По прогнозам Минпромторга, уже через 3–4 года будет введено в строй около 100 крупных предприятий. Доля российских станков с числовым программным управлением (ЧПУ) на внутреннем рынке увеличится с 10 до 33% [1].

В системах управления ЧПУ получают широкое развитие методы коррекции, основанные на измерении первичных отклонений механизмов несущей системы (НС) станка и внесении коррекции в траекторию движения в реальном масштабе времени через интерполятор системы ЧПУ. Коррекция обрабатывается совместно с номинальными перемещениями через линейные и угловые приводы станка.

В современных системах управления станками (например, Siemens 840 D [2]) коррекция каждого отдельного отклонения не требует сложных вычислений и осуществляется отдельным вычислительным процессом: отклонения позиционирования по каждой линейной и угловой координате, отклонения от прямолинейности и от перпендикулярности движения по каждой линейной координате. Эти вычислительные процессы выполняются в квазипараллельном режиме и не требуют больших вычислительных ресурсов. Все коррекции, относящиеся к данной линейной координате, суммируются и обрабатываются соответствующим приводом в режиме интерполирования. По угловым координатам осуществляется только коррекция отклонений позиционирования.

Доля станков, оснащенных системами с ЧПУ и имеющих возможность коррекции первичных отклонений НС станка, неуклонно возрастает. В процессе эксплуатации станков с ЧПУ первичные отклонения НС станка изменяются в результате износа подвижных узлов, несоблюдения требований правильной эксплуатации, столкновения подвижных узлов и ряда других факторов. В связи с этим, становятся особенно важными вопросы

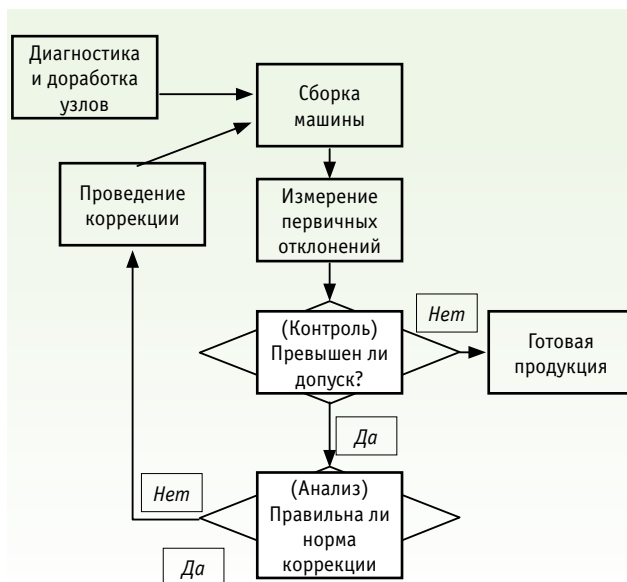


Рис. 1. Процесс калибровки станка (машины) с ЧПУ

рекалибровки (recalibration) и связанные с ними вопросы диагностики точности многокоординатных станков с ЧПУ.

АЛГОРИТМ КАЛИБРОВКИ

Опыт проведения калибровки станков с ЧПУ показывает, что процесс калибровки состоит из ряда последовательных процедур. Выполнение этих процедур поясняет блок-схема, представленная на рис. 1.

1. Принимается «норма» для параметров проведения коррекции первичных отклонений.
2. После того как станок собран и подготовлен для проведения испытаний на геометрическую точность на холостом ходу, осуществляется измерение первичных отклонений.
3. Измеренные отклонения сравниваются с допуском (приемочным допуском) на изготовление станка. Если все отклонения не превышают допуски, то станок считается годным, и происходит переход к другим видам испытаний. Полученные результаты измерений первичных отклонений фиксируются и вносятся в документ (руководство, паспорт), прилагаемый к данному экземпляру станка. Эти данные могут использоваться при эксплуатации станка и рекалибровке.
4. В противном случае, когда допуск на изготовление станка превышен, осуществляется анализ степени превышения допуска и характера поведения измеренного отклонения. Если измеренные отклонения не выходят за рамки установленных «норм» проведения коррекции, то осуществляется процедура коррекции, и сно-

ва проводится измерение первичных отклонений. Эта процедура повторяется до тех пор, пока не будет достигнуто условие годности машины.

5. Если измеренные первичные отклонения превышают рамки установленных «норм» на проведение коррекции, то проводится диагностика причины выхода за рамки «норм».
6. После установления причины проводится ее устранение (разборка, замена, юстировка и др.), и процесс калибровки повторяется до тех пор, пока не будет достигнуто условие годности станка.

УСТАНОВЛЕНИЕ «НОРМ» НА ПРОВЕДЕНИЕ КОРРЕКЦИИ

Одним из основных элементов построения методики диагностирования точности 5-координатного станка с ЧПУ по результатам измерения точности позиционирования является назначение «нормы» точности позиционирования для проведения коррекции (оценки возможности проведения коррекции).

Особое внимание необходимо уделять величине случайной составляющей R и поведению отклонения обратного хода B в функции координаты позиционирования (рис. 2) [3]. На рис. 2а представлены отклонения от заданного положения позиционирования в одной точке P (при двустороннем подходе), типичные для любого подвижного исполнительного органа станка.

Здесь x_p – отклонение в точке позиционирования P , \bar{x}_p – среднее математическое ожидание откло-

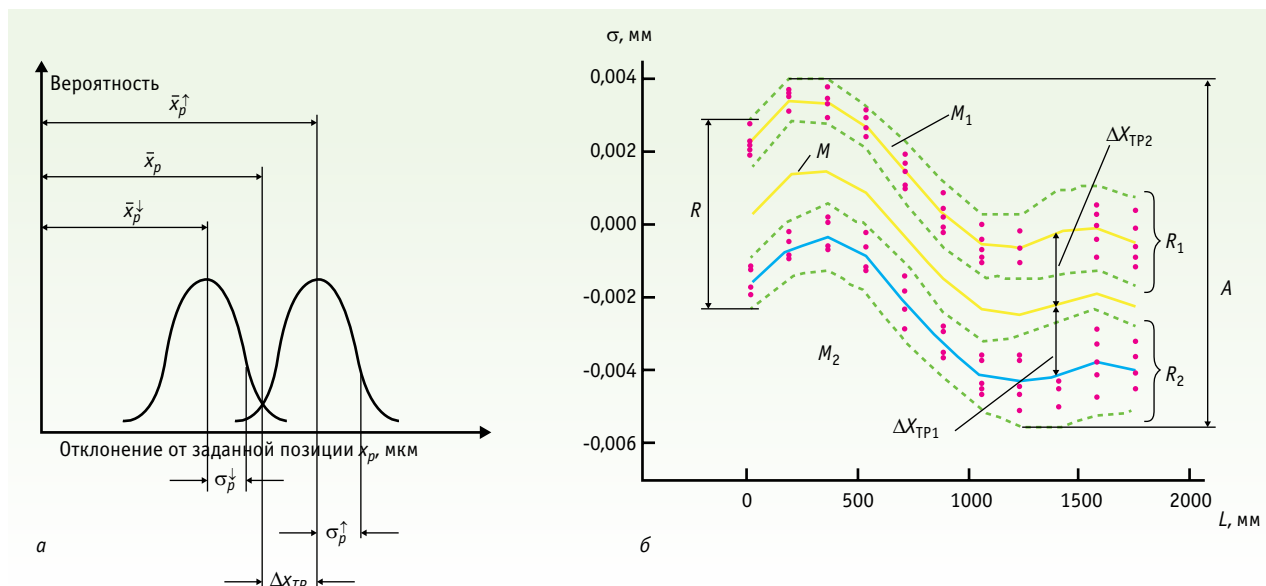


Рис. 2. Оценки точности позиционирования (при двустороннем подходе): а – позиционирование в точке P (отклонение), б – позиционирование на множестве точек, расположенных на отрезке L

Таблица 1. Показатели точности позиционирования по координатам X, Y, Z, C и B, которые можно использовать в качестве нормы для проведения коррекции

Координата	Общая точность A, мкм, без корр./с корр.	Отклонение обратного хода B, мкм, без корр./с корр.	Случайная составляющая R, мкм, без корр./с корр.	Функциональная часть M, мкм, без корр./с корр.	Интервал регулирования температуры, °C
X	10,7/4,2	1,2/1,6	1,2–1,9/ 1,8–2,2	9,3/2,1	19 ± 0,1
Y	15,7/ 8,2	1,2/ 1,8	5,4–5,0/ 3,4–7,2	12,4/ 3,8	19 ± 0,1
Z	–17,3/6,2	2,4/1,8	2,4–3,2/ 3,6–4,8	14,8/1,2	19 ± 0,1
C	5,8/	1,2/	2,6–3,5/	2,7/	19 ± 0,1
B	28,5/8,3	3,2/2,4	1,6–1,8/ 4,0–3,0	26,3/3,3	19 ± 0,1

нения в точке позиционирования P, $\bar{x}_p \uparrow$ – среднее математическое ожидание отклонения в точке позиционирования P при подходе к точке справа, $\bar{x}_p \downarrow$ – среднее математическое ожидание отклонения в точке позиционирования P при подходе к точке слева, $\delta_p \uparrow$ – среднее квадратичное отклонение при подходе к точке P справа, $\delta_p \downarrow$ – среднее квадратичное отклонение при подходе к точке P слева, $\Delta x_{TP} = \bar{x}_p \uparrow - \bar{x}_p \downarrow$.

Если рассматривать отклонения от заданного положения позиционирования на множестве точек исследуемого диапазона L положений (при двустороннем подходе), то мы получаем кривые точности позиционирования (рис. 2 б). Такая оценка точности позиционирования соответствует ГОСТ 27843-2006 и ISO 230-2:1997. Здесь A – общая точность позиционирования, M – общая функциональная составляющая, M₁ – функциональная составляющая при движении в прямом направлении, M₂ – функциональная составляющая при движении в обратном направлении, R₁ – случайная составляющая при движении в прямом направлении, R₂ – случайная составляющая при движении в обратном направлении, R – общая случайная составляющая, ΔX_{TP2} – отклонение обратного хода при движении в обратном направлении, ΔX_{TP1} – отклонение обратного хода при движении в прямом направлении.

Величины \bar{x}_p , $\bar{x}_p \uparrow$, $\bar{x}_p \downarrow$ и кривые M, M₁ и M₂ характеризуют функциональную составляющую отклонения от положения точки позиционирования соответственно в одной точке и на всем диапазоне L. Напротив, величины $\delta_p \uparrow$, $\delta_p \downarrow$ и зона R, R₁ и R₂ характеризуют случайную составляющую отклонения от положения точки позиционирования соответственно в одной точке и на всем диапазоне L.

Параметры точности позиционирования характеризуют точностные свойства станка в статике (квазистатическом режиме). Они должны

быть в пределах допуска на изготовление станка, а функциональная составляющая M должна быть «плавной» кривой без разрывов. Путем внесения коррекции (Leadscrew error compensation [2]) можно уменьшить только функциональную составляющую отклонения позиционирования M. «Норма» для проведения коррекции, то есть допустимый размах функциональной составляющей M, при котором еще можно проводить коррекцию, должна назначаться по результатам изготовления опытной партии машин или по накопленной информации по изготовлению сопоставимых станков и узлов. Аналогичным образом назначаются «нормы» для проведения коррекции по другим параметрам: отклонения от прямолинейности движения, отклонения от перпендикулярности движения исполнительных органов станка.

Например, в соответствии с указанными сообщениями, для конструкции 5-координатного станка с ЧПУ мод. MC 300 последовательной структуры с поворотным столом Ø 300 мм [4] ориентировочной «нормой» параметра M для проведения коррекции отклонений позиционирования по линейной координате могут быть приняты значения, отмеченные жирным шрифтом в табл. 1 [3].

МЕТОДИКА ДИАГНОСТИКИ

Задача диагностики точности станка при его сборке состоит в выявлении причин (источников) возникновения превышения измеренными параметрами точности норм коррекции.

Методика диагностики включает следующие этапы.

1. Выявляется наличие превышения норм в одном параметре, в группе параметров или во всех параметрах. Во многих случаях помогает визуальный контроль процесса измерения, например наблю-

дение за поступлением результатов на дисплей лазерного интерферометра.

2. На основании полученной информации и в соответствии с накопленным опытом выдвигается гипотеза о причине превышения. В соответствии с гипотезой строится модель образования отклонений и устанавливается порядок проведения дополнительных последующих измерений (исследований), если они требуются.
3. Проводится поиск параметров механизма несущей системы станка, посредством изменения которых можно устранить наблюдаемое отклонение.
4. Осуществляется изменение параметров механизма. Проводятся повторные измерения и цикл калибровки.

Для проведения представленной методики диагностики необходимо:

- соответствующее аттестованное измерительное оборудование;
- операторы, осуществляющие измерение первичных и интегральных отклонений механизмов машины, должны быть аттестованы. Инженер-исследователь должен:
- знать конструкции многокоординатных машин с ЧПУ, теорию образования первичных и интегральных отклонений многокоординатных машин с ЧПУ;
- овладеть методикой и средствами измерения первичных и интегральных отклонений механизмов машин с ЧПУ;
- знать процедуры введения коррекций в системы ЧПУ многокоординатных машин.

Описанная выше диагностика касается измерений, проводимых на холостом ходу в статическом режиме.

Преимуществами представленной диагностики являются:

1. диагностика базируется на измерениях и анализе первичных отклонений в соответствии с ГОСТ 22267-76, которые осуществляются во всем рабочем объеме станка;
2. диагностика базируется на достоверном разбиении отклонений позиционирования по линейным и угловым координатам в соответствии с ГОСТ 27843-2006 и ISO 230-2:1997 на функциональные отклонения, случайные отклонения, отклонения обратного хода, интегральные отклонения;
3. диагностика проводится в рамках обязательных испытаний машины (станка) на геометрическую точность, проводимых на холостом ходу.

Представленная методика дополняет диагностику, основанную на измерениях отклонений воспроизведения образцовой траектории (ГОСТ 30544-97 «Методы проверки точности и постоянства отработки круговой траектории»).

Методика диагностики, основанной на измерениях отклонений воспроизведения образцовой траектории (фирмы Renishaw) имеет преимущество, заключающееся в том, что выявляются отклонения, проявляющиеся при действии инерционных нагрузок (боковой люфт, несогласованность настройки приводов, пики отклонений при реверсе координат и др.). Однако эта методика имеет недостаток – измеряется локальная зона, ограниченная окружностью.

Представляется целесообразным дальнейшее развитие диагностики 5-координатного станка с ЧПУ как накоплением и обобщением статистического материала о проведении калибровки 5-координатных станков с ЧПУ, так и путем сочетания описанной диагностики точности с диагностикой, основанной на измерении статической и динамической жесткости НС станка. Диагностика статической жесткости строится на использовании информации, содержащейся в гистерезисной кривой «деформация – нагружающая сила». Нагружение силой растяжения/сжатия должно производиться без переустановки нагружающего устройства [5]. Диагностику статических и динамических свойств многокоординатной машины удобно строить на использовании информации о динамическом отклике исполнительных органов машины на силовое воздействие [6].

ПРИМЕРЫ ПРОВЕДЕНИЯ ДИАГНОСТИКИ ПРИ НАРУШЕНИИ «НОРМ» НА ПРОВЕДЕНИЕ КОРРЕКЦИИ

У станка № 4 модели МС 300 [3] показатели точности позиционирования по координате B

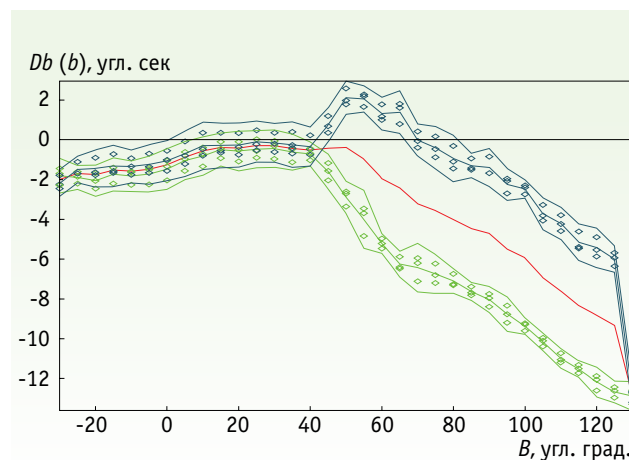


Рис. 3. Кривые точности позиционирования по координате B для станка № 4 (трение металл по металлу)

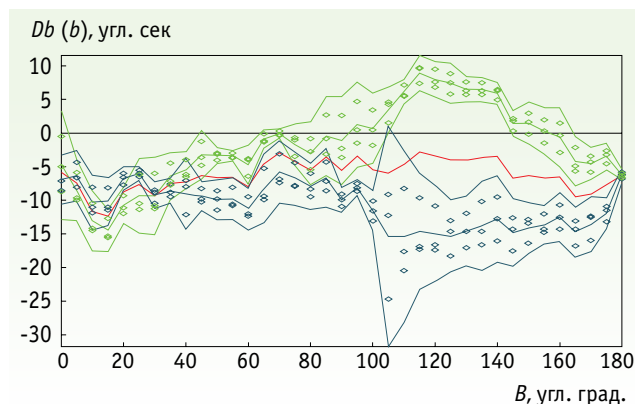


Рис. 4. Кривые точности позиционирования по координате B для станка № 5 (трение пластмасса по металлу) до проведения коррекции

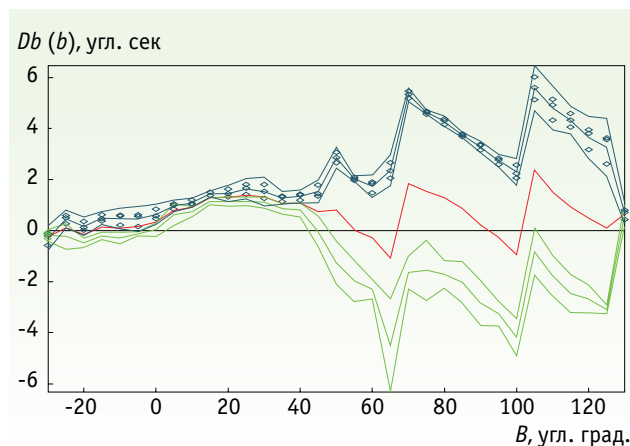


Рис. 5. Кривые точности позиционирования по координате B для станка № 4 (трение металл по металлу) после проведения коррекции до устранения дефекта

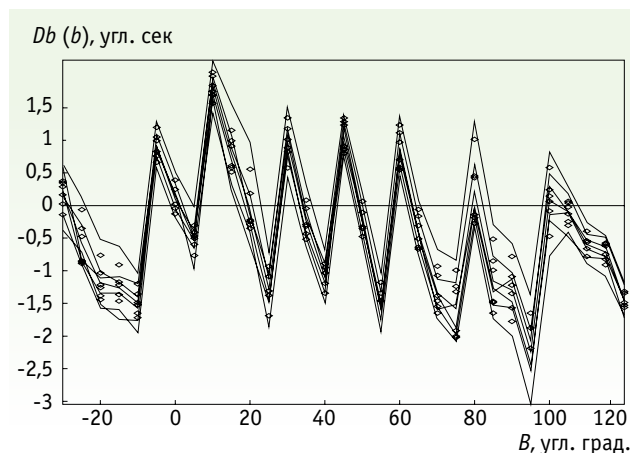


Рис. 6. Кривые точности позиционирования по координате B для станка № 4 после устранения дефекта соприкосновения и проведения коррекции

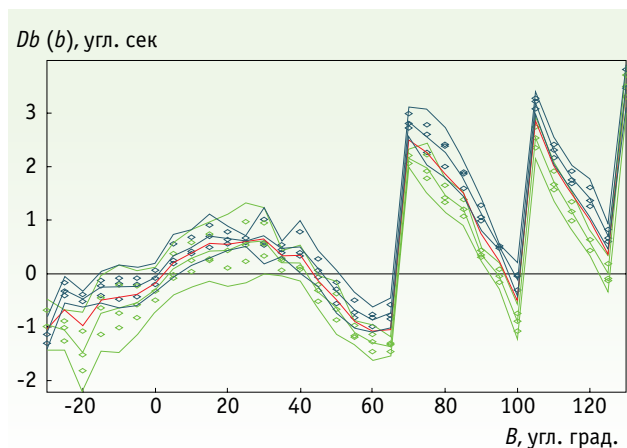


Рис. 7. Кривые точности позиционирования по координате B для станка № 5, (трение о корпус бесконтактного датчика) после устранения дефекта и проведения коррекции

существенно превышены, и, как показали ремонтные работы, в собранном узле поворота корпуса планшайбы был обнаружен дефект сборки: подвижная часть тормозной муфты соприкасалась с неподвижной трубой ограждения прокладки кабелей. В непредусмотренном стыке возникали силы трения, которые вызывали повышенные отклонения при позиционировании по координате B (рис. 3).

Аналогичный дефект наблюдался на станке № 5 (рис. 4). Здесь происходило соприкосновение корпуса бесконтактного датчика с кулачком, который жестко связан с корпусом планшайбы.

На рис. 3 четко видно, что момент начала соприкосновения (трения) наступает вблизи угла поворота $\approx 40^\circ$. Кривые отклонений «раздваиваются», возникает большое отклонение обратного хода. Введение коррекции несколько уменьшает общий показатель точности A с 16,6 (рис. 3) до 12,8 мкм (рис. 5). Только после устранения дефекта проблема решается полностью, показатель A снижается до 5,3 мкм (рис. 6).

На рис. 7 показано поведение кривой отклонения по координате B для станка № 5 после устранения дефекта (правильная установка корпуса бесконтактного датчика) и проведения коррекции точности позиционирования. Это позволило существенно уменьшить отклонение обратного хода B с 23,5 (рис. 4) до 1,0 мкм и общий показатель точности A до 6,2 мкм (рис. 7).

Опыт проведения диагностики [3] показывает, что некоторые дефекты можно выявить, учитывая следующее:

- недостаточная жесткость НС приводит к деформациям при реверсе, что увеличивает отклонения обратного хода;
- сухое трение (металл по металлу) увеличивает отклонения обратного хода;
- сухое трение (металл по пластмассе) увеличивает все составляющие отклонения позиционирования;
- цикличность работы холодильника увеличивает случайную составляющую точности позиционирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Нарышкин А.** Первые успехи станкостроения России. <http://politrussia.com/ekonomika/stankostroenie-716/>
2. SINUMERIK 840D/840Di/810D / Extended Functions. 840D_FB2.pdf // [сайт]. http://electronica.li2.uchile.cl/new/documentacion/CNC/Sinumerik%20840%20Di/840D_FB2%20Description%20of%20Functions%20-%20Part%202.pdf
3. **Серков Н.А.** Точность многокоординатных машин с ЧПУ: Теоретические и экспериментальные основы. — М.: ЛЕНАНД, 2015. 304 с.
4. Многокоординатный обрабатывающий центр модели MC-300. <http://www.niat.ru/data/org/1429224423/1429809598/1429809796/1450013742/>
5. **Серков Н.А., Мерзляков А.А., Сироткин Р.О., Орлова Г. Н.** Устройство для измерения статической жесткости несущей системы машин-автоматов / Сб. научных трудов и инженерных разработок научной конференции «Ориентированные фундаментальные исследования — новые модели сотрудничества в инновационных процессах»; Под ред. член-корр. РАН, академика РИА Б.В.Гусева. — М.: Эксподизайн-Холдинг, 2008. С. 195—198.
6. **Мерзляков А.А., Серков Н.А. Сироткин Р.О.** Способы возбуждения колебаний при исследовании динамики механических систем / Сб. трудов VIII Международной научно-технической конференции по динамике технологических систем (в трех томах). — Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2007. Том II. С. 194—199.

СЕРКОВ Николай Алексеевич —
кандидат технических наук, ведущий научный
сотрудник ИМАШ РАН