

ТЕХНОЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

621.94

ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ТОЧНОСТЬ ТОКАРНОГО СТАНКА С ЧПУ

Доц. В.В. ДОДОНОВ, доц. Ю.В. НИКУЛИН

В статье рассмотрены вопросы формирования точности токарных станков. Представлены экспериментальные методы оценки точности вращения шпиндельного узла по параметрам его круговых траекторий с приложением и без приложения к нему рабочих нагрузок; обсуждаются вопросы определения точности перемещения суппорта станка, влияние тепловых деформаций станка на его точность. Приводится схема измерительно-испытательной установки и результаты измерения параметров, характеризующих точность токарных станков

Questions of precision quality shaping of lathes are examined in this article. Experimental methods of an exactitude estimation of a head slide rotation on parameters of its circular trajectories with and without the application of working loadings are presented. Also questions of running accuracy of a planing tool box, influence of thermal strains of the machine tool on its exactitude are discussed. The scheme of measuring and presetting station and results of measurements on parameters describing exactitude of lathes are presented in conclusion.

Повышение качества металлорежущих станков — одна из основных проблем современного машиностроения. Технологический процесс обработки резанием должен гарантированно обеспечивать заданное качество изготовления деталей в соответствии с установленными чертежами, технологическими требованиями. Важнейшая компонента, средство реализации технологического процесса — металлорежущий станок — это сложная прецизионная технологическая машина, формирующая показатели качества обрабатываемых на ней деталей. Уровень качества металлорежущего станка определяется, в основном, требованиями к точности обрабатываемых деталей — точность размеров, формы, взаимного расположения, обрабатываемых поверхностей, шероховатость, волнистость. Более высокие требования к станкам возникают при окончательной обработке, формирующей параметры жесткости обрабатываемого изделия. Ввиду этого показатели жесткости металлорежущего станка являются основными показателями, от реализации которых зависит эффективность его применения.

Испытания токарных станков на геометрическую и кинематическую точность включают проверки точности вращения шпинделя, прямолинейности направляющих, прямолинейности перемещения суппортов, оценивается правильность взаимного движения узлов станка, параллельность и перпендикулярность направляющих и оси шпинделя.

Испытания станков на статическую жесткость предусматривают измерение деформаций под рабочей нагрузкой узлов токарного станка — шпиндельного узла и суппорта. Динамические процессы в станке при обработке резанием измеряется при испытаниях станка на виброустойчивость [1], которая оказывает непосредственное влияние на точность формы обработанной детали, волнистость и шероховатость обработанной поверх-

ности. При повышении требований к точности обработки все более возрастающую роль в формировании точности обработки играть тепловые деформации [2].

Точности обработки на токарных станках во многом определяется геометрической точностью станков, геометрической точностью шпиндельного узла (ШУ), привода продольной и поперечной подачи, несущей системой станка, что, в основном, определяет точность взаимного положения инструмента и детали в процессе обработки [3], [4].

Точность обработки на токарных станках определяется комплексным влиянием входящих в технологическую систему станка подсистем, факторов, компонент (рис. 1).

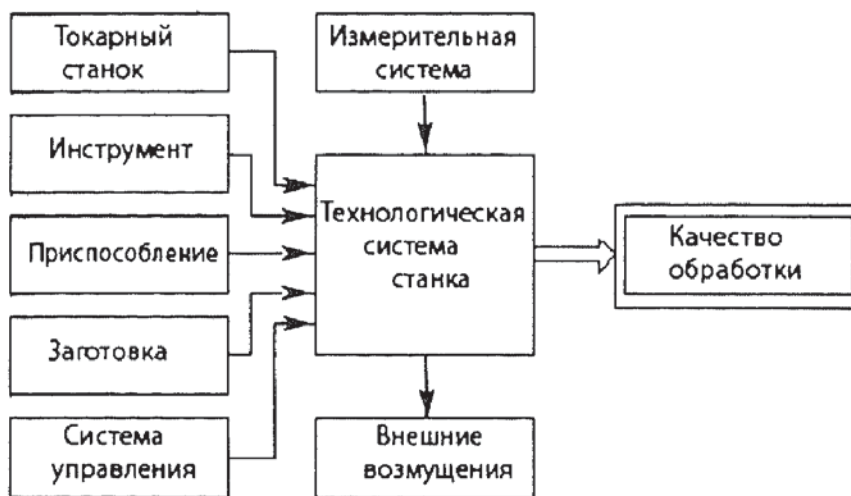


Рис. 1. Технологическая система станка

Точность металлорежущих станков определяется тремя группами показателей [5]: 1) показатели, характеризующие точность обработки образцов изделий; 2) показатели, характеризующие геометрическую точность станков; 3) дополнительные показатели.

Геометрическая точность станка характеризуется такими группами показателей [6]: точность траекторий перемещения рабочих органов станка, несущих заготовку и инструмент; точность расположения оси вращения и направления прямолинейных перемещений рабочих органов станка, несущих заготовку и инструмент, относительно друг друга и относительно баз; точность баз для установки заготовки и инструмента; точность координатных перемещений (позиционирования) рабочих органов станка несущих заготовку и инструмент.

Предусмотренные стандартами и техническими условиями проверки геометрической точности отражают влияние точности станка на точность обработки.

Зажим, вращение и обработка изделия на токарном станке осуществляются с помощью шпиндельного узла. Токарный станок является основной подсистемой во многом определяющей качество обработки: точность, чистота поверхности, волнистость. Существенный вклад в формирование качества обработки вносят и другие подсистемы и факторы: погрешности приспособления, погрешности ШУ, точность работы приводов подачи станка, систем управления и измерения, свойства заготовки [1].

Максимальная точность обработки диаметральных размеров на современных токарных станках оценивается величинами 0,5...1 мкм [2], поэтому при разработке основных формообразующих узлов токарного станка — ШУ и приводов продольной и поперечной подачи предъявляются очень жесткие требования, так как их геометрические погрешности должны быть меньше суммарного допуска на обработку.

Для экспериментального определения параметров и характеристик круговых траекторий ШУ, определяющих допустимую жесткость токарной обработки на кафедре станков и автоматов МГТУ им. Н.Э.Баумана разработана измерительная установка, схема которой представлена на рис. 2.

Схема испытательной установки

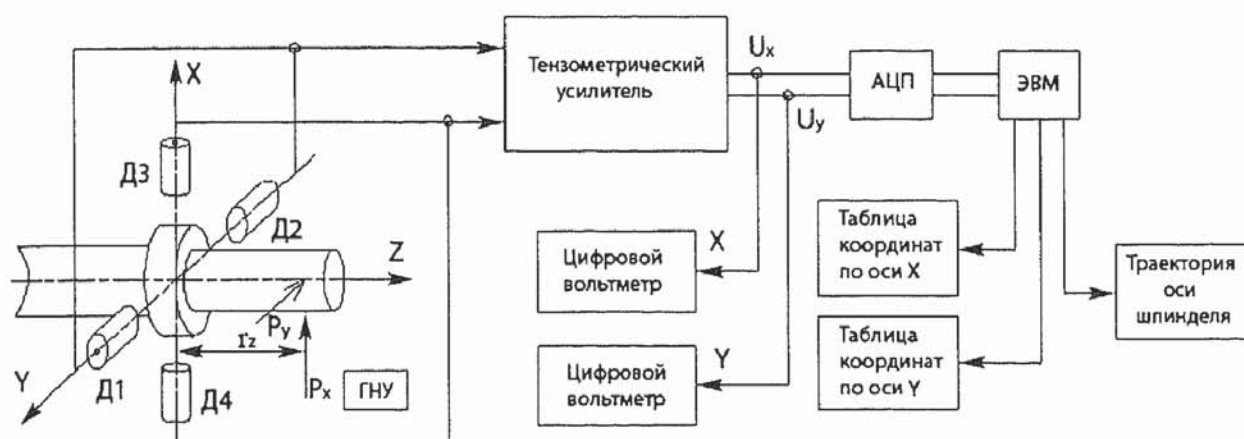


Рис. 2. Схема испытательной установки

В схему испытательной установки (информационно-измерительный канал (ИИК) круговые траектории (КТ)) входят следующие измерительные приборы и оборудование: датчики Д1—Д4 (первичные бесконтактные преобразователи информации индуктивного типа); тензометрический усилитель типа УТ4-1; аналого-цифровой преобразователь; персональная ЭВМ для сбора результатов эксперимента, обработки и отображения их на графическом мониторе, печатающем и графопостроительном устройствах; гидравлическое нагрузочное устройство (ГНУ), служащее для имитации сил резания. ГНУ, представляет собой два взаимно перпендикулярных нагружающих гидроцилиндра, закрепленные на общем кронштейне в суппорте испытуемого станка.

Испытательно-измерительная установка содержит два канала измерения: по координате X и по координате Y . Основные технические характеристики испытательно-измерительной установки:

диапазон измерения смещений оси ШУ по каждому каналу, мкм	20
диапазон частоты вращения ШУ, на которых осуществляется измерение, об/мин	± 6000
быстродействие первичных преобразователей, мс	$-0,003$
максимальная погрешность измерения, мкм	$\pm 0,5$

Точность вращения шпинделя на холостом ходу станка зависит от математического ожидания и среднеквадратического отклонения значений эксцентриситетов для каждой i -ой опоры шпинделя от четырех видов погрешностей: биение шейки относительно его осей; биение дорожки качения внутреннего кольца подшипника относительно посадочного отверстия; биение дорожки качения наружного кольца подшипника относительно его наружной поверхности; несоосность посадочного отверстия под подшипник в шпиндельной бабке (пиноли).

Расчет математического ожидания m среднеквадратического отклонения σ радиуса биения шпиндельного узла токарного станка СТП-125 дал следующие результаты: $m = 5,6$ мкм, $\sigma = 1,83$ мкм.

Фактором, влияющим на точность токарного станка является суммарная сила резания и ее составляющие по координатам P_x и P_y . По типовым для токарных станков характеристикам сил резания задавались с помощью ГНУ различные силы, показанные на рис. 3.

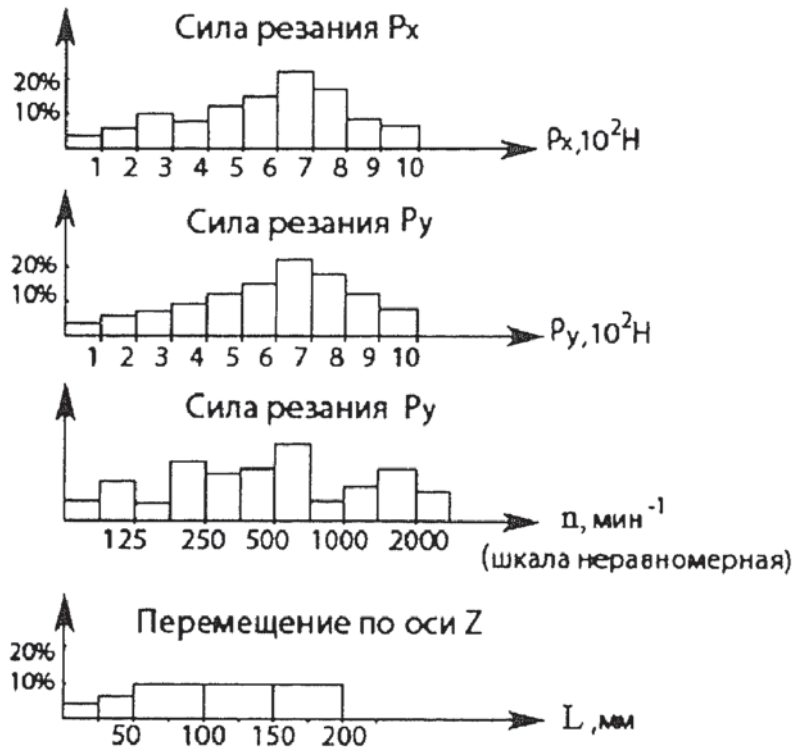


Рис. 3. Графики зависимостей

В МГТУ им. Н.Э. Баумана, на кафедре металлорежущих станков был разработан стенд для измерения круговых траекторий (КТ) шпиндельного узла (ШУ). В качестве объекта испытаний был использован станок СТП-125. Были проведены пробные испытания ШУ по параметрам КТ.

Проведение предварительных испытаний. Условия проведения испытаний. Испытания проводились на разогретом в течение 2—3 часов станке при повороте ШУ вручную, при холостом ходе с разным числом оборотов вращения ШУ, под нагрузкой, создаваемой гидравлическим нагрузочным устройством (ГНУ). В последнем случае варьировали как число оборотов n , так и величиной нагрузки P (рис. 3), радиально нагружающей специальную оправку, вставленную в ШУ. Радиальные смещения ШУ измерялись вдоль координат X и Y с помощью 4-х индуктивных бесконтактных преобразователей, работающих на несущей частоте 5200 Гц. Сигнал с индуктивных преобразователей поступал на четырехканальный тензоусилитель, а затем, после АЦП и ЭВМ, — на графопостроитель.

Результаты предварительных испытаний приведены на рис. 4—6. Испытания проводились на холостом ходе при $n = 100$ [1/мин]. На рис. 5 и 6 приведены типичные траектории оси ШУ, выведенные на экран ЭВМ.

Точность вращения шпинделя зависит от точности изготовления его деталей, точности подшипников, качества его сборки и регулировки. Погрешности вращения шпинделя, в первую очередь, определяются разностенностью колец подшипника и разноразмернос-

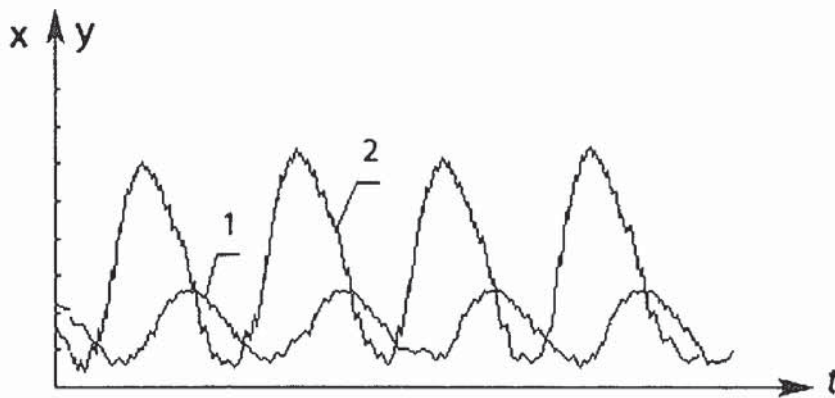


Рис. 4. Биение оси шпинделя на холостом ходе

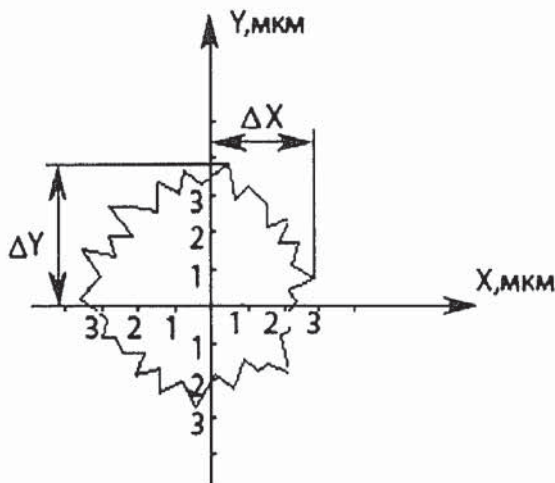


Рис. 5. Траектория оси шпиндельного узла

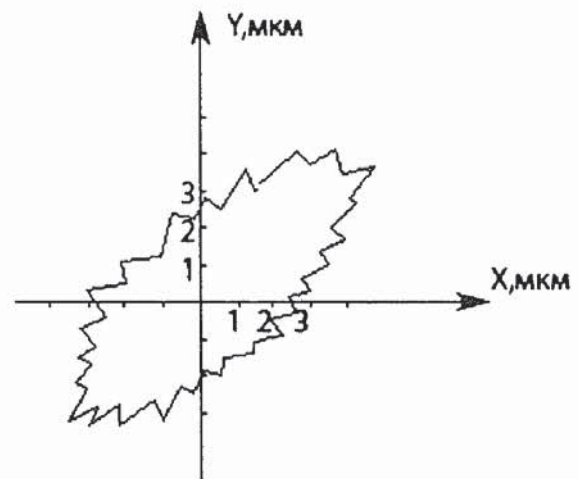


Рис. 6. Траектория оси шпиндельного узла

тью тел качения. Эта погрешность у подшипников малых и средних размеров лежит в пределах 1...10 мкм (в зависимости от класса точности и размера подшипника).

Волнистость дорожек и геометрические погрешности тел качения вызывают меньшие смещения шпинделя порядка 0,1...1 мкм и накладываются в виде высококачественных составляющих на погрешности от разностенности колец.

Еще более высокую частоту и меньшую амплитуду колебаний шпинделя вызывает шероховатость дорожек качения. Сложение этих колебаний вызывает сложную, комплексную картину перемещения оси шпинделя в пространстве (фигуры Лиссажу, перемещение оси шпинделя по гипоциклоиде или эпициклоиде с различным числом петель).

Большое влияние на точность вращения шпинделей станков, особенно высокоскоростных, оказывает остаточный дисбаланс, который определяется в $[Н \cdot мм/Н]$ либо в виде эксцентриситета e в $[мкм]$, который определяет действительное смещение центра тяжести шпинделя относительно оси вращения [7]. Одеваемый на шпиндель патрон также должен быть отбалансирован [7].

Результаты испытаний на холостом ходу при проворачивании ШУ от руки вывести на ЭВМ не представляется возможным из-за особенностей программного обеспечения ЭВМ. Однако измерения радиального биения ШУ с помощью датчиков показало, что его численная величина находится в пределах 1,5—2,5 мкм по обеим координатам X и Y и по своей величине несколько меньше соответствующего радиального биения при измерении ШУ на холостом ходу без нагрузки.

Испытания биения ШУ без нагрузки на холостом ходу проводились при различных числах оборотов ШУ: $n = 10, 30, 70, 100, 160, 220, 300, 450, 600, 800, 1000, 1300, 2000$ об/мин (рис. 7).

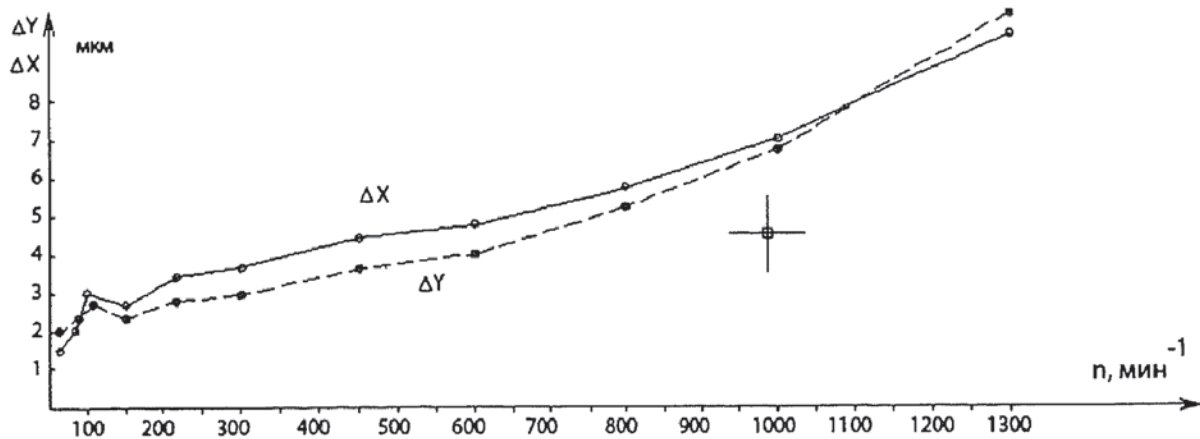


Рис. 7. Биение шпиндельного узла на холостом ходу без нагрузки на различных оборотах вращения

Испытания показали, что с ростом числа оборотов ШУ радиальное биение монотонно возрастает до $n = 500—600$ об/мин, а затем скорость увеличения амплитуды радиального биения имеет тенденцию к некоторому увеличению. Измерения проводились при одетом патроне.

Шпиндельный узел представляет собой сложную механическую систему, состоящую из упругих элементов нескольких типов: подшипника, вала, фланцев, втулок, пружин, связанных между собой, воздействующих друг на друга и образующих единое техническое устройство, в котором протекают сложные процессы, каждый из которых может быть описан своей математической моделью [6].

Наиболее существенные модели: упругодеформационная, динамическая, вибрационная, трибологическая, тепловая, усталостного разрушения.

Входами этих моделей являются конструктивные и технологические факторы проектирования и изготовления шпинделя, условия эксплуатации. Выходные параметры моделей — это жесткость, вибрации, момент трения, быстроходность, технический ресурс, теплоустойчивость, усталостная долговечность и другие расчетные параметры, характеризующие в том числе и геометрическую точность станка и точность обработки на нем детали.

При испытании ШУ при снятом патроне с фиксированной частотой его вращения ($n = 1000$ 1/мин) и нагрузке, которая задавалась гидравлическим нагрузочным устройством, круговая траектория ШУ несколько расширялась по своему среднему диаметру (увеличение Δx и Δy) и смещалась в направлении действия нагрузки

$$P_{\Sigma} = \sqrt{P_x^2 + P_y^2} \quad (\text{рис. 8}).$$

В результате предварительных испытаний определялась также зависимость амплитуды колебаний ШУ от частоты (АЧХ*). Исследования проводились с помощью специального анализатора спектра колебаний типа СК4-72. Сигнал поступал с датчиков перемещений на вход анализатора, строились АЧХ колебаний ШУ при различных частотах его вращения.

Амплитуды A и B АЧХ примерно соответствуют по частоте колебаниям ШУ от колебания жесткости, вызванного 18 опорами качения переднего подшипникового узла и колебаниями зубчатого приводного ремня.

При работе станка между заготовкой и инструментом возникают относительные колебания, вызывающие те или иные погрешности обработки. Для снижения уровня этих колебаний и повышения устойчивости динамической системы станка проводят построения форм колебаний шпиндельного узла и суппорта. Форма колебаний характеризуется совокупностью отношений перемещений отдельных колеблющихся точек упругой системы к перемещению какой-либо одной точки, взятых в определенный момент времени (с учетом сдвига фаз) для определения частоты и направления колебаний. Рабочий диапазон частот колебаний находится обычно в пределах от 10 до 500 Гц.

Для повышения точности измерения желательнее использовать избыточное число точек измерения вибраций. Вибрации измеряют, как правило, в 2—3-х взаимно перпендикулярных направлениях.

Форму колебаний измеряют виброметрами, которые могут работать в режимах измерения виброперемещения, виброскорости и виброускорения. Первый режим используется в низкочастотной области (до 200 Гц), второй предпочтителен для частот (100—400 Гц), третий используется для более высокочастотных рабочих диапазонов виброметрирования.

Траектория какой-либо фиксированной точки на торце шпинделя с достаточно большим приближением отражает форму поперечного сечения обрабатываемой детали. Степень этого приближения определяется, кроме того, и радиальным смещением инструмента, закрепленного на суппорте при поперечной подаче и отклонениями траектории суппорта от прямолинейного движения при продольной подаче.

Были определены теоретически и проверены экспериментально (рис. 9) данные о точности диаметральных размеров изготавливаемой детали. Она зависит от точности позиционирования Δ поз привода поперечной подачи, т.е. от отклонения действительного положения привода X_i от заданного программой $X_{\text{прог}}$ при многократном двустороннем позиционировании. Методами математической статистики при испытаниях приводов определяются $\bar{X}_{\text{д}}$ и $\bar{X}_{\text{пр}}$ — средние арифметические значения положения привода при позиционировании в одну и другую стороны. Кроме того, определяются средние квадратические отклонения $\sigma_{\text{пр}}$ и $\sigma_{\text{д}}$, \bar{X} — среднее арифметическое значение действительного положения привода.

$$\bar{X} = (\bar{X}_{\text{пр}} + \bar{X}_{\text{д}})/2; 3\sigma — \text{величина зоны рассеивания};$$

$f = |\bar{X}_{\text{пр}} + \bar{X}_{\text{д}}|$ — зона нечувствительности, возникающая при реверсе привода поперечной подачи (рис. 9).

Измеренное на станке максимальное значение $\Delta_{\text{поз}}^{\text{max}}$ оказалось равной 5,5 мкм. Реальная погрешность от $\Delta_{\text{поз}}$ при обработке детали будет зависеть от диаметра обработки.

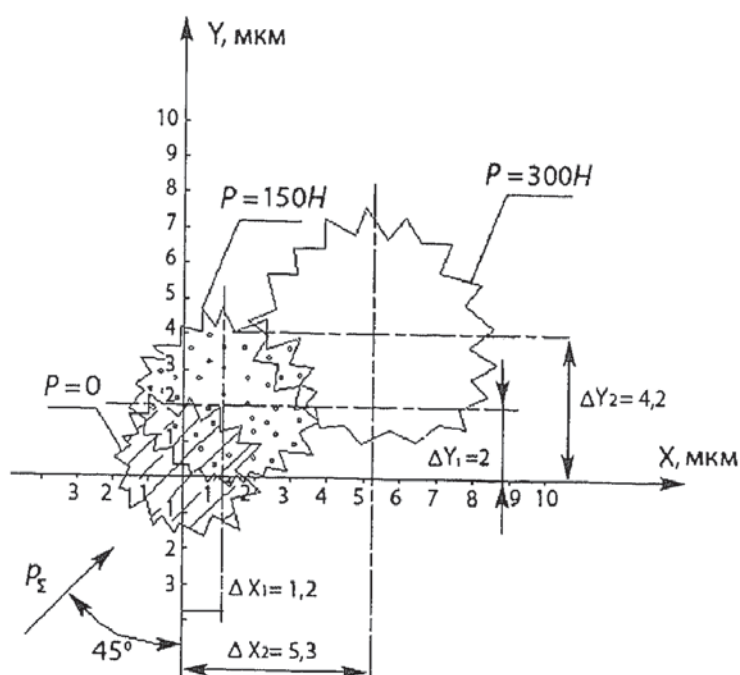


Рис. 8. Круговая траектория шпиндельного узла под нагрузкой

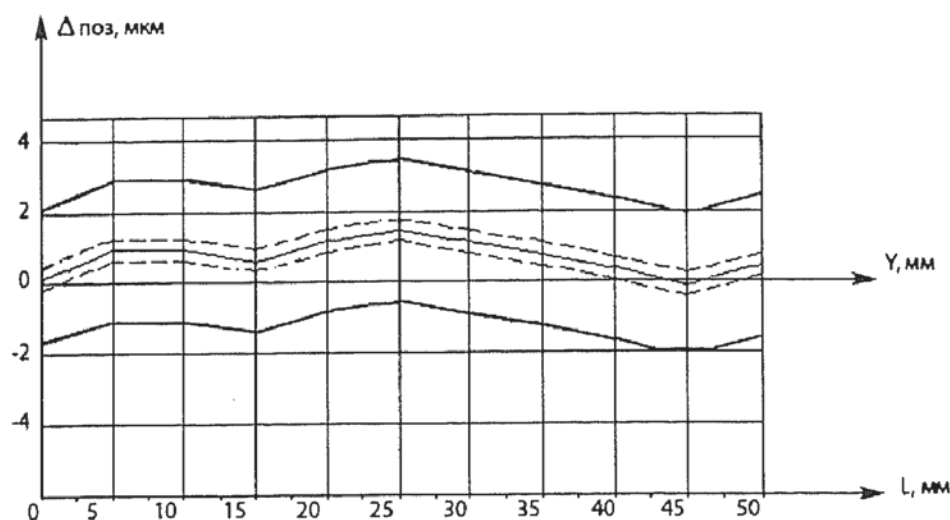


Рис. 9. График погрешностей двустороннего позиционирования револьверной головки станка СТП-125 при поперечном перемещении

Выводы

1. Разработана и опробована испытательно-измерительная установка для измерения параметров круговых траекторий шпиндельного узла токарного станка с ЧПУ.

2. В результате испытаний токарного станка СТП-125 получены результаты влияния внешних возмущающих воздействий (сил резания, смещения шпинделя) на параметры круговых траекторий шпиндельного узла.

3. Проведена оценка влияния погрешностей позиционирования поперечного суппорта на точность обработки.

4. Показаны пути и возможности диагностирования шпиндельного узла и суппортной группы токарного станка с ЧПУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. VDI Richtlinien 2060, «Нормы для балансировки вращающихся твердых тел». — 1980.
2. ГОСТ8-82Е, «Станки металлорежущие. Общие требования к испытаниям на точность». — М.: Изд-во Стандартов, 1982. — 10 с.
3. П р о н и к о в А. С. Программный метод испытания металлорежущих станков. — М.: Машиностроение, 1985. — 288 с.
4. Адаптивное управление станками. / Под ред. Балакшина. — М.: Машиностроение, 1973. — 688 с.
5. Конструкции и программные испытания шпиндельных узлов металлорежущих станков / Л.И. Верейна, В.В. Додонов. — М.: ВНИИТЭМР, 1991. — Вып. 1.
6. Ф и г а т н е р А. М. Расчет и конструирование шпиндельных узлов с подшипниками качения металлорежущих станков. — М.: НИИМАШ, серия С-1, 1971.
7. Расчет высокоскоростных шпиндельных узлов / В.Б. Бальмонт. — М.: ВНИИТЭМР, 1987. — Сер. 1. — Вып. 1. — 52 с.