



Ключевые слова:
геометрическая
точность, испол-
нительные органы
станка, несущая
система станка,
испытания

ВИДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НЕСУЩЕЙ СИСТЕМЫ МНОГОКООРДИНАТНЫХ СТАНКОВ С ЧПУ

Николай СЕРКОВ

Предложены пути создания новых и совершенствования существующих способов и средств проведения испытаний станков, направленных на оценку показателя «точность». Рассмотрены методики испытаний многокоординатного станка с ЧПУ на геометрическую точность в различных состояниях и точность при движении по заданной траектории при резании.

ВВЕДЕНИЕ

Госкорпорация Ростех создает станкостроительный кластер для разработки и серийного производства современных высокоточных станков и обрабатывающих центров. Кластер на базе Ковровского электромеханического завода (КЭМЗ) призван решить проблему технологической зависимости российской экономики от зарубежного промышленного оборудования.

«В состав станкостроительного кластера войдут ведущие российские предприятия, способные создавать элементы станочного оборудования, а также исследовательские институты, готовые разработать всю необходимую документацию. Формирование такой кооперации позволит в кратчайшие сроки расширять линейку оборудования, которое будет производиться на КЭМЗ в интересах российской промышленности», – сказал генеральный директор Ростеха Сергей Чемезов [1].

При создании новых моделей станков необходимо экспериментальными методами (испытаниями) исследовать точностные возможности опытного образца [2] и, в случае необходимости, провести соответствующие изменения в конструкции станка, технологии сборки и процессах калибровки станка.

Проведение испытаний с целью объективной оценки основных параметров станка на стадии изготовления опытного образца является сложной задачей, в настоящее время не решенной до конца. Необходимо создание новых и совершенствование существующих способов и средств проведения испытаний станков, в частности, направленных на оценку показателя «точность».

В данной статье рассматриваются виды экспериментальных исследований статических и динамических свойств несущей системы (НС) многокоординатных станков с ЧПУ.

ВИДЫ ИСПЫТАНИЙ МНОГОКООРДИНАТНОГО СТАНКА С ЧПУ

На рис. 1 представлены виды исследований, направленных на выявление связей первичных и интегральных отклонений в движении узлов и исполнительных органов (ИО) со свойствами станка и возмущениями, действующими на него. Здесь же показаны состояния станка при этих испытаниях.

Станок создается в соответствии с техническим заданием, разрабатываемым исходя из его функционального назначения.

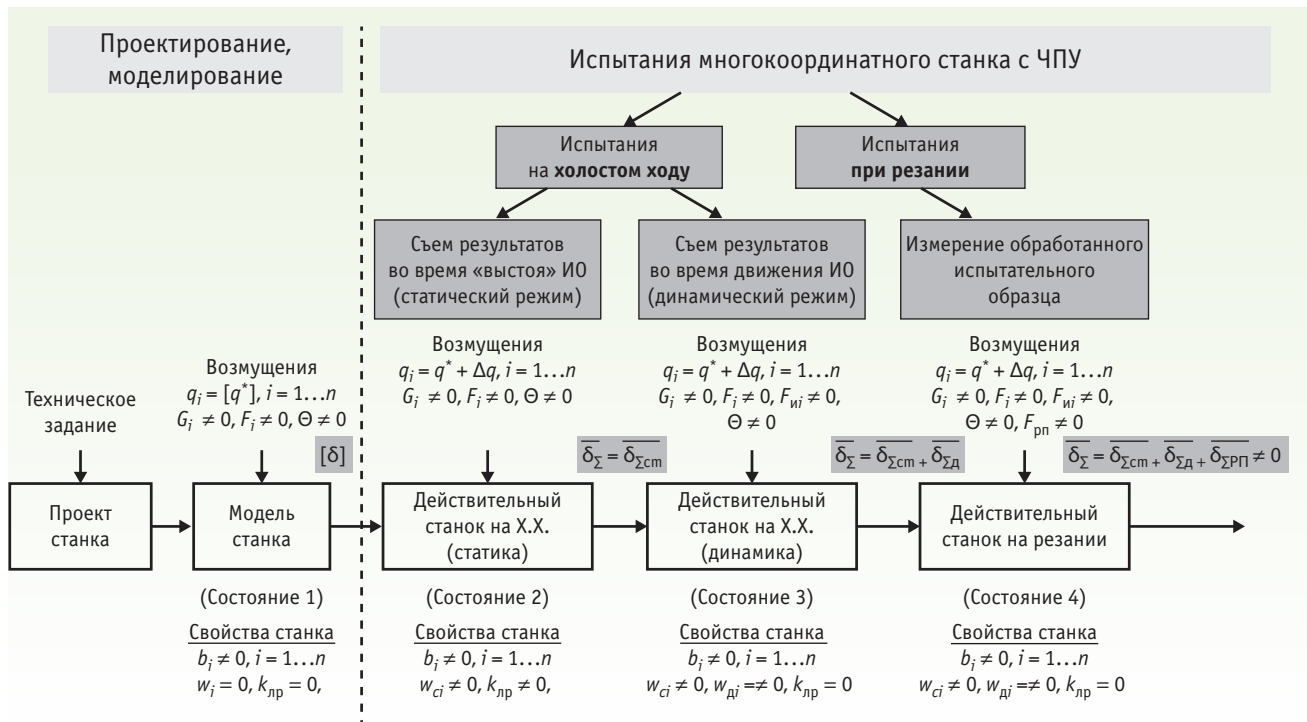


Рис. 1. Виды исследований точности станка с ЧПУ

В процессе конструирования станка создается проект на его изготовление и эксплуатацию. Конструктор всегда стремится создать «идеальный» станок, у которого, независимо от действующих на него возмущений (рис. 2), первичные отклонения механизмов q_i и, соответственно, интегральные отклонения исполнительных органов $\bar{\delta}_\Sigma$ находятся в пределах заданных норм точности.

Здесь: δ – смещение ИО, b_i – коэффициент влияния i -го первичного отклонения Δq_i на отклонение

выходного звена, F – силы различной природы (тяжести, рабочих процессов (резание), трения, инерции, электромагнитных процессов и др.), F_c – статические (квазистатические), F_d – динамические, $W_{ст}$ – коэффициент статической податливости, W_d – коэффициент динамической податливости, Θ – температура детали и узлов несущей системы (НС) станка, $k_{лр}$ – коэффициент линейного расширения.

Можно выделить следующие состояния станка, важные для проведения исследований его точности.

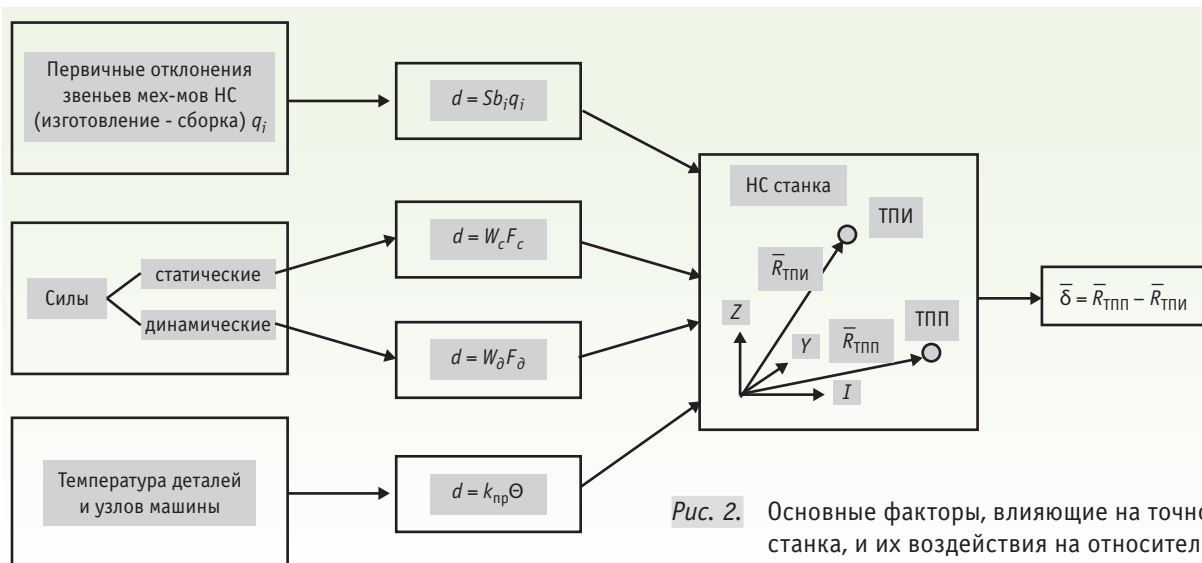


Рис. 2. Основные факторы, влияющие на точность станка, и их воздействия на относительное смещение ИО

Состояние 1 – виртуальное состояние модели станка. С помощью модели, в частности, твердотельной [3], можно для различных параметров станка оценивать статистические характеристики интегрального отклонения $\overline{\delta_\Sigma}$ и проводить поиск рационального распределения допусков на основные узлы станка.

Состояние 2 – это действительный станок, находящийся в квазистатическом режиме, то есть когда все подвижные узлы находятся в покое (выстой). Это состояние отличается от предыдущего тем, что звенья механизмов обладают податливостью и имеют ненулевой температурный коэффициент линейного расширения ($W_{\text{ст}i} \neq 0, W_{\text{д}i} \neq 0, k_{\text{лр}} \neq 0$).

В этом состоянии производится испытание станка на «холостом ходу» с целью измерения и контроля параметров геометрической точности станка в состоянии покоя («съём» результатов измерения в режиме «выстоя» и без выполнения рабочего процесса). Станок с действительными свойствами ($q_i = q_i^* + \Delta q_i, b_i \neq 0, W_{\text{ст}i} \neq 0, W_{\text{д}i} \neq 0, k_{\text{лр}} \neq 0$) при действии возмущений ($G_i \neq 0, F_{\text{тр}i} = F_{\text{ст}i} \neq 0, \Theta_i = \Theta_n + \Delta\Theta, i = 1...n$) имеет на выходе не нулевое отклонение $\overline{\delta_\Sigma} = \overline{\delta_{\Sigma\text{см}}}$.

Состояние 3 – это действительный станок в состоянии движения при отработке заданной траектории без совершения рабочего процесса (ГОСТ 30544-97). При этих испытаниях возникают дополнительные силы (силы инерции $F_{\text{и}i}$; силы трения движения $F_{\text{д}i}$), выделяется тепло и меняется температура деталей и узлов машины $\Theta_i = \Theta_n + \Delta\Theta_i$ и др. Станок с действительными свойствами ($q_i = q_i^* + \Delta q_i, b_i \neq 0, W_{\text{ст}i} \neq 0, W_{\text{д}i} \neq 0, k_{\text{лр}} \neq 0, i = 1...n$) при действии возмущений ($q_i \neq 0, i = 1...n, G_i \neq 0, F_{\text{и}i} \neq 0, F_{\text{тр}i} = F_{\text{д}i} \neq 0, \Theta_i = \Theta_n + \Delta\Theta$) имеет на выходе отклонение $\overline{\delta_\Sigma} = \overline{\delta_{\Sigma\text{см}}} + \overline{\delta_{\Sigma\text{д}}}$.

Состояние 4 – это состояние действительного станка при выполнении рабочего процесса. Станок с действительными свойствами ($q_i \neq 0, b_i \neq 0, W_{\text{ст}i} \neq 0, W_{\text{д}i} \neq 0, k_{\text{лр}} \neq 0$) при действии всех ранее рассмотренных возмущений и возмущений рабочего процесса ($q_i \neq 0, i = 1...n, G_i \neq 0, F_{\text{и}i} \neq 0, F_{\text{тр}i} = F_{\text{д}i} \neq 0, \Theta_i = \Theta_n + \Delta\Theta, F_{\text{рп}} \neq 0$). Он имеет на выходе не нулевое отклонение $\overline{\delta_\Sigma} = \overline{\delta_{\Sigma\text{см}}} + \overline{\delta_{\Sigma\text{д}}} + \overline{\delta_{\Sigma\text{рп}}} \neq 0$.

ИСПЫТАНИЯ МНОГОКОординатного станка с ЧПУ на геометрическую точность на холостом ходу в квазистационарном режиме (состояние 2)

При этих испытаниях измеряются все первичные отклонения многокоординатного станка, указанные в паспорте станка, сравниваются с нормами точности и делается вывод о необходимости внесения коррекции (файлов коррекции) в систему ЧПУ или проведения диагностики возникновения отклоне-

ний от нормы (ГОСТ 22267-76 Станки металлорежущие. Схемы и способы измерений геометрических параметров).

В настоящее время наиболее развиты исследования точности движения исполнительных органов машины по линейным координатам (прямолинейность, перпендикулярность, позиционирование) (ГОСТ 27843-2006 Испытания станков. Определение точности и повторяемости позиционирования осей с числовым программным управлением и ISO-230-2 1997), а также точность позиционирования по угловым координатам. Они, как правило, проводятся на современном оборудовании [4–5] и протоколируются. Необходимо стремиться проводить исследования точности аналогичным образом и для остальных первичных отклонений, в частности потому, что наблюдается отставание в создании методик и средств измерений первичных отклонений поворотных столов и поворотных головок.

На этой стадии испытаний самым важным является определение случайной составляющей, так как воздействие на нее возможно только через конструкцию машины, технологию изготовления и, в частности, технологию сборки, либо применением (привлечением) других видов коррекции [3].

По данным автора, для отклонений позиционирования функциональная составляющая по отношению к случайной до проведения коррекции может составлять до 10:1. Введение коррекции изменяет это соотношение до 1:1. Такое соотношение, как правило, приводится в технических условиях на изготовление современных многокоординатных многоцелевых станков с ЧПУ, в частности 5-координатных.

ИСПЫТАНИЯ МНОГОКОординатного станка с ЧПУ на геометрическую точность на холостом ходу при движении по эталонной траектории (состояние 3)

При этих испытаниях возникают дополнительные силы, действующие на несущую систему станка. Это, главным образом, силы инерции $F_{\text{и}}$ и силы трения $F_{\text{т}}$.

Увеличение отклонений за счет динамических нагрузок может достигать 30% [6–7], поэтому изучение влияния динамических нагрузок на искажение траектории движения режущего инструмента станка является весьма актуальным.

Для исследования влияния динамических свойств НС на точность движения ИО станка представляются в виде, изображенном на рис. 3.

Здесь: $x_3(t)$ – заданная программой управления станком координата X , $x_{\text{д}}$ – действительная координата X , n_3 – заданная скорость вращения ротора

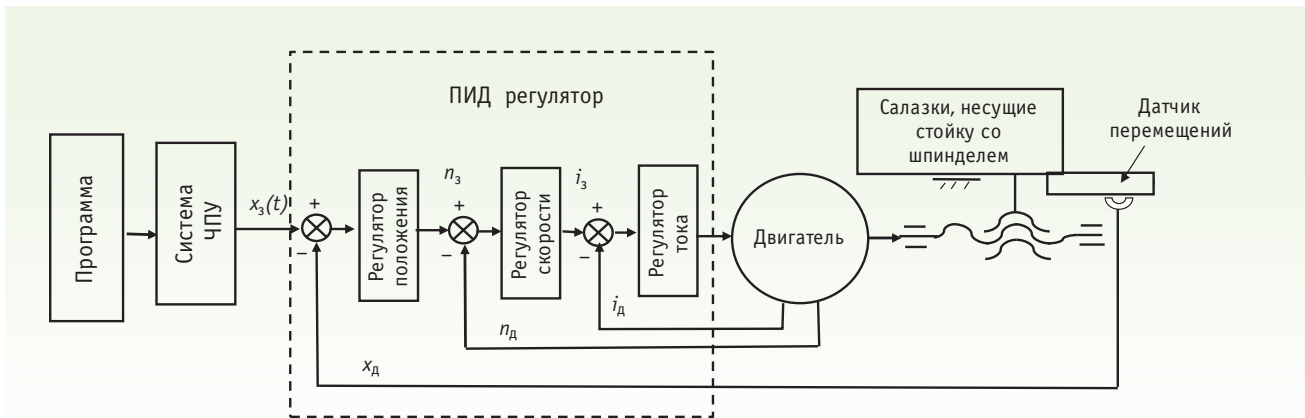


Рис. 3. Схема привода подачи по линейной координате X

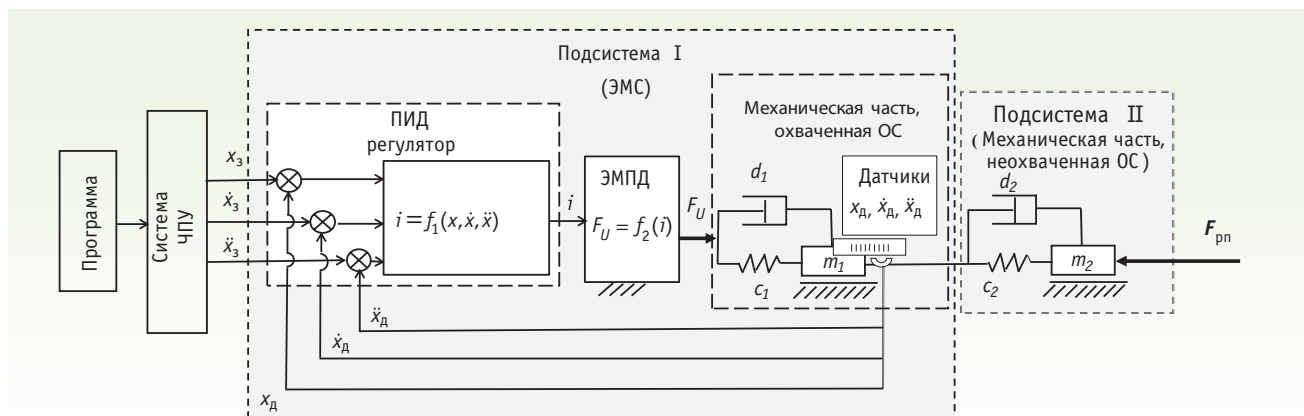


Рис. 4. Блок-схема несущей системы «координата X » в виде двух взаимосвязанных подсистем I и II

двигателя, n_d – действительная скорость вращения ротора двигателя, i_3 – заданный ток управления электродвигателем, i_d – действительный ток управления электродвигателем.

Для решения задач анализа и синтеза точности многокоординатных станков с ЧПУ в динамическом режиме удобно пользоваться представлением несущей системы станка в виде двух взаимосвязанных подсистем I и II (рис. 4).

Подсистема I – это часть несущей системы, охваченная обратными связями. Она представляет собой электромеханическую систему (ЭМС), включающую в себя: ПИД-регулятор, электродвигатель с электромагнитным полем (ЭМПД) и механическую часть, охваченную обратной связью. В случае станка МС-300, механическая часть, охваченная обратной связью, содержит: ротор двигателя, зубчато-ременную передачу, предохранительную муфту, ШВП и салазки. На блок-схеме механическая часть представлена в виде колебательной системы, состоящей из приведенной массы m_1 , приведенной жесткости c_1 и демпфирования d_1 .

Подсистема II – это оставшаяся механическая часть несущей системы, неохваченная обратными связями. В частности, применительно к несущей системе координаты X – это все механические узлы, расположенные на салазках, а именно: стойка, с расположенной на ней шпиндельной бабкой, несущей шпиндель. Это чисто механическая система, которую можно представить в виде колебательной системы, состоящей из приведенной массы m_2 , приведенной жесткости c_2 и демпфирования d_2 .

На салазках располагается приемник (каретка) сигнала обратной связи по положению x_d с линейки (Dr. Johannes Heidenhain GmbH), расположенной на станине станка. Сигнал, снимаемый с датчика скорости, установленного на валу электродвигателя, считается пропорциональным действительной скорости \dot{x}_d движения салазок, а сигнал о текущем значении тока двигателя – действительному значению ускорения \ddot{x}_d движения салазок. Сигналы $x_d, \dot{x}_d, \ddot{x}_d$ используются в ПИД-регуляторе для выработки управляющего сигнала – тока $i = f_1(x_3, \dot{x}_3, \ddot{x}_3)$,

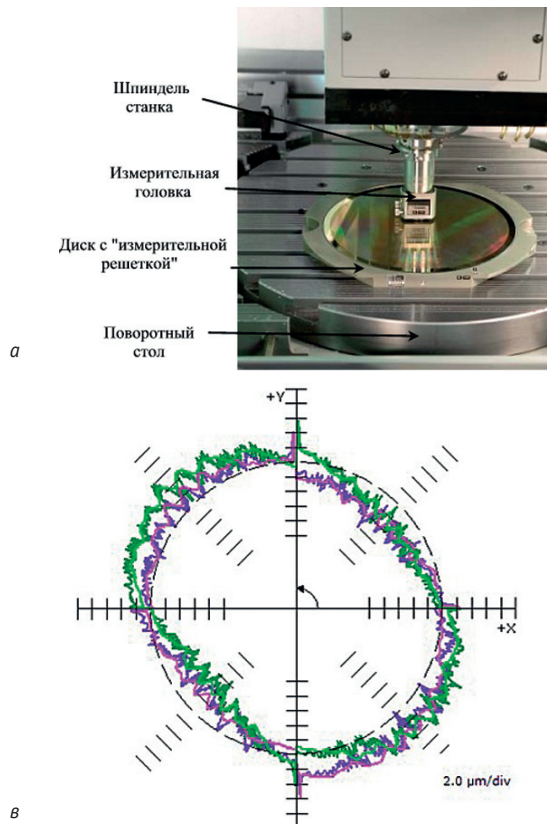


Рис. 5. Измерительные средства для определения отклонений воспроизведения траектории в плоскости

$x_d, \dot{x}_d, \ddot{x}_d$), подаваемого на двигатель привода. В двигателе ток i изменяет электромагнитное поле и, соответственно, движущий крутящий момент $F_U = f_2(i)$, действующий между статором и ротором.

Представленная блок-схема является основой для исследования поведения НС станка при различных видах нагружения, среди которых можно выделить следующие:

- а) невозмущенное состояние ($x_3(t) = 0, \dot{x}_3(t) = 0, \ddot{x}_3(t) = 0, F(t) = 0$) (система в покое: отсутствует воздействие на НС со стороны системы ЧПУ и со стороны рабочего процесса);
- б) силовое нагружение при заданном нулевом значении управляемой координаты ($x_3(t) = 0, F_i \neq 0, i = 1, \dots, n$) (измерение статической жесткости);
- в) нагружение несущей системы заданным силовым воздействием, например, ступенчатым силовым воздействием, при заданном нулевом значении управляемой координаты ($x_3(t) = 0, \dot{x}_3(t) = 0, \ddot{x}_3(t) = 0, F(t) = 500 \text{ Н}$ при $t < t_0, F(t) = 0$ при $t \geq t_0$) (измерение динамической жесткости по реакции на ступенчатое силовое воздействие 500 Н);
- г) движение ИО станка при заданном ступенчатом воздействии по управляемой координате



3,000 mm/min in the XY plane. Where CW and CCW traces are different, the CW data is shown in blue and CCW data in red. A plot scale of 5μm/division is used throughout.

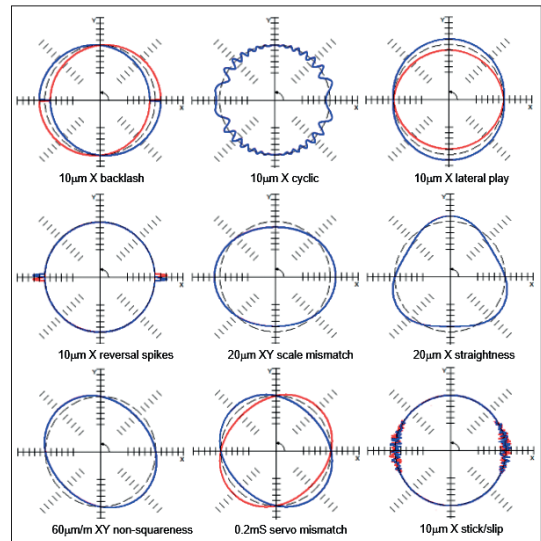


Figure 6 - Ballbar plot distortion from a variety of machine errors

If a machine contains only one or two errors it may be possible to visually inspect the plot to determine the source of those errors. However, in many cases, machines contain numerous superimposed errors, making visual identification of the error sources very difficult, if not impossible.

($x_3(t) = 0$ при $t < t_0, x_3(t) = X = Const$ при $t \geq t_0, F(t) = 0$) (изучение реакции привода на ступенчатое изменение управляемой координаты);

- д) движение ИО станка при заданной эталонной траектории и нулевом силовом воздействии со стороны режущего инструмента ($x_3(t) = 0$ при $t < t_0, x_3(t) = \sin(\omega t)$ при $t \geq t_0, F(t) = 0$) (изучение движения ИО станка по эталонным траекториям на холостом ходу (без нагрузки на рабочий орган));
- е) движение ИО станка при заданной эталонной траектории и силовом воздействии, меняющемся во времени ($x_3(t) = 0$ при $t < t_0, x_3(t) = \sin(\omega t)$ при $t \geq t_0, F(t) = Var$);
- ж) движение ИО станка по заданной произвольной траектории и силовом воздействии, меняющемся во времени ($x_3(t) = Var, F(t) = Var$) (общий случай изучения движения исполнительного органа машины).

Ниже рассмотрим испытания многокоординатного станка с ЧПУ на геометрическую точность на холостом ходу при движении по эталонной траектории ГОСТ ISO 230-4– 2015 (нагружение «д»). Этот вид испытаний является наиболее раз-

витым и информативным и широко применяется в станкостроении.

На рис. 5 а представлен прибор мод. KGM 181 (KGM 182) Grid Encoders (Dr. Johannes Heidenhain GmbH) [8]. Он позволяет измерять отклонения воспроизведения траектории в плоскости с точностью ± 2 мкм на скорости до 80 м/мин. Считывающая головка устанавливается в шпиндель станка и совершает плоскопараллельное движение относительно измерительной «решетки», нанесенной на диск, устанавливаемый на столе станка.

На рис. 5 б представлен прибор QC-10 компании Renishaw [9], получивший название ballbar и широкое применение для измерения отклонений от «эталонной окружности» на станке с ЧПУ. На рис. 5 в представлены результаты измерения отклонений от эталонной окружности в пл. XY на скорости обхода контура $S = 1000$ мм/мин на станке мод. MC-300 (ОАО НИАТ). Отличительной особенностью данного прибора является наличие развитого программного обеспечения, позволяющего проводить диагностику причин (рис. 5 г), вызывающих отклонения воспроизведения окружности на станке. Кроме того, этот прибор отличается простотой в эксплуатации и достаточной точностью измерения ($\pm 1,0$ мкм). Однако, несмотря на многочисленные попытки, создать простую и удобную методику оценки (испытаний) на точность поворотных столов и головок 5-координатных станков с ЧПУ с использованием прибора ballbar к настоящему времени не удалось.

ИСПЫТАНИЯ СТАНКА НА ТОЧНОСТЬ ПРИ ДВИЖЕНИИ ПО ЗАДАННОЙ ТРАЕКТОРИИ ПРИ РЕЗАНИИ (СОСТОЯНИЕ 4)

Влияние квазистатической составляющей инерционных, кориолисовых сил и сил резания на точность воспроизведения заданной траектории в настоящее время оценивается, в основном, двумя способами:

1. с помощью интегральной статической жесткости несущей системы станка;
2. обработкой испытательных образцов.

В настоящее время отказались от нормирования жесткости станков несмотря на то, что кривые ста-

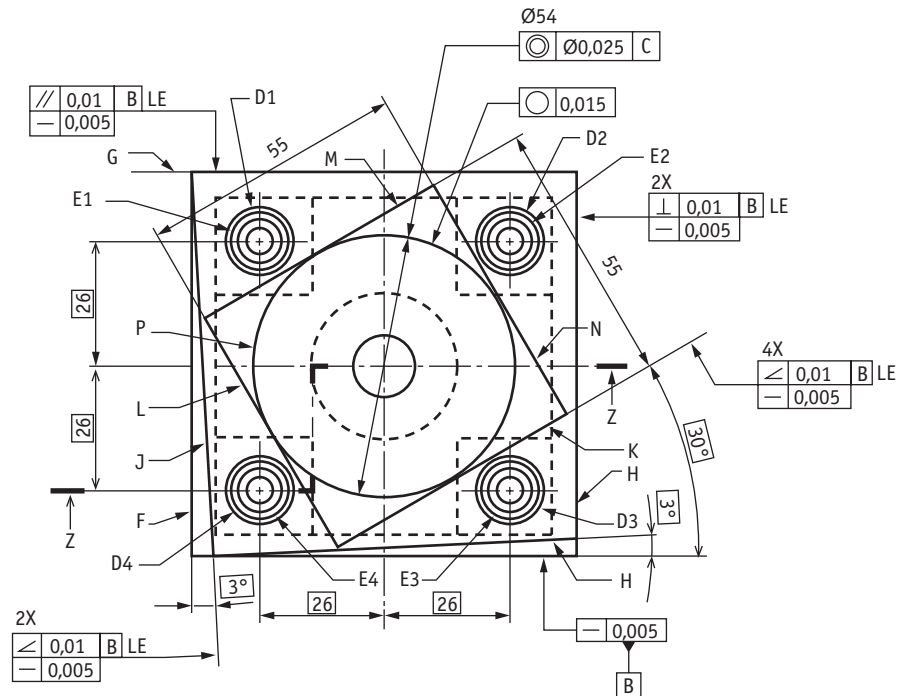


Рис. 6. Чертеж испытательного образца с указанием норм точности

тической жесткости являются очень информативными об упругих и демпфирующих свойствах несущей системы станка, особенно, если кривые «сила – отклонение» представлены в виде «петли гистерезиса». Крутизна кривой характеризует «сопротивляемость» приложенным нагрузкам, а площадь петли – демпфирующие возможности. Испытания на жесткость несущей системы станка целесообразно проводить в заводских станочных лабораториях при обширных испытаниях опытного образца станка новой конструкции.

Обработка испытательного образца как вид испытаний станков является наиболее объективным видом испытаний на точность, но в то же время отличается большими затратами по времени и стоимости.

К настоящему времени в РФ принят стандарт «ГОСТ ISO 10791-7-2016. ЦЕНТРЫ ОБРАБАТЫВАЮЩИЕ. Условия испытаний. Часть 7. Точность обработки испытательных образцов». Он распространяется на стандартные испытательные образцы, а также определяет характеристики и размеры самих испытательных образцов и минимальные требования для оценки точности обработки станка. Настоящий стандарт распространяется на обрабатываемые центры с 3–5 координатами (Дата введения – 2018.07.01).

На рис. 6 показан испытательный образец ГОСТ ISO 10791-7, M1_80, который хорошо подходит для исследования точности 3-координатных станков с ЧПУ и частично удовлетворяет оценке 5-координатных станков с ЧПУ.

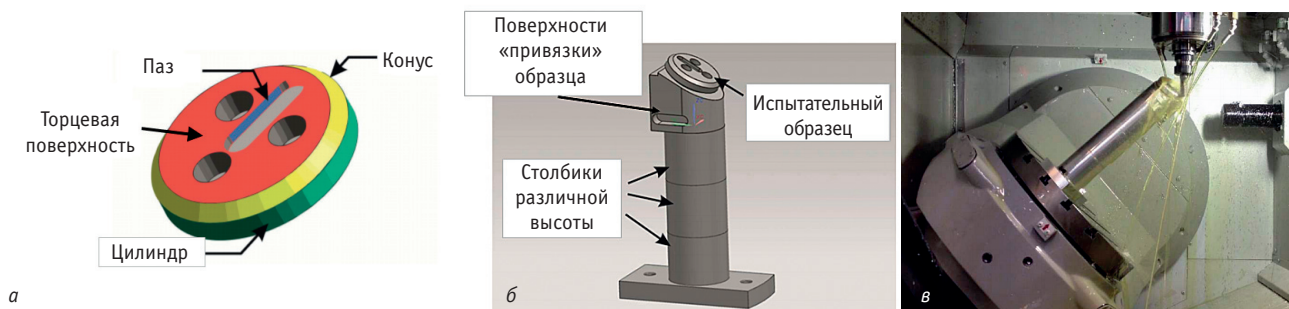


Рис. 7. Испытательный образец для 5-координатных станков [10]

Продолжается создание новых испытательных образцов для контурной обработки сложных пространственных поверхностей на 5-координатных станках с ЧПУ. На рис. 7 в качестве примера представлен один из предлагаемых испытательных образцов для проверки 5-координатных станков [10]. Испытательный образец имеет четыре обрабатываемые поверхности (рис. 7 а): торцевая поверхность – красная, коническая поверхность – желтая, цилиндрическая поверхность – зеленая и плоская поверхность в пазе – голубая. Испытательный образец обрабатывается на трех разных высотах (рис. 7 б). На рис. 7 в показан общий вид обработки испытательного образца на самой большой высоте на 5-координатном станке. В работе [10] представлены результаты испытаний одного из экземпляров 5-координатного станка с ЧПУ.

Выводы:

1. Испытания станков с ЧПУ являются важным этапом их создания.
2. Необходимо создать методику и средства измерения для оперативной оценки точности (диагностирования) 5-координатных станков в режиме холостого хода аналогично диагностике с помощью прибора ballbar.
3. Наряду с применением ГОСТ ISO 10791-7, M1_8 необходимо дальнейшее совершенствование методики испытания 5-координатных станков методом обработки испытательных образцов.

ЛИТЕРАТУРА

1. www.RusCable.Ru
2. **Проников А. С.** Программный метод испытания металлорежущих станков. — М.: Машиностроение, 1985. 288 с.
3. **Серков Н. А.** Точность многокоординатных машин с ЧПУ: Теоретические и экспериментальные основы. — М.: ЛЕНАНД, 2015. 304 с.
4. Руководство по эксплуатации лазерного интерферометра ML10 / Laser system manual; On-line

instruction for ML10, EC10, Laser10 software and system accessories: Renishaw plc, Version 6. January 2002.

5. XD LASER MEASUREMENT SOLUTION // [сайт]. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.apisensor.com/xd-laser>. (дата обращения: 06.11.2016).
6. **Longstaff A. P., Fletcher S. and Myers A.** Volumetric compensation for precision manufacture through a standard CNC controller // [сайт] [Электронный ресурс]. URL: http://www.aspe.net/publications/Annual_2005/POSTERS/2EQUIP/2CTRL/1759.PDF (дата обращения: 13.09.2018).
7. **Ramesh R., Mannan M. A., Poo A. N.** Error compensation in machine tools — a review: Part I: geometric, cutting-force induced and fixture-dependent errors // International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2000. V. 40. July. I. 9. P. 1235–1384.
8. Measuring Systems for Inspecting Linear Axes KGM 181 and KGM 182 Grid Encoders / Проспект прибора для измерения отклонений воспроизведения траектории в плоскости ф. DR. JOHANNES HEIDENHAIN GmbH // [сайт]. [Электронный ресурс]. URL: http://www.heidenhain.de/fileadmin/pdb/media/img/208871-28_Measuring_Devices_For_Machine_Tool_Inspection_and_Acceptance_Testing.pdf (дата обращения: 06.11.2016).
9. Руководство по эксплуатации прибора оценки точности отработки окружности / QC 10 ballbar user guide; Ballbar 5 YPS software: Renishaw plc, Version 5.06.
10. **Gebhardt M., Knapp W., Wegener K.** 5-Axis Test-Piece — Influence of Maching Position/ 2012 The Proceedings of MTTRF 2012 Annual Meeting.]. [Электронный ресурс]. URL: https://pdfs.semanticscholar.org/5b23/2b0571abbbe2d064d3b8e83ab273af20b678.pdf?_ga=2.260191757.1231826949.1536867754-1234190489.1536867754 (дата обращения: 13.09.2018).

СЕРКОВ Николай Алексеевич –

доктор технических наук, ведущий научный сотрудник ИМАШ РАН