

# Управление точностью металлорежущих станков. Структурно-параметрические методы

## Часть 1

А. П. Кузнецов

Обоснована классификация моделей точности металлорежущих станков на три группы, характеризующиеся количеством и видом входящих составляющих, а также достигаемым результатом. Предложена схема выбора системы снижения, коррекции, компенсации и управления точностью станка, с учетом двух классов систем управления точностью.

**Ключевые слова:**

точность станка и детали, информационный и технологический образ изделия, система управления точностью станка

УДК 539.232 | ВАК 05.02.07

DOI: 10.22184/2499-9407.2022.26.1.60.67

*«Геометрия есть знание величин, фигур и их границ, а также отношений между ними и производимых над ними операций, разнообразных положений и движений, она начинается с неделимой точки, завершает объемными фигурами и исследованием многообразных различий между ними...»*

Прокл

В настоящее время применение методов управления погрешностями станка является широко распространенным способом, используемым для повышения его точности. В предыдущие годы ошибки станка сводились к минимуму за счет повышения точности деталей станка и технологии его сборки, а также частично путем использования свойства и модели оценок конструктивных вариантов при проектировании станков, что имеет ограничения, обусловленные существующими и современными методами проектирования. Достигнутый уровень точности был обусловлен улучшением геометрии, качества поверхности и взаимного расположения составных частей станка.

Однако практическая реализация этого направления в основном ограничена и связана с физическим пределом

повышения точности обработки. Принципиально можно добиться дальнейшего повышения точности обработки деталей, механизмов и узлов станка, однако это приведет к резкому увеличению затрат. Поэтому для повышения точности станков становятся все более привлекательными исследования методов управления или компенсации ошибок. Это также обуславливается тем, что стало возможным применение «не механических» средств, систем и иных цифровых инструментов для реализации принципов и методов управления станками, их деталями, узлами, механизмами, системами и устройствами.

На рис. 1 приведена обобщенная принципиальная схема изменения точности металлорежущего станка, построенная исходя из его функционального назначения – обеспечение

требуемого или идеального взаимного относительного движения инструмента и заготовки, являющихся конечными звеньями в цепи формообразования поверхностей обрабатываемых на станке деталей, формирования их размеров, свойств и характеристик.

В этом и состоит принципиальное понятийное сходство и отличие от точности металлорежущего станка и обрабатываемой на станке детали. В этом также заключается различие подходов к понятию «точность» у потребителей и производителей станков. Задача состоит в том, чтобы найти, обосновать и определить соответствие показателей, параметров и характеристик станка как процесс их отображения (или преобразования) в требуемые параметры, характеристики и свойства получаемых на станке деталей. Этот факт также обуславливается тем, что требования к параметрам, характеристикам и свойствам деталей объективно определены стандартами ИСО серии 14660 и 1101, часть из которых адаптирована и принята в РФ:

- ГОСТ 31254-2004 (ИСО 14660-1:1999, ИСО 14660-2:1999) «Основные нормы взаимозаменяемости. Геометрические элементы. Общие термины и определения»;
- ГОСТ Р 53442-2015 (ИСО 1101:2012) «Основные нормы взаимозаменяемости. Характеристики изделий геометрические. Установление геометрических допусков. Допуски формы, ориентации, месторасположения и биения».

В то же время показатели, параметры и характеристики станка и его точности определены стандартами ИСО серии 230, часть из которых адаптирована и принята в РФ: ГОСТ ISO 230-1-2018 «Нормы и правила испытания станков. Часть 1. Геометрическая точность станков, работающих на холостом ходу или в квазистатических условиях».

Базируясь на таких представлениях точности станка, принят стандарт по некоторым видам коррекции геометрических погрешностей станка – ГОСТ ISO / TR 16907-2017 «Станки металлорежущие. Коррекция геометрических погрешностей с помощью ЧПУ».

Необходимо обратить внимание на некоторое расхождение терминов в международном стандарте ISO / TR 16907-2017 “Machine tools – Numerical compensation of geometric errors” и его адаптированном изложении на русском языке. В оригинале использован термин compensation, что должно быть переведено как «компенсация», а не «коррекция», к тому же термин Numerical compensation имеет более широкое толкование, чем только ЧПУ, соответствующее CNC – цифровое или числовое программное управление. Поэтому ниже приведены термины, которые будут использованы в данной статье (см. рис. 1):

- **снижение** (reduce или decrease) параметров и характеристик точности станка – совокупность операций или действий, направленных на уменьшение или снижение влияния величины, значений параметров и протекания свойств объекта при помощи систем или устройств;
- **коррекция** (correction, поправка, исправление) параметров и характеристик точности станка – совокупность операций или действий, направленных на изменение или поправку величины, значений параметров протекания свойств объекта при помощи устройств с легко изменяемыми параметрами и характеристиками;
- **компенсация** (compensation, возмещение) параметров и характеристик точности станка – совокупность

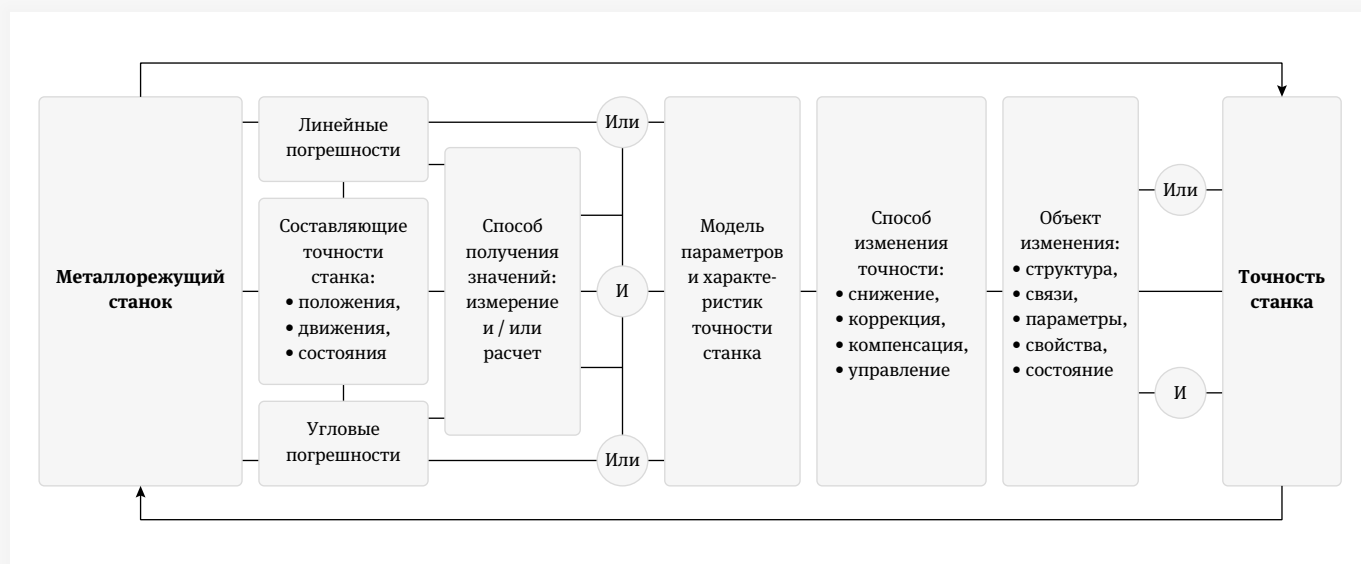


Рис. 1. Схема управления точностью металлорежущего станка

операций или действий, направленных на восстановление, возмещение изменений свойств объекта непосредственно или косвенно;

- **управление** (control) параметрами и характеристиками точности станка – совокупность операций или действий, обеспечивающих автоматическое воздействие на объекты для формирования у них заданных параметров, характеристик и свойств.

Непосредственная оценка характеристик точности станка дает возможность проводить качественное и количественное определение влияния различных конструктивных, технологических и иных факторов на точность обрабатываемых изделий и создает все необходимые предпосылки для разработки средств и методов управления рассматриваемыми свойствами точности станка при проектировании, изготовлении и эксплуатации. Однако эта оценка точности станка не может гарантировать стабильную точность обработки в определенном диапазоне даже на станках, выпускаемых одним заводом.

Очевидно, что само понятие «точность» и его содержание в этом случае расходятся и требуют создания моделей соответствия. На рис. 2 схематически проиллюстрирован принцип создания концепции и методического подхода для достижения обоснованного решения и создания методов достижения соответствия между точностью станка и обработанной детали, а различные аспекты таких решений отражены в работах [1–6].

Технологический процесс считается завершенным тогда и только тогда, когда достигается равенство информации, заключенной в материальном объекте (изделии), и информации, заданной в виде чертежа изделия, – **информационной модели** материального объекта [4]. Не соответствие (отклонение) информации, заключенной в материальном объекте, о свойствах этого объекта, аналогичной информации о свойствах объекта, заключенной в чертеже изделия, характеризует качество технологического процесса. Информация о геометрических параметрах, форме, структуре и свойствах изделия, заключенная в его чертеже, является **информационным образом** изделия. Информация о последовательности преобразования материи, энергии и информации, заключенная в документах, определяющих модель достижения равенства информации материального объекта (изделия) и его информационного образа – **технологический образ** изделия.

Информационный образ изделия можно представить состоящим из множества единичных информационных образов, характеризуемых минимальной однородностью качественной и количественной информации и способом ее преобразования. Тогда технологический образ изделия также может быть представлен состоящим из множества единичных технологических образов.

Следовательно, интегральным выходным параметром технологической системы является изделие, свойства которого характеризуют ее качество.

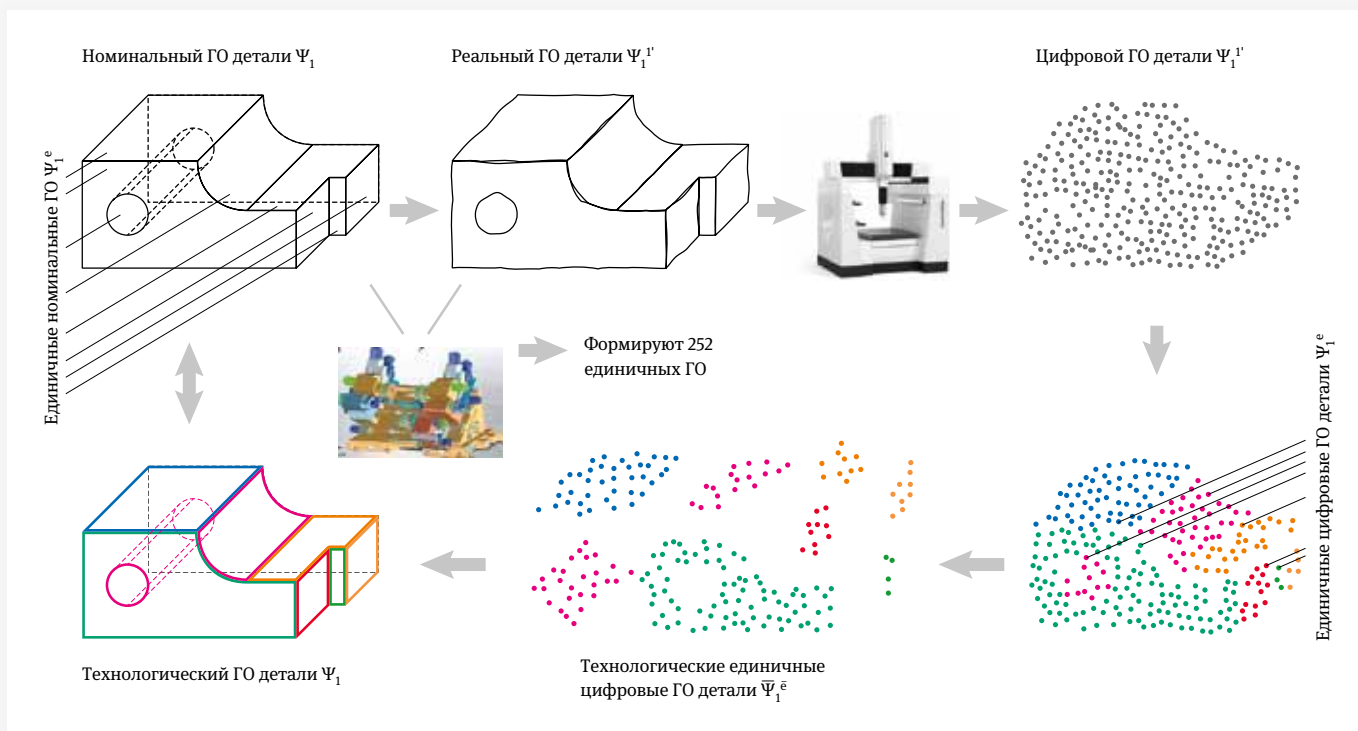


Рис. 2. Концепция достижения соответствия между точностью станка и обработанной детали

Металлорежущий станок, объединяющий в себе все элементы технологической системы и обеспечивающий их последовательное и взаимосвязанное функционирование для получения изделия, в течение всего периода выполнения заданного технологического процесса является единственным элементом технологической системы, который полностью формирует геометрический образ (ГО) изделия [2–6].

Поэтому интегральным выходным параметром металлорежущего станка целесообразно считать ГО, по свойствам которого можно судить о его качестве (рис. 2).

Свойства геометрического образа есть признак «понятный», дающий представление о различных его сторонах и определяющий совокупность присущих ему качеств (например, размер, форма и т.п.). Различные свойства геометрического образа могут быть выражены количественно. Несоответствие количественного выражения, рассматриваемого свойства, его заданному (номинальному) значению, то есть информационному образу, характеризует вид, характер и величину отклонения данного свойства. Степень отклонения получаемых свойств геометрического образа, формируемого станком, характеризует его качество. Количественно степень этого несоответствия определяется отклонением фактически достигнутых свойств геометрического образа и, соответственно, аналогичных им заданных свойств информационного образа изделия.

Геометрический образ изделия  $\Psi_1$ , формируемый металлорежущим станком без выполнения технологического процесса резания, образуется такой же совокупностью одновременных взаимосвязанных относительных движений рабочих органов станка, как и при выполнении физического процесса формообразования. Следовательно, возникающие при этом отклонения свойств геометрического образа определяются и обуславливаются только факторами и процессами, протекающими в станке при его работе.

Изделие, как материальное образование, при функционировании всей технологической системы формируется во множестве  $\Psi$  геометрических положений точек рабочего объема станка. Множество  $\Psi$  состоит из:

- множества  $\Psi_1$  – геометрического места точек собственно изделия;
- множества  $\Psi_2$  – геометрического места точек, которое занимал бы рабочий инструмент в процессе выполнения физического процесса резания (формообразования) при воздействии на обрабатываемый материал;
- множества  $\Psi_3$  – геометрического места точек рабочего пространства, в котором отсутствует взаимодействие рабочего инструмента и изделия, а осуществляются лишь установочные и вспомогательные перемещения. Объединение указанных множеств представляет и образует собой геометрическое место

точек рабочего объема станка, в котором формируются свойства обрабатываемых изделий и геометрических образов.

Геометрический образ изделия  $\Psi_1$  может быть представлен в виде совокупности (множества) **единичных геометрических образов** ( $\Gamma O^e$ ),  $\Psi_i^e$  последовательно формируемых станком в его рабочем объеме. Единичные геометрические образы характеризуются единством элементов, их связей и отношений, последовательностью, формой и законом взаимодействия. Единичные геометрические образы, полученные различными способами, могут иметь одинаковый вид (например, цилиндр может быть получен разными способами), но их свойства будут зависеть от способа их получения (рис 3). Тогда общее число наиболее характерных видов единичных геометрических образов, обусловленных первыми четырьмя видами множества  $\Psi_2$ , будет равно 252, или в общем виде количество геометрических образов будет равно:

$$N(\Psi^e) = K(\Psi_2) \cdot \sum_{i=1}^6 C_6^i,$$

где  $K(\Psi_2)$  – количество видов множества  $\Psi_2$ . Часть идеальных (номинальных) геометрических образов 1-го порядка, формируемых станком, для различных видов множества  $\Psi_2$  приведена на рис. 3.

Общее структурное уравнение единичных геометрических образов [2–4] в матричном виде будет определяться следующим выражением:

$$\Psi^e = M_n^p \cdot M_n^d \cdot \dots \cdot M_1^p \cdot M_1^d \cdot M[\Psi_2],$$

где  $n$  – число координатных систем;  $M_n^p$  – матрица взаимных относительных исходных положений координатных систем;  $M_n^d$  – матрица взаимных относительных движений координатных систем;  $M[\Psi_2]$  – матрица движущегося объекта (точка, линия и т.п.). Если единичный геометрический образ определяется как огибающая семейства кривых, то его уравнение находится путем решения системы:

$$f(x, y, t) = 0 \text{ и } \partial f(x, y, t) / \partial t = 0,$$

а при параметрическом задании кривых  $x = x(u, v)$ ;  $y = y(u, v)$  необходимо исключить из исходных уравнений любой из параметров, решая уравнение:  $(\partial x / \partial u)(\partial y / \partial v) - (\partial x / \partial v)(\partial y / \partial u) = 0$ .

Цифровой ГО изделия получаем при измерении на контрольно-измерительной машине (КИМ) множества точек каждой поверхности единичных ГО изделия после обработки на станке, а преобразование цифрового двойника ГО° станка в цифровой образ детали должно соответствовать их аналогичным параметрам и характеристикам детали (см. рис. 2).

Точность как понятие содержательно отражает свойство размера (линейная или векторная величина), а также содержательно отражает свойства и характеристики законов положения, движения, состояний, взаимодействий.

Поэтому необходимо различать следующие дефиниции понятия «точность»:

- точность изделия;
- физически (реально) достижимая точность;

- энергетически достижимая точность;
- точность физического процесса;
- технологическая точность;
- точность машины, оборудования, производственной системы;
- структурная точность;
- эффективная точность и т. п.

Иными словами, точность, как свойство системы, при системном рассмотрении также является результатом

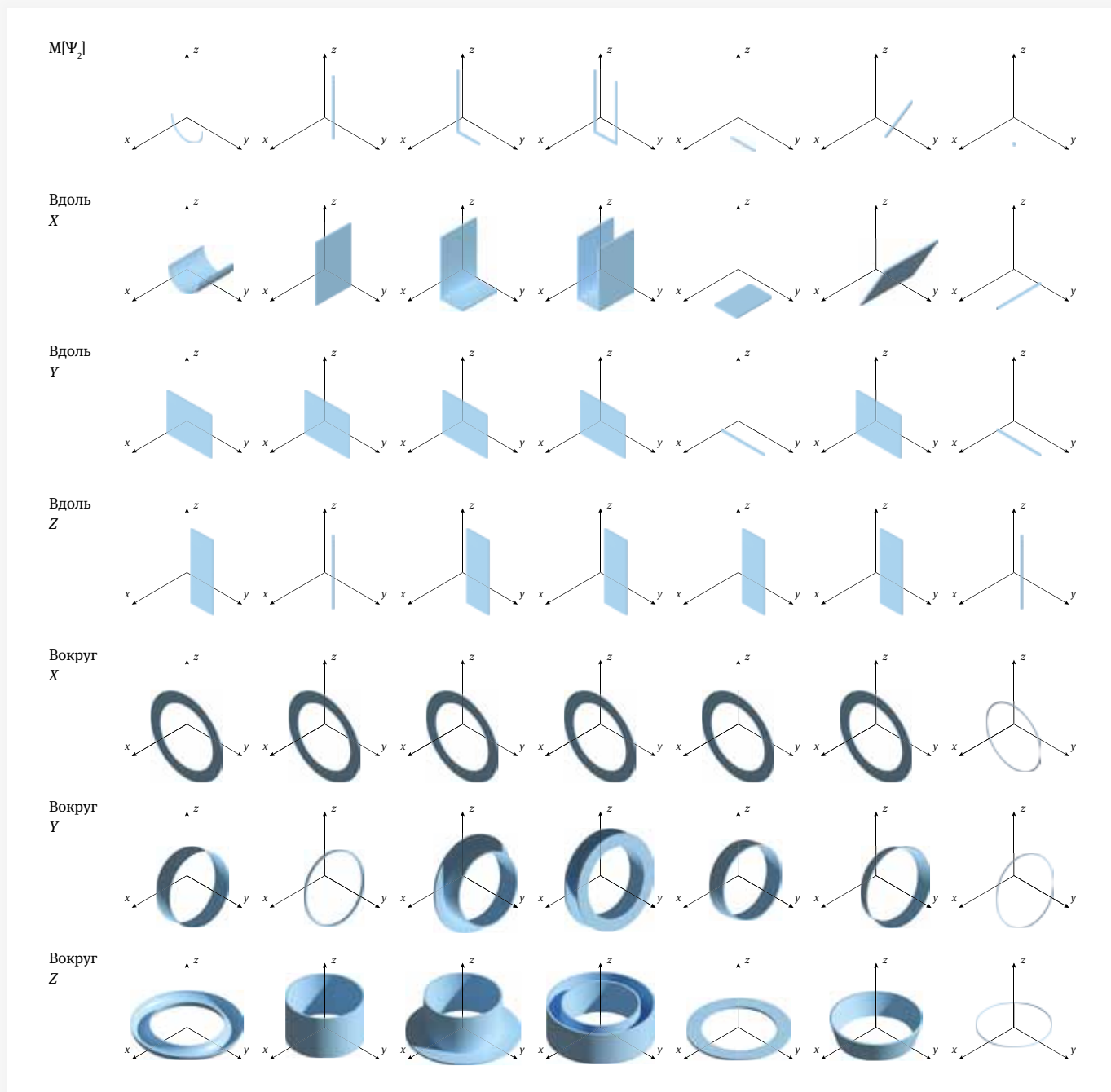


Рис. 3. Номинальные единичные геометрические образы  $\Psi_i^e$

отражения взаимодействия структурных связей и отношений элементов системы, которые в данном случае порождают новую систему, основным свойством которой является точность.

Таким образом, **точность** (accuracy) – степень соответствия свойств(а) предмета, объекта, системы, процесса, явления его номинальному, заданному, установленному, допустимому, идеальному значению или закону.

**Информационное определение:** точность – разность информационного содержания о свойствах объекта его реальному, фактическому значению.

**Математическое определение:** точность – отклонение детерминированное, векторное или отклонение величины поля состояния свойств объекта относительно его теоретического описания.

**Структурное определение:** точность – степень отклонения связей и / или отношений между элементами структуры.

Элементами структуры понятия точности как системы являются их погрешности, ошибки (error) и отклонения их свойств в поле состояний объекта.

Выходной параметр станка – точность (accuracy), характеризующий функциональное свойство станка, будет определяться способностью станка как системы сохранять требуемые положения, связи и отношения неподвижных и подвижных деталей и узлов, обусловленные их функциональными назначениями для осуществления требуемых функций и законов поведения.

Напомним некоторые определения понятий [1], характеризующих структурные составляющие, которые будут формировать и описывать оборудование как последовательность взаимосвязанных объемов: объем детали – рабочий объем – объем оборудования.

**Деталь** – объем, в котором выполняются преобразования множеств единичных геометрических объектов: точки, линии, кривой линии и т.п., которые формируют геометрический образ изделия (детали).

В более общей формулировке деталь – это геометрический образ координатных систем и их преобразований.

**Рабочий объем** – пространство, в котором происходит формирование свойств детали: геометрии, формы, поверхности, структуры, положения, состояния.

**Оборудование** – это такой объем пространства, в котором вокруг рабочего объема размещены обобщенные модули движения / положения.

**Модуль движения / положения** – последовательное размещение элементов, которые отражают матрицы единичного движения / положения. Модуль состоит из семи составляющих:

- базового, в котором отсутствует движение;
- трех модулей движения / положения – линейного;
- трех модулей движения / положения – поворота (вращения).

**Движением** будем называть преобразование, при котором расстояние между любыми двумя точками равно расстоянию между их образами. Тогда, очевидно, и наоборот также является движением.

**Положением** будем называть преобразование, которое изменяет ориентацию образа.

Следовательно, любое движение является либо параллельным переносом, либо поворотом, либо симметрией, либо композицией симметрии и параллельного переноса на вектор, параллельный оси симметрии (теорема Шалля).

Металлорежущий станок можно также рассматривать как систему, состоящую из множества элементов, заданным образом занимающих друг относительно друга пространственное положение, часть из которых может осуществлять относительные движения. В этом случае, координатная система детали будет представлена в оборудовании элементами движения в виде направляющих – как линейных, так и вращения, а также в виде цилиндрических, круговых или кольцевых направляющих, то есть направляющие являются материальным эталоном координатных систем и, следовательно, они выполняют те же функции преобразований.

Так, местоположение и направление координатных осей могут быть определены или как линия, лежащая на плоскости направляющей или как линия пересечения плоскостей, построенных на направляющих. Тогда все геометрические несоответствия координатных систем идеальных (геометрически) и реальных (номинальных) обуславливают и отображают это несоответствие и проявляются в виде погрешностей и отклонений координатных осей, плоскостей и направлений (ориентаций). Следовательно, неточности изготовления направляющих и их взаимная ориентация (например, при сборке) приводят к геометрическим погрешностям станка, а геометрически идеальная координатная система станка является трудно реализуемой на практике задачей.

По причине возникновения отклонений выходные параметры можно разделить на три группы: **положения, движения, состояния**.

**Погрешности положения** обусловлены ошибками изготовления и монтажа, а также искажениями при эксплуатации узлов и деталей станка. К ним относятся такие погрешности, как, например, отклонение от перпендикулярности оси шпинделя к плоскости стола, отклонение от параллельности оси шпинделя направляющим, отклонения от параллельности / перпендикулярности направляющих и т.п.

Исходя из функционального назначения элементов станка, погрешности (ошибки, error) положения определяют в виде характеристик взаимных положений в выбранной системе координат таких типовых геометрических элементов, как «точка – точка», «точка – линия»,

Таблица 1. Характеристики геометрических объектов

Положение	$F(u) = F(x, y, z) = 0;$ $F(u^1) = F^1(x^1, y^1, z^1) = AF(x, y, z) + \xi;$ $A = \frac{dF(u^1)}{du};$ $J = \det A \neq 0$	
Движение	Траектория	$\sum \left\{ \frac{d}{dt} \left( \frac{dL}{dq_i} \right) - \frac{dL}{dq_i} = Q_i \right\}$
	Динамика	$\sum F = \sum ma;$ $m \frac{d^2 u}{dt^2} + b \frac{du}{dt} + ru + f = 0;$ $u \wedge (\nabla) u^1$
Состояние	Стационарное	$\frac{d^2 \Omega}{du^2} = 0;$ $\Omega = \Omega_0 \Big _{u=u_0};$ $\frac{d\Omega}{du} = p \vee k \Delta \Omega$
	Нестационарное	$\frac{d^2 \Omega}{du^2} = \frac{d^2 \Omega}{dt^2};$ $\Omega = \Omega_t \Big _{t=t_0};$ $\frac{d\Omega}{du} = p \vee k \Delta \Omega$

«линия – линия», «линия – плоскость», «плоскость – плоскость» и т. п.

**Погрешности движения** обусловлены ошибками изготовления, монтажа и управления подвижными элементами станка при их взаимодействии в процессе движения для выполнения заданного закона движения в соответствии с функциональными требованиями к нему. К ним относятся погрешности (ошибки, errors): кинематические, функционирования, траектории движения рабочих органов, позиционирования, прямолинейности, скорости, ускорения и т. п. Следовательно, любые отклонения как в пространстве, так и во времени от заданного закона изменения таких их типовых геометрических элементов, как точка, линия, плоскость, объем, или взаимного относительного движения подвижных деталей и узлов станка (или их центра масс) в выбранной системе координат типовых геометрических элементов («точка – точка», «точка – линия», «точка – плоскость», «линия – линия», «линия – плоскость», «плоскость – плоскость»),

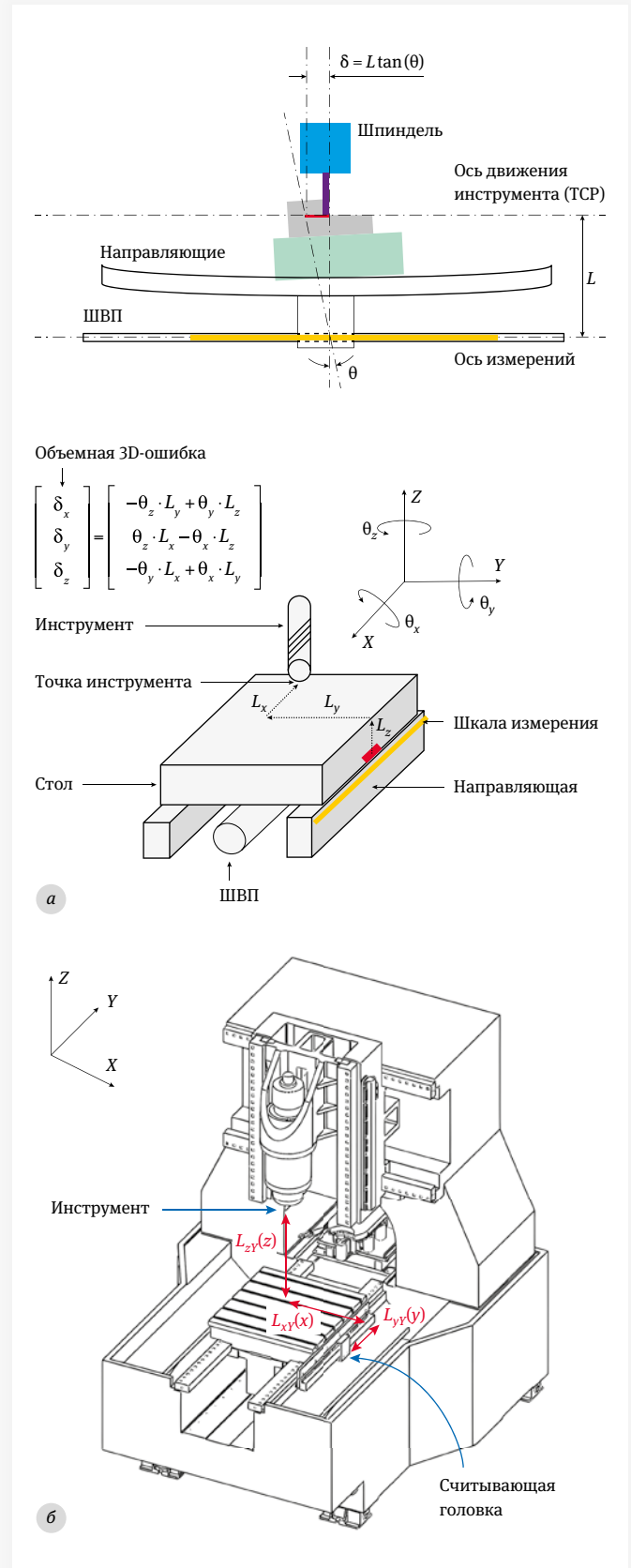


Рис. 4. Погрешность Аббе: а – принцип проявления в 1D; б – принцип проявления в станке (3D) [12, 13]

**Таблица 2.** Геометрические погрешности по стандарту

Наименование и обозначение оси	Обозначение геометрической погрешности по ГОСТ ISO 230-1-2018
Ось X	$E_{xx} E_{yx} E_{zx} E_{Ax} E_{Bx} E_{Cx} E_{Box} E_{Cox} E_{xox}$
Ось Y	$E_{xy} E_{yy} E_{zy} E_{Ay} E_{By} E_{Cy} E_{Aoy} E_{Coy} E_{yoy}$
Ось Z	$E_{xz} E_{yz} E_{zz} E_{Az} E_{Bz} E_{Cz} E_{Aoz} E_{Boz} E_{Zoz}$
Ось A	$E_{xA} E_{yA} E_{zA} E_{AA} E_{BA} E_{CA} E_{yOA} E_{zOA} E_{BoA} E_{CoA} E_{AoA}$
Ось B	$E_{xB} E_{yB} E_{zB} E_{AB} E_{BB} E_{CB} E_{xOB} E_{zOB} E_{AoB} E_{CoB} E_{BoB}$
Ось C	$E_{xC} E_{yC} E_{zC} E_{AC} E_{BC} E_{CC} E_{xOC} E_{yOC} E_{AoC} E_{BoC} E_{CoC}$

которые обуславливают и отражают требуемые функциональные законы их движения.

К **погрешностям состояния** относят отклонения свойств, параметров и характеристик узлов и деталей станка и их взаимных положений, движений, вызванные изменением их состояния вследствие статических и динамических воздействий на них силовых, тепловых и других форм и видов энергии, в их числе, например, вибрации, упругие и тепловые деформации, износ и т. п.

Тогда характеристики положения, движения или состояния деталей и узлов металлорежущих станков – твердых тел как геометрических объектов – могут быть измерены или описаны аналитическими зависимостями, определяются геометрическими параметрами и функциональными законами, обусловленными их назначением, положением в пространстве и их изменением во времени вследствие внутренних и внешних силовых и тепловых воздействий (табл. 1).

**Таблица 3.** Соотношения стандартов точности и методов управления ею

	Положение	Движение	Состояние
Стандарт	230-1, 230-7, 230-9, 230-10, 10791-7, 16907	230-1, 230-2, 230-4, 230-6, 230-7, 230-9, 230-10, 10791-6, 16907	230-3, 230-8, 230-9, 230-10, 10791-10, 16015
Управление	–	–	+
Компенсация	+	+	+
Коррекция	–	+	+
Снижение	–	+	+

Все это формирует и определяет совокупность погрешностей (ошибок, error) – составляющих параметров общей точности металлорежущего станка: геометрических, кинематических, упругих, динамических, температурных погрешностей, а также погрешностей управления (аппроксимации) и Аббе (из-за качания подвижного органа относительно горизонтальной и вертикальной осей), которые в отдельности в достаточной степени описаны (рис. 4), систематизированы и представлены в большей части в отечественных и зарубежных стандартах.

Перечисленные погрешности зависят от многих факторов, поэтому они являются функциями состояний узлов и деталей (элементов) станка. Под состоянием в широком смысле понимается совокупность пространственных, временных и энергетических параметров, определяющих значения данной функции (параметра, погрешности, ошибки). Областью состояний для одноименной погрешности является множество значений погрешности внутри рабочего объема станка.

Исходя из вышеприведенной расшифровки понятия «точность» в табл. 2 приведены обозначения элементарных геометрических погрешностей станка, а в табл. 3 – оцениваемые и измеряемые в соответствии со стандартами параметры и характеристики, обуславливающие отдельные свойства и содержание значений их величин, которые формируют выходную точность станка в системах управления точностью станков.

### Литература

1. **Кузнецов А. П.** Структуры процессов и оборудования обработки резанием. Ч. 4. Структуры оборудования обработки резанием. М.: Вестник Машиностроения, 2015. № 5. С. 63–77.
2. **Проников А. С., Стародубов В. С., Кузнецов А. П.** Методические указания 1-я редакция. Надежность в технике. Технологические системы. Расчет и оценка показателей параметрической надежности технологического оборудования с ЧПУ / М.: ВНИИММаш ГОССТАНДАРТ СССР, 1980. 114 с.
3. **Кузнецов А. П.** Методы оценки и контроля качества металлорежущих станков с ЧПУ. М., ВНИИТЭМР, 1985. 68 с.
4. **Кузнецов А. П.** Тепловое поведение и точность металлорежущих станков. М.: Янус-К, 2011. 256 с.
5. **Portman V., Inasaki I., Sakakura M. and Iwatate M.** (1998) Form-Shaping System of Machine Tools: Theory and Applications. Annals of the CIRP, 47, 1998, 329–332.
6. **Portman V. T.** Mechanics of accuracy in Engineering design of Machines and Robots. Volume 1. Nominal functioning and geometric accuracy. ASME Press. 2018. 470 p.

### Автор

**Кузнецов Александр Павлович** – доктор технических наук, профессор кафедры станков МГТУ «СТАНКИН»