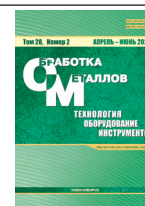




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Теоретическое обоснование расчёта абсолютной координаты инструмента при размерной настройке станков с ЧПУ для реализации безлюдных технологий

Александра Акинцева^{a, *}, Павел Переверзев^b

Южно-Уральский государственный университет, пр. Ленина, 76, г. Челябинск, 454080, Россия

^a  <https://orcid.org/0000-0001-8881-8461>,  akintsevaav@susu.ru; ^b  <https://orcid.org/0000-0002-1416-8918>,  pereverzevp@susu.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.923.9

История статьи:

Поступила: 31 марта 2026

Рецензирование: 01 апреля 2026

Принята к печати: 16 апреля 2026

Доступно онлайн: 15 июня 2026

Ключевые слова:

Размерная настройка

Абсолютная координата инструмента

Граница 0-0

Стационарная координатная база

Ресурс точности

Цифровой разрыв

Безлюдные технологии

Станки с ЧПУ

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-01614, <https://rscf.ru/project/25-29-01614/>.

АННОТАЦИЯ

Введение. Ключевым препятствием на пути к созданию «умных» машиностроительных предприятий и реализации безлюдных технологий является «цифровой разрыв» на этапе размерной настройки станков с ЧПУ. Проектный контур технологической подготовки производства (ТПП) полностью оцифрован, однако финальный расчет настроечных координат инструмента до сих пор выполняется эмпирически, методом пробных проходов. Это связано с отсутствием теории, описывающей поведение нестационарного поля допуска партии заготовок в абсолютной системе координат станка. **Цель работы.** Теоретическое обоснование существования и единственности абсолютной координаты режущего инструмента, гарантирующей получение годных деталей с первой заготовки для всей партии при действии многокомпонентных погрешностей. **Методологическая основа.** Исследование базируется на системном анализе технологических размерных цепей и теории упругости. Ключевым методологическим приемом является аксиоматический подход: сформулированы четыре базовые аксиомы (о партии деталей, стационарности системы координат станка, нестационарности поля допуска и о формообразовании), которые служат фундаментом для строгого доказательства последующих теорем. **Результаты.** На основе принятых аксиом впервые сформулирована и доказана теорема о существовании стационарной «границы 0-0» в системе координат станка с ЧПУ, которая служит единой координатной базой, связывающей положение нестабильного поля допуска с жесткой системой координат станка. Доказана её единственность как условия минимального гарантированного съема припуска. Выведено уравнение баланса допуска и многокомпонентных погрешностей, являющееся фундаментальным условием реализуемости процесса. Введен и обоснован критерий «ресурса точности», который количественно оценивает запас надежности технологической системы и ограничивает режимы резания. **Научная новизна.** Впервые существование абсолютной настроечной координаты доказано аналитически, исходя из системы аксиом, формализующих нестационарность поля допуска и жесткость системы ЧПУ. Показано, что граница 0-0 является единственной точкой, обеспечивающей детерминированность процесса в условиях параметрической неопределенности. **Практическая значимость.** Разработанная теория создает методологическую основу для построения цифровых двойников операций и интеллектуальных CAM-модулей, позволяющих автоматически рассчитывать настроечные параметры. Это исключает цикл пробных обработок, сокращает время ТПП и является необходимым условием для реализации безлюдных технологий в мелко- и среднесерийном производстве.

Для цитирования: Акинцева А.В., Переверзев П.П. Теоретическое обоснование расчёта абсолютной координаты инструмента при размерной настройке станков с ЧПУ для реализации безлюдных технологий // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2026. – Т. 28, № 2. – С. 99–118. – DOI: 10.17212/1994-6309-2026-28-2-99-118.

Введение

Современный этап развития машиностроения характеризуется стремительной цифровизацией проектных процедур. На этапе технологической подготовки производства (ТПП)

CAD/CAM-системы достигли впечатляющих высот: трёхмерное моделирование, автоматизированное проектирование технологических процессов, расчет траекторий инструмента и генерация управляющих программ для станков с ЧПУ стали повсеместной практикой. Проектный контур ТПП полностью оцифрован. Инженер оперирует виртуальной моделью детали, виртуальной моделью заготовки и виртуальной траекторией инструмента.

Однако при переносе этой виртуальной модели в реальный цех возникает фундаменталь-

*Адрес для переписки

Акинцева Александра Викторовна, к.т.н., доцент
 Южно-Уральский государственный университет,
 пр. Ленина, 76,
 454080, г. Челябинск, Россия
 Тел.: +7 922 633-56-57, e-mail: akintsevaav@susu.ru

ная проблема. Виртуальная траектория, рассчитанная CAD/CAM-системой, не соответствует реальному взаимодействию инструмента с заготовкой, поскольку она не учитывает главного – взаимодействия инструмента с нестабильной физической реальностью: колебаниями припуска в партии заготовок, погрешностями их позиционирования, упругими деформациями технологической системы под действием сил резания, размерным износом инструмента. Системы ЧПУ получают команду переместить узел станка в расчётную точку, но где в этот момент окажется вершина инструмента и где окажется обработанная поверхность с учетом всех перечисленных факторов – остается неизвестным вплоть до момента контрольного замера первой детали [1, 2].

Именно здесь, на стыке идеального цифрового проекта и реального физического процесса, возникает «цифровой разрыв». Суть его в следующем:

- с одной стороны разрыва (что уже оцифровано): геометрия детали, траектория инструмента, управляющая программа (G-код), кинематика станка;

- с другой стороны разрыва (что пока не поддается цифровому моделированию): реальные силы резания и вызываемые ими упругие деформации, фактическое положение поля допуска заготовки в системе координат станка (СКС), варьирующееся от детали к детали, погрешности позиционирования, износ инструмента и геометрическая неточность станка.

Ключевое звено, связывающее эти две стороны, – размерная настройка станка, т. е. определение той самой абсолютной координаты, в которую должна прийти вершина инструмента, чтобы гарантированно получить размер в допуске для всей партии деталей. На сегодняшний день это звено остаётся «белым пятном» в цифровой цепочке. Инструментарий для его расчёта отсутствует. Технолог вынужден полагаться на эмпирику: назначить координату «на глаз», сделать пробную заготовку, измерить, ввести корректор. Это не только увеличивает время и стоимость подготовки производства, но и принципиально несовместимо с концепцией безлюдных технологий.

Безлюдные технологии в современном понимании подразумевают создание «умного

предприятия», где каждое техническое решение принимается на основе цифровой модели, а параметры обработки рассчитываются автоматически, до запуска станка. Без полноценного цифрового двойника операции, учитывающего нестабильные факторы, реализация такой концепции невозможна. Основой цифрового двойника является математическая теория, устанавливающая детерминированную связь между входными параметрами и искомой координатой инструмента. Отсутствие такой теории и формирует тот самый «цифровой разрыв».

Для понимания причин «цифрового разрыва» рассмотрим существующие подходы к прогнозированию точности и размерной настройке. Вопросы автоматизации управления точностью обработки на станках с ЧПУ рассматриваются в работе [1]. Сложившаяся научная парадигма может быть представлена тремя основными направлениями исследований.

Первое направление посвящено моделированию отдельных погрешностей: геометрических ошибок станков [2–4], размерного износа инструмента [5, 6] и упругих деформаций [7, 8]. В работах [2–4] рассмотрен геометрический алгоритм моделирования резания [2], приводится обзор методов компенсации геометрических ошибок [3] и прогнозирование погрешностей при фрезеровании тонкостенных деталей [4]. Исследования износа представлены математической моделью изменения размера деталей при обработке партии [5] и системой контроля состояния инструмента на основе фильтра Калмана [6]. Влияние напряженно-деформированного состояния на точность нежестких деталей исследовано в [7], погрешность схем установки – в [8]. Однако эти исследования фрагментарны и не предлагают комплексного подхода. Зарубежные работы также узконаправленны: компенсация тепловых деформаций [9] не учитывает упругие деформации; обзор методов компенсации [3] требует дорогого оборудования; компенсация погрешностей при фрезеровании тонкостенных деталей [4] неприменима в серийном производстве. В работе [10] отмечено отсутствие комплексных моделей, интегрирующих все виды погрешностей. Более современные обзоры [11] подтверждают необходимость развития виртуальных систем для операций механической обработки.

Классические работы по анализу допусков методом наихудшего случая заложили фундамент для детерминированного подхода к размерным цепям [12–14]. Однако эти методы оперируют стационарными размерными цепями, тогда как предлагаемая теория впервые распространяет принцип наихудшего случая на нестационарное поле допуска в абсолютной системе координат станка. Современные исследования в области анализа допусков [15] также подтверждают актуальность развития детерминированных методов.

В последние годы активно развиваются концепции цифровых двойников в производстве [16–19]. Работы [16–18] заложили теоретическую основу, а [19] адаптировала концепцию для проектирования и производства. Однако существующие цифровые двойники преимущественно ориентированы на геометрическое и тепловое моделирование, оставляя за рамками задачу детерминированного расчёта настроечных координат инструмента. Лишь недавние исследования [20] начинают интегрировать цифровые двойники с задачами мониторинга состояния инструмента на станках с ЧПУ, что подтверждает актуальность предлагаемого подхода.

Второе направление охватывает методы активного и адаптивного управления: активный контроль [21, 22], моделирование точности технологической системы (ТС) [23] и управление резанием [24–28]. Интеллектуальный резец с приборами активного контроля температуры и размеров представлен в [21]. Комплекс контрольно-измерительных процедур для автоматизированного изготовления на станках с ЧПУ, позволяющий автоматически корректировать износ, разработан в [22]. Моделирование показателей точности ТС рассмотрено в [23]. Модель расчета глубины резания в автоматическом цикле подачи предложена в [24]. Однако такие системы требуют дорогого оборудования и носят реактивный характер. Активная компенсация вибраций [25] требует модернизации станка; интеллектуальные системы мониторинга [26] не вышли из лабораторий; косвенное измерение силы резания [27] недостаточно точно; адаптивные системы [28] эффективны лишь для черновой обработки.

Третье направление представлено вероятностно-имитационным моделированием [29].

Статистические методы дают лишь вероятностную оценку, а не детерминированное решение. В русле данных работ находятся исследования по размерно-точностному анализу, например методика автоматического обеспечения точности технологических процессов [30], которая формализует проверку структуры размеров на этапе ТПП. Однако такие методики не учитывают вероятностную природу погрешностей и жесткость системы, что ограничивает их применение для гарантированного расчета настроечных координат. Оценка колебаний припуска методом Монте-Карло [31] не гарантирует точность; вероятностные модели [32] сложны для интерпретации.

Анализ научно-технической литературы показывает, что, несмотря на исследования в области прогнозирования точности и автоматизации размерной настройки станков с ЧПУ, отсутствует целостная теория, связывающая все факторы воедино. Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы.

1. Фрагментарность. Исследования посвящены либо отдельным погрешностям, либо методам управления. Целостная теория, связывающая все факторы, отсутствует.

2. Эмпирический характер настройки. Расчет координат инструмента остается эмпирической процедурой: существующие подходы не дают аналитического решения, гарантирующего обработку всей партии с первой заготовки.

3. Отсутствие учета нестационарности поля допуска. Большинство моделей игнорируют «плавание» поля допуска относительно системы координат станка как ключевой фактор, требующий детерминированного учета.

Целью настоящего исследования является теоретическое обоснование существования и единственности абсолютной координаты режущего инструмента, гарантирующей обработку всей партии деталей без пробных проходов.

Для достижения поставленной цели в работе требовалось решить следующие **задачи**:

- проанализировать природу «цифрового разрыва» в технологической подготовке производства;

- теоретически обосновать существование и единственность стационарной координатной базы («границы 0-0») как условия гарантированного контакта инструмента с любой заготовкой;

– разработать уравнение баланса между полем допуска и суммой многокомпонентных погрешностей, определяющее принципиальную реализуемость процесса;

– ввести критерий «ресурс точности» для количественной оценки запаса надежности технологической системы и ограничения режимов резания;

– разработать замкнутую систему уравнений для расчета абсолютной координаты инструмента, создающую методологическую основу построения цифровых двойников и перехода к безлюдным технологиям.

Методика исследования

Теоретическое обоснование базируется на системном подходе и аксиоматическом методе, который позволяет строго формализовать исходные предпосылки. Для построения теории примем следующие исходные положения, вытекающие из практики машиностроения.

Аксиома 1 (о партии деталей). Партия деталей представляет собой множество заготовок, у которых размеры технологических баз и припусков являются величинами переменными, но их отклонения лежат в известных пределах, заданных чертежом и предшествующими операциями.

Аксиома 2 (о системе координат станка). Система координат станка с ЧПУ является неизменной (стационарной) для всех заготовок обрабатываемой партии.

Аксиома 3 (о нестационарности поля допуска). Положение поля допуска операционного размера относительно системы координат станка при установке каждой новой заготовки изменяется. Это изменение вызвано погрешностями формы и установки заготовки, а также погрешностями приспособления и геометрическими неточностями станка.

В классической теории технологии машиностроения для описания отклонений, связанных с несовпадением баз, используется термин «погрешность базирования». Однако в условиях обработки на станках с ЧПУ при размерной настройке на всю партию деталей необходимо учитывать более широкий круг факторов, включая погрешности формы заготовок в пределах партии, деформации при закреплении, погрешности

установки приспособления и геометрические неточности станка. Все эти факторы в совокупности приводят к смещению (плаванию) поля допуска операционного размера в абсолютной системе координат станка.

Для обозначения этого совокупного эффекта в рамках предлагаемой теории вводится более широкое понятие – **погрешность позиционирования заготовки** ($\Delta_{\text{поз}}$). Этот термин объединяет все факторы, вызывающие нестационарность поля допуска операционного размера в системе координат станка с ЧПУ при смене заготовок в партии. Величина этой погрешности для партии ограничена максимальным значением $\Delta_{\text{поз}}^{\text{max}}$.

В классической технологии машиностроения (см., например, работы Маталина А.А., Балакшина Б.С., Корсакова В.С.) для описания отклонений, возникающих при установке заготовки, используются понятия «погрешность базирования» $\varepsilon_{\text{б}}$ и «погрешность установки» $\varepsilon_{\text{уст}} = \varepsilon_{\text{б}} + \varepsilon_{\text{закр}} + \varepsilon_{\text{пр}}$, где $\varepsilon_{\text{закр}}$ – погрешность закрепления, $\varepsilon_{\text{пр}}$ – погрешность приспособления. Однако в задачах размерной настройки станков с ЧПУ и реализации безлюдных технологий этого аппарата недостаточно, поскольку требуется дополнительно учитывать погрешность формы базовых поверхностей заготовки в пределах партии ($\varepsilon_{\text{фбп}}$), геометрическую неточность станка и его тепловые деформации ($\varepsilon_{\text{ст}}$), погрешность позиционирования исполнительных органов ЧПУ ($T_{\text{тр}}$) и износ опорных элементов приспособления ($\varepsilon_{\text{ип}}$).

В связи с этим введен более широкий термин – **погрешность позиционирования заготовки** ($\Delta_{\text{поз}}$), который характеризует суммарное смещение поля допуска операционного размера в абсолютной системе координат станка при смене заготовок в партии. Соотношение между классическими и авторскими терминами приведено в табл. 1. Таким образом, предлагаемое понятие $\Delta_{\text{поз}}$ не противоречит классической терминологии, а расширяет ее применительно к условиям обработки на станках с ЧПУ, где требуется учет всех факторов, вызывающих нестационарность поля допуска в абсолютной системе координат.

Аксиома 4 (о формообразовании). Обработка поверхности происходит в момент контакта вершины режущего инструмента с заготовкой.

Соответствие терминов, характеризующих отклонение положения заготовки в системе координат станка
Correspondence of terms characterizing the deviation of the workpiece position in the machine coordinate system

Классический термин (Маталин, Балакшин, Корсаков)	Составляющие погрешности	Авторский термин
Погрешность базирования (ε_6)	Несовпадение измерительной и технологической баз	Входят в $\Delta_{\text{поз}}$
Погрешность закрепления ($\varepsilon_{\text{закр}}$)	Деформации заготовки и элементов приспособления под действием сил зажима	Входят в $\Delta_{\text{поз}}$
Погрешность приспособления ($\varepsilon_{\text{пр}}$)	Точность изготовления и установки приспособления	Входят в $\Delta_{\text{поз}}$
Погрешность установки ($\varepsilon_{\text{уст}} = \varepsilon_6 + \varepsilon_{\text{закр}} + \varepsilon_{\text{пр}}$)	Суммарное отклонение, связанное с базированием и закреплением	Является частью $\Delta_{\text{поз}}$
– (не входит в $\varepsilon_{\text{уст}}$)	Погрешность формы базовой поверхности заготовки ($\varepsilon_{\text{фбп}}$)	Входит в $\Delta_{\text{поз}}$
– (не входит в $\varepsilon_{\text{уст}}$)	Износ опорных элементов приспособления ($\varepsilon_{\text{ип}}$)	Входит в $\Delta_{\text{поз}}$
– (не входит в $\varepsilon_{\text{уст}}$)	Геометрическая неточность станка и тепловые деформации ($\varepsilon_{\text{ст}}$)	Входит в $\Delta_{\text{поз}}$
– (не входит в $\varepsilon_{\text{уст}}$)	Погрешность позиционирования исполнительных органов ЧПУ ($T_{\text{п}}$)	Входит в $\Delta_{\text{поз}}$ и в $\Delta_{\text{и}}$

Фактическое положение обработанной поверхности отличается от программного положения вершины инструмента на величину упругих деформаций технологической системы y_d . Для удобства анализа все погрешности, влияющие на точность обработки, классифицированы на три группы по признаку влияния на стационарность положения заготовки и вершины режущего инструмента.

Погрешности позиционирования ($\Delta_{\text{поз}}$). Вызывают «плавание» (нестационарность) поля допуска обрабатываемого размера относительно стола станка. К ним относятся погрешность установки приспособления, погрешность формы базовой поверхности заготовки, погрешность закрепления и другие факторы, влияющие на позиционирование поля допуска операционного размера в системе координат станка с ЧПУ.

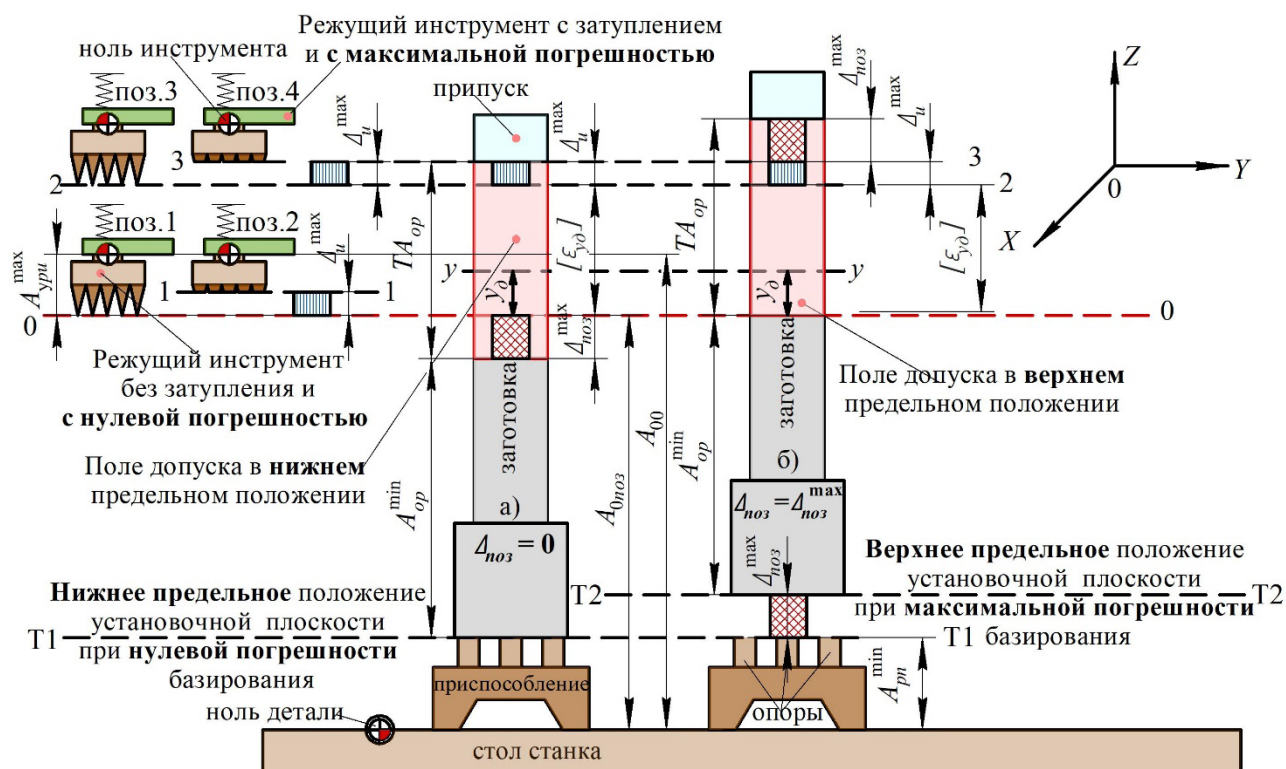
Погрешности инструмента ($\Delta_{\text{и}}$). Вызывают «плавание» положения вершины режущего инструмента относительно его державки (нуля инструмента). К ним относятся допуск на вылет инструмента и его размерный износ.

Погрешности от упругих деформаций (y_d).

Возникают непосредственно в процессе резания из-за конечной жесткости технологической системы под действием составляющей силы резания в направлении выдерживаемого размера. Влияют на положение вершины режущего инструмента внутри поля допуска.

Предложенная аксиоматика адекватна при соблюдении следующих условий: упругие деформации линейны (нагрузка не более 0,5 от паспортной), тепловой дрейф станка не превышает 0,02 мм (время непрерывной работы ≤ 1 ч или наличие термокомпенсации), амплитуда вибраций менее 0,1 $T A_{op}$, материал заготовки – с нормальной теплопроводностью (стали, чугуны). При нарушении этих условий (титановые сплавы, тонкостенные детали, длительная обработка) модель требует дополнения тепловыми и динамическими блоками расчетов.

Данная классификация положена в основу расчетной схемы (см. ниже), предназначенной для аналитического определения абсолютной координаты вершины режущего инструмента на



Расчетная схема для определения абсолютной координаты вершины инструмента $A_{0\text{поз}}$ при предельных положениях заготовки:

a – нижнее положение ($\Delta_{\text{поз}} = 0$); b – верхнее положение ($\Delta_{\text{поз}} = \Delta_{\text{поз}}^{\text{max}}$)

Calculation scheme for determining the absolute coordinate of the tool tip $A_{0\text{поз}}$ at the extreme positions of the workpiece:

a – lower position ($\Delta_{\text{поз}} = 0$); b – upper position ($\Delta_{\text{поз}} = \Delta_{\text{поз}}^{\text{max}}$)

его последнем проходе. Схема разработана на примере обработки плоскости на фрезерной или плоскошлифовальной операции и отражает взаимное положение заготовки, инструмента и поля допуска в системе координат станка с ЧПУ.

Заготовка базируется в приспособлении на трех опорах, образующих установочную плоскость (см. схему). Приспособление расположено на плоскости стола станка, которая принята за ноль заготовки, поскольку положение стола неизменно при обработке всей партии деталей. Однако при смене заготовок положение установочной плоскости в системе координат ЧПУ нестабильно из-за действия различных погрешностей, влияющих на позиционирование заготовки и фактическое положение поля допуска операционного размера по оси Z .

Учитывая, что колебания поля допуска в партии деталей происходят в ограниченном диапазоне, на схеме представлено позиционирование заготовки с полем допуска в двух предельных

положениях по оси Z : в нижнем (a) и верхнем (b) предельных положениях. В нижнем предельном положении (a) заготовка находится при нулевой суммарной погрешности позиционирования, т. е. $\Delta_{\text{поз}} = 0$. В верхнем предельном положении (b) погрешность позиционирования максимальна по оси Z : $\Delta_{\text{поз}} = \Delta_{\text{поз}}^{\text{max}}$. При нижнем предельном положении заготовки (a) установочная плоскость проходит по опорам приспособления и обозначена границей T1-T1. Расстояние от нуля детали (плоскости стола) до границы T1-T1 равно минимальному расстоянию $A_{\text{рп}}^{\text{min}}$ от основания приспособления до опор установочной плоскости.

При верхнем предельном положении заготовки (b) установочная плоскость проходит по границе T2-T2. Расстояние от границы T1-T1 до границы T2-T2 равно максимальной погрешности позиционирования $\Delta_{\text{поз}}^{\text{max}}$. Выдерживаемый (операционный) размер обозначен $A_{\text{оп}}$. На схеме



он показан как минимальный размер $A_{ор}^{min}$ с допуском $TA_{ор}$. Операционный размер $A_{ор}$ связан с технологической базой – установочной плоскостью заготовки.

Поле допуска операционного размера $A_{ор}$ становится **нестационарным** относительно нуля заготовки при установке каждой новой заготовки из обрабатываемой партии. Это означает, что при смене заготовок одна и та же граница поля допуска (например, его нижняя граница) занимает различные положения по оси Z относительно стола станка.

Нестационарность положения поля допуска определяется погрешностью позиционирования $\Delta_{поз}$, в состав которой входят погрешность, связанная с допуском $TA_{рп}$ размера приспособления $A_{рп}$; погрешность формы $\varepsilon_{фбп}$ базовой поверхности заготовки; погрешность закрепления $\varepsilon_{закр}$ заготовки в приспособлении; погрешность $\varepsilon_{гсн}$, обусловленная геометрической неточностью станка.

Для расчета абсолютной координаты вершины инструмента в условиях колебания положения заготовки рассмотрим предельно допустимое положение режущего инструмента, не имеющего затупления, с максимальным вылетом $A_{ури}^{max}$. Очевидно, что вершина инструмента на последнем проходе не должна опускаться ниже нижнего предела поля допуска. Наиболее опасная ситуация возникает, когда заготовка находится в верхнем предельном положении (б). В этом случае нижний предел поля допуска расположен на максимальном расстоянии от нуля детали по оси Z .

Для ограничения нижнего положения вершины инструмента проведем (б) **границу 0-0** через нижний предел поля допуска при верхнем положении заготовки. После съема припуска, на последнем проходе, программное перемещение вершины инструмента должно заканчиваться на границе 0-0. В этом случае вершина инструмента не сможет пересечь эту границу, что гарантирует соблюдение нижнего предела поля допуска.

Как видно из (а), граница 0-0 отсекает часть поля допуска, образуя недоступную для вершины инструмента зону размером $\Delta_{поз}^{max}$ в поле допуска операционного размера при нижнем поло-

жении заготовки, что также гарантирует безопасность по нижнему пределу.

Совместим (позиция 1 на схеме) вершину острого режущего инструмента с максимальным вылетом с границей 0-0. Расстояние $A_{0поз}$ между нулем детали и границей 0-0 является искомым абсолютной координатой вершины режущего инструмента и может быть рассчитано по формуле

$$A_{0поз} = A_{рп}^{min} + \Delta_{поз}^{max} + A_{ор}^{min}, \quad (1)$$

где $A_{рп}^{min}$ – минимальное расстояние от стола станка (нуля детали) до установочной плоскости приспособления (граница Т1-Т1); $\Delta_{поз}^{max}$ – максимальная погрешность позиционирования заготовки; $A_{ор}^{min}$ – минимальный операционный размер (расстояние от установочной плоскости (технологической базы) до нижней границы поля допуска обрабатываемого размера).

При обработке затупленным инструментом (с минимальным вылетом и максимальной погрешностью инструмента $\Delta_{и}^{max}$), вершина инструмента (позиция 2 на схеме) совпадает с границей 1-1, которая расположена гарантированно выше границы 0-0 на величину $\Delta_{и}^{max}$, что также безопасно для нижнего предела поля допуска.

Рассмотрим обеспечение точности по верхнему пределу поля допуска. Под действием упругих деформаций y_{δ} в технологической системе вершина инструмента смещается вверх по оси Z . При чрезмерной упругой деформации вершина инструмента может пересечь верхний предел поля допуска, что приведет к браку. Наиболее опасная ситуация возникает, когда верхний предел поля допуска вместе с заготовкой находятся в самом нижнем положении (а).

Проведем предельно допустимую границу 3-3 положения вершины инструмента через верхний предел при нижнем положении заготовки. Совместим (позиция 4) вершину затупленного инструмента с границей 3-3. В этом случае вершина острого инструмента (позиция 3) будет внутри поля допуска и совместится с границей 2-2 на безопасном расстоянии от верхнего предела. Расстояние между границами 2-2 и 3-3

равно максимальной погрешности инструмента $\Delta_{\text{и}}^{\text{max}}$.

Расстояние между границами 0-0 и 2-2 равно максимально допустимому значению упругой деформации $[\varepsilon_{y\partial}]$ на последнем проходе инструмента. Величина $[\varepsilon_{y\partial}]$ регулируется режимами резания путем ограничения силы резания с последующим расчетом допустимого значения упругой деформации y_{∂} при заданной жесткости технологической системы.

Из размерной схемы (а) видно, что допуск $TA_{\text{ор}}$ операционного размера при нижнем положении заготовки равен сумме трех погрешностей:

$$TA_{\text{ор}} = \Delta_{\text{поз}}^{\text{max}} + \Delta_{\text{и}}^{\text{max}} + [\varepsilon_{y\partial}].$$

Физический смысл этого равенства заключается в том, что операционный допуск компенсирует трехкомпонентную суммарную погрешность.

При верхнем положении заготовки (б), согласно схеме, границы 2-2 и 3-3 отсекают от поля допуска такие же компоненты погрешностей, и допуск $TA_{\text{ор}}$ операционного размера также равен сумме этих трех погрешностей.

Введем ключевое понятие предлагаемой теории.

Определение 1. Граница 0-0 – это воображаемая плоскость (линия) в системе координат станка с ЧПУ, положение которой остается неизменным (стационарным) при обработке всей партии деталей. Она служит единой координатной базой, к которой «привязываются» и положение заготовки (через её технологическую базу), и положение инструмента (через его вылет).

Теорема 1 (о существовании стационарной границы 0-0).

Для любой партии заготовок, у которых известна максимально возможная погрешность позиционирования $\Delta_{\text{поз}}^{\text{max}}$, в системе координат станка всегда можно провести такую стационарную границу, что если вершина режущего инструмента на финишном проходе достигнет этой границы, то обработка всей партии будет выполнена без брака по нижнему пределу (не будет «недореза»).

Доказательство. Рассмотрим, как может располагаться нижняя граница поля допуска для

разных заготовок партии. Из-за погрешностей позиционирования она каждый раз занимает новое положение. Обозначим множество этих положений как H_i . Согласно аксиоме 3 это множество не бесконечно, а ограничено сверху некоторым самым высоким положением H_{max} . Это наихудший случай, когда из-за сложения всех погрешностей нижняя граница допуска поднялась выше всего (ближе всего к инструменту).

Выберем в системе координат станка плоскость, проходящую именно через эту точку H_{max} . Для любой заготовки из партии ее собственная нижняя граница H_i будет находиться на этой плоскости или ниже нее. Если мы запрограммируем инструмент так, чтобы в конце обработки его вершина оказалась на этой плоскости, то для самой «неудобной» заготовки (с $H_i = H_{\text{max}}$) инструмент только коснется границы допуска, а для всех остальных он гарантированно войдет в тело заготовки и снимет припуск. Следовательно, такая плоскость (граница 0-0) существует.

Теорема 2 (о единственности границы 0-0).

Положение границы 0-0, проведенной через наивысшее возможное положение нижней границы поля допуска H_{max} , является единственным, гарантирующим отсутствие брака при минимально необходимом съеме металла.

Доказательство. Предположим, мы провели границу G выше, чем H_{max} (ближе к верхней границе допуска, т. е. с большей координатой по оси Z). В этом случае для заготовки с наихудшим позиционированием ($H_i = H_{\text{max}}$) инструмент врежется глубже, чем необходимо. Это увеличит нагрузку на систему и риск выхода за верхний предел допуска из-за упругих деформаций, но формально может быть допустимо.

Предположим, мы провели границу G ниже, чем H_{max} (дальше от инструмента, т. е. с меньшей координатой по оси Z). Тогда для заготовки с наихудшим позиционированием ($H_i = H_{\text{max}}$) вершина инструмента в конечной точке G окажется выше, чем ее нижняя граница допуска H_{max} . Это означает, что инструмент просто не коснется этой заготовки – припуск снят не будет, деталь уйдет в брак по недорезу. Таким образом, единственное положение, которое гарантирует контакт инструмента с любой заготовкой партии, – это параметр H_{max} .

Следствие 1. Граница 0-0 играет роль **стационарной координатной базы** в системе ЧПУ. Размер от нуля заготовки (стола станка) до этой границы ($A_{\text{поз}}$) и размер от нуля инструмента до этой границы ($A_{\text{урн}}$) являются искомыми параметрами размерной настройки, которые можно рассчитать аналитически (формула (1)).

Наличие границы 0-0 решает проблему нижней границы допуска, но оставляет открытым вопрос о верхней границе. Упругие деформации могут «вытолкнуть» обработанную поверхность вверх, за пределы допуска.

Определение 2. Ресурс точности $[\varepsilon_{y\partial}]$ – это часть поля допуска операционного размера, которая остается после того, как из него вычли максимально возможные статические погрешности (позиционирования и инструмента). Это тот «запас», который можно потратить на упругие деформации и другие динамические явления, не выходя за верхний предел допуска.

Теорема 3 (уравнение баланса).

Обработка партии деталей без брака возможна только в том случае, если ресурс точности $[\varepsilon_{y\partial}]$ неотрицателен, а фактическая упругая деформация не превышает его величины.

Доказательство. Операционный размер $A_{\text{ор}}$ – это расстояние между конструкторской базой и обработанной поверхностью. В наихудшем случае, когда все погрешности складываются, размер может стать максимальным: максимальный операционный размер равен сумме положения технологической базы при наихудшем позиционировании и величины снятого слоя с учетом упругих отжатий технологической системы.

Условие невыхода за верхний предел допуска описывается следующим неравенством:

$$TA_{\text{ор}} \geq \Delta_{\text{поз}}^{\text{max}} + \Delta_{\text{и}}^{\text{max}} + y_{\partial}. \quad (2)$$

Перенеся статические составляющие влево, получаем

$$[\varepsilon_{y\partial}] = TA_{\text{ор}} - (\Delta_{\text{поз}}^{\text{max}} + \Delta_{\text{и}}^{\text{max}}) \geq y_{\partial}. \quad (3)$$

Физический смысл ресурса точности двойственен.

Индикатор принципиальной возможности обработки. Если $[\varepsilon_{y\partial}] < 0$, то сумма только статических погрешностей (позиционирования и инструмента) уже превышает допуск. Это означает, что процесс нереализуем при данной

схеме позиционирования и варьирование режимов резания не способно компенсировать указанное несоответствие. Требуется пересмотр техпроцесса.

Ограничитель режимов резания. Поскольку упругая деформация зависит от силы резания, то условие $[\varepsilon_{y\partial}] \geq y_{\partial}$ напрямую ограничивает допустимую силу резания, а значит – подачу и глубину на финишном проходе. Это позволяет рассчитать режимы резания, гарантирующие точность.

На основе доказанных теорем и анализа размерных связей получена замкнутая система уравнений, представляющая собой математическую модель для расчета параметров размерной настройки.

1. Суммарная погрешность позиционирования:

$$\Delta_{\text{поз}}^{\text{max}} = TA_{\text{рп}} + \varepsilon_{\text{фбп}} + \varepsilon_{\text{закр}} + \varepsilon_{\text{ип}} + Ttp + \varepsilon_{\text{ст}}, \quad (4)$$

где $TA_{\text{рп}}$ – допуск размера, характеризующий точность изготовления и погрешность установки самого приспособления на столе станка; $\varepsilon_{\text{фбп}}$ – погрешность формы базовых поверхностей заготовки, полученная на предшествующей операции; $\varepsilon_{\text{закр}}$ – погрешность закрепления, возникающая из-за упругих деформаций заготовки и элементов приспособления под действием сил зажима; $\varepsilon_{\text{ип}}$ – погрешность, связанная с износом опорных элементов приспособления в процессе эксплуатации; Ttp – погрешность позиционирования исполнительных органов системы ЧПУ; $\varepsilon_{\text{ст}}$ – обобщенная погрешность, связанная с геометрической неточностью станка, его износом и температурными деформациями, которые влияют на взаимное положение узлов.

2. Суммарная погрешность инструмента:

$$\Delta_{\text{и}}^{\text{max}} = TA_{\text{ури}} + \varepsilon_{\text{ири}} + Ttp, \quad (5)$$

где $TA_{\text{ури}}$ – допуск на установку (вылет) режущего инструмента, задается симметричным допуском ($A_{\text{ури}} \pm 0,5TA_{\text{ури}}$); $\varepsilon_{\text{ири}}$ – погрешность, вызванная размерным износом режущего инструмента за период его стойкости; Ttp – погрешность позиционирования системы ЧПУ (допуск на перемещение программной подачи), характеризует точность отработки станком заданного перемещения. Как правило, задается симметричным допуском ($tp \pm 0,5Ttp$).

Одна и та же величина погрешности позиционирования ЧПУ учитывается как в погрешностях позиционирования (формула (4)), так и в погрешностях инструмента (формула (5)), поскольку она влияет на обе составляющие размерной настройки.

3. Координата границы 0-0 от стола станка определяется по формуле (1).

4. Абсолютная координата нуля инструмента (от стола станка):

$$A_{00} = A_{0\text{поз}} + A_{\text{ури}}^{\text{max}}, \quad (6)$$

где $A_{0\text{поз}}$ – координата границы 0-0 от стола станка (расстояние от стола станка до стационарной границы 0-0); $A_{\text{ури}}^{\text{max}}$ – максимальный вылет инструмента (максимально возможное расстояние от торца державки (нуля инструмента) до вершины режущей кромки).

5. Уравнение баланса (условие реализуемости) – формула (2).

6. Ресурс точности – формула (3).

7. Ограничение режимов резания по точности:

$$y_d \leq [\varepsilon_{y_d}]. \quad (7)$$

Все параметры в уравнениях (1–7) известны или могут быть определены на этапе ТПП. Сила резания и жесткость могут быть определены эмпирическим путем по справочным данным или же могут быть рассчитаны по известным методикам. Это позволяет до запуска станка определить искомую координату $A_{0\text{поз}}$ и максимально допустимую нагрузку на финишном проходе.

Для того чтобы доказанные выше теоремы о существовании и единственности абсолютной координаты инструмента (границы 0-0) могли быть реализованы на практике, необходимо выполнение ряда условий. Эти условия формируют цифровую среду, в которой расчет абсолютной координаты становится возможным и детерминированным. Ключевым требованием является наличие не только математических моделей, но и цифровых паспортов всех элементов технологической системы, служащих источниками достоверных исходных данных.

Эти условия должны быть обеспечены на этапе ТПП и служат входными параметрами для предлагаемой теории. Каждое условие опирается на соответствующий цифровой паспорт.

1. Наличие цифровой модели погрешностей позиционирования.

Для расчета $\Delta_{\text{поз}}^{\text{max}}$ по уравнению (4) требуется математическое описание всех составляющих. Источниками данных служат:

– **цифровой паспорт приспособления** – содержит значение $TA_{\text{рп}}$ (точность изготовления приспособления), $\varepsilon_{\text{закр}}$ (паспортные или расчетные деформации закрепления), а также данные о жесткости элементов приспособления, влияющие на деформации при закреплении;

– **цифровой паспорт заготовки (партии деталей)** – содержит статистические данные о погрешности формы базовых поверхностей ($\varepsilon_{\text{фбп}}$), точности предыдущей операции ($\varepsilon_{\text{ип}}$), а также закон распределения припусков в партии, позволяющий определить $\Delta_{\text{поз}}^{\text{max}}$ и положение H_{max} ;

– **цифровой паспорт станка** – содержит точностные характеристики ($\varepsilon_{\text{ст}}$), включая геометрическую точность и погрешность позиционирования, а также данные о жесткости узлов, необходимые для моделирования упругих деформаций.

2. Наличие цифровой модели погрешностей инструмента.

Для расчета $\Delta_{\text{и}}^{\text{max}}$ по уравнению (5) необходимы:

– **цифровой паспорт режущего инструмента** – содержит допуск на вылет инструмента ($TA_{\text{ури}}$), ожидаемый размерный износ ($\varepsilon_{\text{ири}}$) как функцию пути резания или времени обработки, а также геометрические параметры, влияющие на силы резания;

– **цифровой паспорт инструментальной настройки (пресеттера)** – содержит данные о точности предварительной настройки инструмента вне станка (Ttp).

3. Наличие цифровой модели упругих деформаций.

Уравнение баланса (2) и ограничение (3) требуют знания величины упругой деформации y_d . Источниками данных служат:

– **цифровой паспорт станка** – содержит информацию о жесткости технологической системы (матрица податливости в рабочей зоне);

– **цифровой паспорт материала заготовки** – содержит механические свойства (твердость, предел прочности), необходимые для

расчета силы резания по эмпирическим зависимостям или иным авторским методикам;

– **цифровой паспорт инструмента** – содержит коэффициенты уравнений силы резания, зависящие от геометрии инструмента и материала режущей части.

4. Наличие цифровой метрологической инфраструктуры.

Для верификации моделей и в перспективе для самообучения системы в концепции киберфизических систем необходимы **цифровые паспорта средств измерений**, содержащие данные о точности, диапазоне измерений и периодичности поверки. Результаты измерений (пробных или первых деталей партии) должны в цифровом виде поступать в систему для сопоставления с прогнозом и, при необходимости, корректировки моделей (байесовское обновление).

5. Стационарность системы координат станка (СКС).

Данное условие, закрепленное в аксиоме 2, означает, что все расчеты привязаны к неизменной физической системе координат станка (столу или шпинделю). Любые деформации станка должны быть либо скомпенсированы, либо находиться в пренебрежимо малых пределах. Данные о деформациях могут содержаться в цифровом паспорте станка как функция времени работы и температуры.

Достаточные условия (критерии реализуемости). Если необходимые условия выполнены (цифровые модели созданы и параметризованы), то существование абсолютной координаты гарантируется при соблюдении следующих достаточных условий, вытекающих из доказанных теорем:

– **условие неотрицательности ресурса точности** $[\varepsilon_{y\partial}] \geq 0$. Согласно уравнению баланса (2)

и теореме 3, если $TA_{op} \geq \Delta_{\text{поз}}^{\text{max}} + \Delta_{\text{и}}^{\text{max}}$, то ресурс точности существует. В противном случае, если $[\varepsilon_{y\partial}] < 0$, то сумма статических погрешностей превышает допуск и процесс обработки принципиально нереализуем. Граница 0-0, рассчитанная по теореме 1, в такой ситуации теряет практический смысл, так как верхняя граница допуска будет нарушена еще до учета упругих деформаций;

– **условие баланса погрешностей** $y_{\partial} \leq [\varepsilon_{y\partial}]$.

Даже при положительном ресурсе точности

абсолютная координата, рассчитанная по уравнению (1), гарантирует получение годной детали только при условии, что фактические упругие деформации y_{∂} (зависящие от режимов резания) не превышают этот ресурс. Это условие связывает статический расчет настройки с динамикой процесса резания;

– **условие детерминированности контакта (принцип H_{max})**. Согласно теоремам 1 и 2, **единственность** и существование границы 0-0 гарантированы только при ее проведении через наивысшую точку нижней границы допуска H_{max} . Это условие исключает вариативность настройки и делает прогноз результата детерминированным для всей партии.

Предлагаемая теория устанавливает жесткую логическую цепочку, в которой цифровые паспорта играют роль фундаментального источника достоверных данных: цифровые паспорта (приспособления, инструмента, станка, заготовки, средств измерений) $\rightarrow$ параметризация цифровых моделей погрешностей $\rightarrow$ расчет $\Delta_{\text{поз}}^{\text{max}}$, $\Delta_{\text{и}}^{\text{max}}$ и $[\varepsilon_{y\partial}] \rightarrow$ проверка достаточных условий ($[\varepsilon_{y\partial}] \geq 0$) $\rightarrow$ применение теорем 1 и 2 для расчета единственной абсолютной координаты $A_{0\text{поз}}$ $\rightarrow$ ограничение режимов резания по условию $y_{\partial} \leq [\varepsilon_{y\partial}] \rightarrow$ изготовление детали $\rightarrow$ подтверждение точности (верификация модели данными измерений) $\rightarrow$ уточнение цифровых паспортов и моделей (опционально, для самообучающихся систем).

Нарушение любого из этих условий (отсутствие цифрового паспорта какого-либо элемента системы, неполнота данных в нем или отрицательный ресурс точности) разрывает цепочку и возвращает процесс в область эмпирической неопределенности, воспроизводя тем самым тот самый «цифровой разрыв», на преодоление которого направлено настоящее исследование.

Числовой пример: расчет абсолютной координаты инструмента для фрезерования плоскости корпусной детали.

Для иллюстрации работоспособности предложенного теоретического аппарата и демонстрации порядка применения формул (1–7) выполним сквозной расчет для технологической операции **фрезерования плоскости корпусной детали** на станке с ЧПУ. Обработка ведется торцевой фрезой, выдерживаемый размер – рассто-

яние от установочной плоскости (технологической базы) до обработанной поверхности.

Этап 1. Расчет составляющих суммарных погрешностей.

1.1. Погрешность позиционирования рассчитываем по формуле (4), принимая для нашего случая следующие параметры: $TA_{\text{ри}} = 0,03$ мм (точность изготовления приспособления); $\varepsilon_{\text{фбп}} = 0,02$ мм (погрешность формы базовой поверхности заготовки); $\varepsilon_{\text{закр}} = 0,01$ мм (деформации при закреплении); $\varepsilon_{\text{ип}} = 0,005$ мм (износ опор приспособления); $Ttp = 0,005$ мм (погрешность позиционирования ЧПУ); $\varepsilon_{\text{ст}} = 0,02$ мм (геометрическая неточность станка). Погрешность позиционирования составит

$$\Delta_{\text{поз}}^{\text{max}} = 0,03 + 0,02 + 0,01 + 0,005 + 0,005 + 0,02 = 0,07 \text{ мм.}$$

1.2. Погрешность инструмента рассчитываем по формуле (5) и принимаем для примера следующие значения: $TA_{\text{ури}} = 0,02$ мм (допуск на вылет инструмента); $\varepsilon_{\text{ири}} = 0,015$ мм (размерный износ за период стойкости); $Ttp = 0,005$ мм (погрешность позиционирования ЧПУ). Погрешность инструмента составит

$$\Delta_{\text{и}}^{\text{max}} = TA_{\text{ури}} + \varepsilon_{\text{ири}} + Ttp = 0,02 + 0,015 + 0,005 = 0,04 \text{ мм.}$$

Этап 2. Проверка принципиальной реализуемости процесса осуществляется по формуле (3). Определим ресурс точности:

$$[\varepsilon_{y\partial}] = TA_{\text{ор}} - (\Delta_{\text{поз}}^{\text{max}} + \Delta_{\text{и}}^{\text{max}}) = 0,012 - (0,07 + 0,04) = 0,01 \text{ мм.}$$

Таким образом, $[\varepsilon_{y\partial}] = 0,01 > 0$. Следовательно, процесс принципиально реализуем. Положительный ресурс точности означает, что статические погрешности не превышают допуск и остается запас 0,01 мм на упругие деформации. Если бы ресурс точности оказался отрицательным, то это свидетельствовало бы о невозможности обработки при такой схеме позиционирования и выбранном инструменте – требовалось бы пересмотреть техпроцесс.

Этап 3. Расчет координаты границы 0-0 осуществляется по формуле (1):

$$A_{0\text{поз}} = A_{\text{мин}} + \Delta_{\text{поз}}^{\text{max}} + A_{\text{ор}}^{\text{мин}} = 80,0 + 0,07 + 120,0 = 200,07 \text{ мм.}$$

Интерпретация: плоскость границы 0-0 должна быть расположена на расстоянии 200,07 мм от стола станка (нуля детали). Вершина фрезы на финишном проходе должна программно достигать этой координаты. Это гарантирует съем припуска для любой заготовки партии, включая заготовку с наихудшим позиционированием (H_{max}).

Этап 4. Расчет абсолютной координаты нуля инструмента осуществляется по формуле (6):

$$A_{0\text{инстр}} = A_{\text{поз}} - l_{\text{max}} = 200,07 - 50,0 = 150,07 \text{ мм.}$$

Это расстояние от стола станка до торца шпинделя (державки), которое должно быть выставлено при настройке инструмента на пресеттере или скомпенсировано в системе ЧПУ.

Этап 5. Ограничение режимов резания по точности (формула (7)).

Из условия (7) допустимая сила резания:

$$P_y^{\text{доп}} \leq [\varepsilon_{y\partial}]j.$$

При $[\varepsilon_{y\partial}] = [\varepsilon_{y\partial}] = 0,01$ мм (назначаем использование всего ресурса точности) и $j = 40$ кН/мм получим

$$P_y^{\text{доп}} \leq 0,01 \cdot 40 = 0,4 \text{ кН} = 400 \text{ Н.}$$

По справочным зависимостям силы резания при торцевом фрезеровании стали 45 это ограничение соответствует, например, такому режиму: глубина резания $t = 0,5$ мм, подача на зуб $s_z = 0,05$ мм/зуб, скорость резания $v = 150$ м/мин. Превышение этих параметров приведет к $y_{\partial} > 0,01$ мм и риску выхода размера за верхнюю границу допуска.

Этап 6. Проверка баланса осуществляется по формуле (2):

$$0,12 \geq 0,07 + 0,04 + 0,01.$$

Равенство выполняется: $0,12 = 0,12$. Это означает, что при назначенной упругой деформации $y_{\partial} = 0,01$ мм (предельно допустимой) весь допуск полностью использован. Для гарантии качества рекомендуется назначать y_{∂} с запасом (например, 0,008 мм), что даст $0,12 \geq 0,118$ и повысит надежность.

Для того чтобы показать, как результат зависит от входных параметров, рассмотрим три варианта изменения исходных данных.

Исходные данные (реалистичные для мелкосерийного производства)

Initial data (realistic for small-batch production)

Параметр	Обозначение	Значение	Примечание
Минимальный операционный размер (чертеж)	$A_{\text{оп}}^{\text{min}}$	120,0 мм	Расстояние от базы до нижней границы поля допуска
Допуск операционного размера	$TA_{\text{оп}}$	0,12 мм	Поле допуска по IT9 для размера 120 мм
Максимальная погрешность позиционирования	$\Delta_{\text{поз}}^{\text{max}}$	0,07 мм	Рассчитана по формуле (4)
Максимальная погрешность инструмента	$\Delta_{\text{и}}^{\text{max}}$	0,04 мм	Рассчитана по формуле (5)
Минимальное расстояние: стол станка – опоры приспособления	A_{min}	80,0 мм	Из чертежа приспособления
Максимальный вылет инструмента	l_{max}	50,0 мм	Из паспорта инструмента
Жесткость технологической системы	j	40 кН/мм	Паспорт станка
Допустимая упругая деформация	$[\epsilon_{\text{уд}}]$	Подлежит определению	Из условия (7)

Вариант А (ужесточение допуска). Уменьшим допуск операционного размера до $TA_{\text{оп}} = 0,08$ мм (вместо 0,12), тогда $[\epsilon_{\text{уд}}] = 0,08 - (0,07 + 0,04) = -0,03$. Процесс становится **нереализуемым** – формула (3) дает отрицательный ресурс точности. Технолог должен изменить схему позиционирования (уменьшить $\Delta_{\text{поз}}^{\text{max}}$) или использовать более точный инструмент (уменьшить $\Delta_{\text{и}}^{\text{max}}$).

Вариант Б (увеличение погрешности позиционирования). Увеличим $\Delta_{\text{поз}}^{\text{max}}$ до 0,09 мм (например, из-за износа приспособления), тогда $[\epsilon_{\text{уд}}] = 0,12 - (0,09 + 0,04) = -0,01$ мм. Процесс нереализуем. **Необходима замена или ремонт приспособления.**

Вариант В (снижение жесткости системы). Уменьшим жесткость до $j = 20$ кН/мм (например, при обработке нежесткой детали). При том же ресурсе $[\epsilon_{\text{уд}}] = 0,01$ мм: $P_{\text{уд}}^{\text{доп}} = 0,01 \cdot 20 = 200$ Н. Допустимая сила резания снижается вдвое, что требует существенного уменьшения подачи или глубины резания. Если требуемая

производительность не достигается, то необходимо увеличивать жесткость системы (например, применением поддерживающих люнетов).

Выводы по числовому примеру

1. Все семь формул (1–7) работают согласованно и образуют замкнутую процедуру расчета: оценка погрешностей → проверка реализуемости → определение границы 0-0 и координаты инструмента → ограничение режимов резания → проверка баланса.

2. Ресурс точности (формула (3)) является ключевым диагностическим критерием: его отрицательное значение сигнализирует о принципиальной невозможности обработки ещё до запуска станка.

3. Анализ чувствительности показывает, как изменение допусков, погрешностей или жесткости влияет на конечный результат, позволяя технологю принимать обоснованные решения на этапе ТПП.

4. Расчет полностью выполнен на этапе технологической подготовки производства без пробных проходов. После настройки станка на координату $A_{\text{поз}} = 200,07$ мм первая же заготовка партии должна дать годный размер, что подтверждает пригодность предложенной теории для реализации безлюдных технологий.

Результаты и их обсуждение

Проведенное теоретическое исследование позволяет по-новому взглянуть на проблему размерной настройки станков с ЧПУ. В отличие от распространенного подхода, рассматривающего нестабильность поля допуска как источник неопределенности, требующий вероятностных или адаптивных методов, предложенная теория доказывает существование детерминированного решения. Ключевым результатом является математическое доказательство того, что в системе координат станка существует единственная стационарная плоскость – граница 0-0, которая при любых допустимых сочетаниях погрешностей позиционирования гарантирует контакт инструмента с заготовкой (**теоремы (1) и (2)**).

Физическая интерпретация этого результата заключается в том, что «наихудший» случай позиционирования (наивысшее положение нижней границы поля допуска $H_{\max}$) парадоксальным образом вносит в процесс обработки элемент детерминизма. Именно этот предельный случай становится той точкой отсчета, которая превращает нестационарную систему в стационарную относительно системы координат станка.

Предложенный подход развивает классические методы анализа допусков по наихудшему случаю (Worst-Case Tolerance Analysis), заложенные в работах Greenwood и Chase [12, 13], а также Børke [14]. В классической теории допусков принцип «наихудшего случая» применяется к варьированию **размеров** в стационарной системе координат. Авторский вклад состоит в распространении этого принципа на **нестационарное поле допуска**, положение которого «плавает» в системе координат станка от заготовки к заготовке. «Наихудший случай» здесь – наивысшее положение нижней границы поля допуска, определяемое погрешностью позиционирования. Это позволяет рассчитать не допуск на размер, а **абсолютную координату инструмента** в пространстве станка. Введенный «ресурс точности» дополняет классический подход, отвечая на вопрос о запасе на упругие деформации и ограничивая режимы резания.

Столь же важным представляется уравнение баланса (2), которое, по сути, является критерием принципиальной реализуемости технологического процесса. Если сумма статических по-

грешностей (позиционирования и инструмента) превышает допуск ($[\epsilon_{y\partial}] < 0$), то, как следует из теоремы 3, процесс не может быть реализован в принципе, независимо от того, насколько совершенными будут режимы резания. Это положение имеет важное практическое значение, так как позволяет диагностировать ошибки проектирования техпроцесса на самом раннем этапе – еще до назначения режимов обработки. В этом смысле предложенный подход выгодно отличается от эмпирических методов, где такая диагностика происходит лишь после изготовления и измерения пробной партии.

Введение критерия «ресурс точности» переводит задачу назначения режимов резания из качественной плоскости в количественную. Условие $y_{\partial} \leq [\epsilon_{y\partial}]$ не просто ограничивает режимы, но и дает технологу конкретную величину «запаса прочности», которым он может оперировать. Чем больше $[\epsilon_{y\partial}]$, тем устойчивее процесс к случайным колебаниям твердости материала или припуска, что открывает путь к оптимизации производительности не по эмпирическим таблицам, а по четкому критерию надежности.

Важно подчеркнуть, что предложенная теория принципиально отличается от существующих подходов, рассмотренных в обзоре литературы. В отличие от фрагментарных исследований, посвященных отдельным составляющим погрешностей [2–8], она предлагает целостный взгляд на процесс размерной настройки. В отличие от адаптивных систем и методов активного контроля [21–28], которые лишь реагируют на уже возникшие отклонения либо требуют дорогостоящего оборудования, разработанная теория позволяет предотвратить брак еще на этапе проектирования. Наконец, в отличие от вероятностных методов [29, 31–32], дающих лишь статистическую оценку, она обеспечивает детерминированный прогноз результата (годен/брак) для всей партии деталей. Тем самым теория заполняет тот научно-технический пробел, на который указывали многие исследователи [10, 26, 32].

Принципиальная адаптация предложенной теории для операции наружного точения требует решения нескольких нетривиальных задач: во-первых, перехода от линейного смещения

поля допуска к векторной погрешности позиционирования с учетом радиального и торцевого биения; во-вторых, замены плоской границы 0-0 на цилиндрическую координатную поверхность; в-третьих, учета зависимости упругих деформаций от диаметра заготовки и переменной жесткости системы. Эти вопросы авторы предполагают рассмотреть в последующих публикациях, а в рамках настоящей статьи ограничиваются обработкой плоскостей, где все основные эффекты коллинеарны и модель имеет наглядное аналитическое решение.

Ещё одним важным ограничением предложенной модели является отсутствие явного учета температурных деформаций технологической системы. В реальных условиях длительной непрерывной работы станка с ЧПУ тепловыделение в подшипниковых узлах, направляющих и приводе подач приводит к нагреву элементов конструкции и их тепловому расширению. Это вызывает дрейф нулевой точки станка, что потенциально нарушает **аксиому 2** (о стационарности системы координат станка). В рамках настоящей теории предполагается, что либо используются станки с системами активной термокомпенсации (поддерживающие стационарность СКС с заданной точностью), либо длительность непрерывной работы ограничена периодом термостабильного состояния. В противном случае тепловой дрейф должен рассматриваться как дополнительная составляющая погрешности позиционирования в формуле (4), что требует ее периодического уточнения по данным измерений (байесовское обновление цифровых паспортов). Введение в модель нестационарного температурного поля и разработка методов прогнозирования тепловых деформаций являются предметом дальнейших исследований авторов.

Следует, однако, отметить и некоторые ограничения предложенного подхода. Модель предполагает линейность упругой характеристики системы и ориентирована на операции обработки плоскостей. Для других видов обработки (например, точения валов или фрезерования сложных поверхностей) потребуются адаптация координатно-геометрической части модели с учетом изменения направления действия сил и переменной жесткости системы в разных точках траектории. Кроме того, практическая реализация теории требует наличия цифровых

паспортов всех элементов технологической системы, что является отдельной организационно-технической задачей для предприятий.

Верификация модели запланирована на вертикально-фрезерном станке с ЧПУ при торцевом фрезеровании плоскости (сталь 45). Диапазоны параметров: $TA_{op} = 0,05...0,15$ мм, $\Delta_{поз}^{max} = 0,02...0,08$ мм, $\Delta_{и}^{max} = 0,01...0,05$ мм. Для каждой комбинации обрабатывается серия из 10 заготовок с настройкой по рассчитанной координате $A_{опоз}$. Критерий верификации – отсутствие брака во всей серии. Результаты верификации будут представлены в отдельной публикации после завершения полного объема экспериментальных исследований.

Выводы

1. В работе раскрыта природа «цифрового разрыва» в технологической подготовке производства, который обусловлен отсутствием математического аппарата, связывающего оцифрованный проектный контур (CAD/CAM) с нестабильными физическими факторами реального процесса резания. Преодоление этого разрыва возможно только на основе детерминированной теории, учитывающей вариабельность позиционирования и упругие деформации.

2. Впервые теоретически доказано существование и единственность стационарной координатной базы – «границы 0-0» – в системе координат станка с ЧПУ. Установлено, что данная граница, проводимая через наивысшее возможное положение нижней границы поля допуска, является **инвариантом процесса** (в том смысле, что она остается неизменной при любых допустимых вариациях положения заготовки в партии). Ее введение позволяет трансформировать нестационарную систему «поле допуска – заготовка» в стационарную относительно системы координат станка, что создает основу для детерминированного расчета настроечных параметров.

3. **Сформулирован фундаментальный закон баланса точности** (уравнение (2)), устанавливающий критерий принципиальной реализуемости технологического процесса. Показано, что нарушение условия $T_{оп} \geq \Delta_{поз}^{max} + \Delta_{и}^{max} + [\varepsilon_{уд}]$ делает обработку партии деталей невозможной

при любой схеме позиционирования и любых режимах резания. Это положение приобретает значение диагностического критерия, позволяющего выявлять ошибки проектирования технологического процесса на этапе ТПП, а не в цехе.

4. Обоснован критерий «ресурс точности» $[\varepsilon_{y\partial}]$, который количественно характеризует запас надежности технологической системы. Доказано, что ресурс точности выполняет двойственную функцию: во-первых, как индикатор принципиальной реализуемости процесса ($[\varepsilon_{y\partial}] \geq 0$), а во-вторых, как детерминированный ограничитель режимов резания на финишном проходе ($y_{\partial} \leq [\varepsilon_{y\partial}]$). Тем самым создана аналитическая основа для назначения режимов обработки, гарантирующих заданную точность.

5. Разработана замкнутая система уравнений (1–7), представляющая собой законченную математическую модель теории размерной настройки. Модель устанавливает прямую аналитическую связь между исходными технологическими параметрами и искомой абсолютной координатой инструмента, что позволяет перейти от эмпирического подбора параметров к их расчету на этапе подготовки производства.

6. Создана методологическая основа для реализации безлюдных технологий. Показано, что разработанная теория создает теоретические предпосылки для исключения цикла пробных обработок при условии наличия достоверных исходных данных (цифровых паспортов) и соблюдения области применимости модели, поскольку качество продукции может быть гарантировано на этапе проектирования через детерминированный расчёт координат инструмента. Это открывает путь к созданию цифровых двойников операций механической обработки и интеллектуальных САМ-модулей, способных автоматически рассчитывать настроечные параметры без участия человека.

Список литературы

1. Автоматизация управления точностью контурной обработки на станках с ЧПУ / П.М. Кузнецов, И.Н. Каверная, О.С. Костыкова, А.Н. Феофанов // *Технология машиностроения*. – 2023. – № 2. – С. 12–14.
2. Воронов С.А., Киселев И.А. Геометрический алгоритм 3MZBL для моделирования процессов обработки резанием. Алгоритм изменения поверхности

и определения толщины срезаемого слоя // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение*. – 2012. – № 6. – С. 70–83.

3. Geometric error measurement and compensation of machines – An update / H. Schwenke, W. Knapp, H. Haitjema, A. Weckenmann, R. Schmitt, F. Delbressine // *CIRP Annals*. – 2008. – Vol. 57 (2). – P. 660–675. – DOI: 10.1016/j.cirp.2008.09.008.

4. Prediction of thin-walled workpiece machining error: a transfer learning approach / Y.-Y. Yu, D.-M. Shi, H. Ding, X.-M. Zhang // *Journal of Intelligent Manufacturing*. – 2025. – Vol. 36. – P. 2803–2827. – DOI: 10.1007/s10845-024-02382-7.

5. Пасько Н.И., Картавцев И.С. Математическая модель процесса изменения размера деталей при токарной обработке партии деталей // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2013. – № 4. – С. 206–210.

6. Анцев А.В., Сальников С.В., Арсеньева А.А. Автоматизированная система контроля состояния режущего инструмента на основе фильтра Калмана // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2022. – № 12. – С. 536–540. – DOI: 10.24412/2071-6168-2022-12-536-540.

7. Мураткин Г.В., Сарафанова В.А. Влияние технологической наследственности напряженно-деформированного состояния на точность нежестких деталей // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. – 2020. – № 1. – С. 56–64.

8. Беляков Н.В., Махаринский Е.И., Махаринский Ю.Е. Погрешность теоретической схемы установки // *Вестник Витебского государственного технологического университета*. – 2005. – № 9. – С. 72–77.

9. Thermal error measurement and modelling in machine tools. Part II. Hybrid Bayesian Network – support vector machine model / R. Ramesh, M.A. Mannan, A.N. Poo, S.S. Keerthi // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2003. – Vol. 43 (4). – P. 405–419. – DOI: 10.1016/S0890-6955(02)00264-X.

10. Virtual machine tool / Y. Altintas, C. Brecher, M. Weck, S. Witt // *CIRP Annals*. – 2005. – Vol. 54 (2). – P. 115–138. – DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60022-5.

11. Virtual process systems for part machining operations / Y. Altintas, P. Kersting, D. Biermann, E. Budak, B. Denkena, I. Lazoglu // *CIRP Annals*. – 2014. – Vol. 63 (2). – P. 585–605. – DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.007.

12. Greenwood W.H., Chase K.W. A new tolerance analysis method for designers and manufacturers // *Transactions of the ASME. Journal of Engineering for Industry*. – 1987. – Vol. 109 (2). – P. 112–116.

13. Greenwood W.H., Chase K.W. Worst case tolerance analysis with nonlinear problems // *Transactions of the ASME. Journal of Engineering for Industry*. – 1987. – Vol. 110 (3). – P. 232–235.



14. *Björke Ø.* Computer-aided tolerancing. – 2nd ed. – Trondheim: Tapir Publishers, 1989. – 251 p.
15. *Furferi R.* Tolerance analysis methods for the application of ISO and ASME GD&T to mechanical component: 2D and 3D case studies // *Journal of Advanced Manufacturing Science and Technology*. – 2025. – Vol. 5 (3). – P. 2025020. – DOI: 10.51393/j.jamst.2025020.
16. *Grieves M.* Digital Twin: Manufacturing excellence through virtual factory replication // *Digital Twin White Paper*. – 2014. – P. 1–7.
17. *Grieves M., Vickers J.* Digital Twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems // *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. – Cham: Springer, 2017. – P. 85–113. – DOI: 10.1007/978-3-319-38756-7_4.
18. Five-dimension Digital Twin model and its ten applications / F. Tao, W. Liu, M. Zhang, [et al.] // *Computer Integrated Manufacturing Systems*. – 2019. – Vol. 25 (1). – P. 1–18.
19. Shaping the Digital Twin for design and production engineering / B. Schleich, N. Anwer, L. Mathieu, S. Wartack // *CIRP Annals*. – 2017. – Vol. 66 (1). – P. 141–144.
20. A Digital Twin-enabled hybrid deep learning approach for tool wear monitoring in CNC Milling based on multi-sensor fusion / S. Wang, Z. Yu, C. Lu, C. Li // *The Journal of Engineering*. – 2026. – Vol. 2026 (4). – P. e70180.
21. *Леун Е.В.* Интеллектуальный токарный резец с приборами активного контроля температуры зоны резания, размеров изделия и параметров формы его поверхности // *Омский научный вестник*. – 2017. – № 4 (154). – С. 87–93.
22. *Мясникова Л.А., Каменева А.Л.* Разработка комплекса контрольно-измерительных процедур для деталей с особо точными поверхностями на станках с ЧПУ // *Наукоемкие технологии в машиностроении*. – 2022. – № 11 (137). – С. 32–38. – DOI: 10.30987/2223-4608-2022-11-32-38.
23. *Хусаинов Р.М., Зиангирова Э.Р., Лозинский В.В.* Моделирование показателей точности технологической системы обработки резанием // *Металлообработка*. – 2020. – № 3 (117). – С. 11–18.
24. *Акинцева А.В., Переверзев П.П.* Модель расчета текущего значения глубины резания в автоматическом ступенчатом цикле программной подачи на операции плоского шлифования с ЧПУ // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. – 2022. – Т. 20, № 3. – С. 103–110. – DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-3-103-110.
25. Chatter suppression with an active workpiece holder / C. Brecher, D. Manoharan, U. Ladra, H.-G. Köpken // *Production Engineering*. – 2010. – Vol. 4 (2). – P. 239–245. – DOI: 10.1007/s11740-009-0204-y.
26. Advanced monitoring of machining operations / R. Teti, K. Jemielniak, G. O'Donnell, D. Dornfeld // *CIRP Annals*. – 2010. – Vol. 59 (2). – P. 717–739. – DOI: 10.1016/j.cirp.2010.05.010.
27. *Matsubara A., Ibaraki S.* Monitoring and control of cutting forces in machining processes: A review // *International Journal of Automation Technology*. – 2009. – Vol. 3 (4). – P. 445–456. – DOI: 10.20965/ijat.2009.p0445.
28. An adaptive, artificial intelligence-based chatter detection method for milling operations / P. Stavropoulos, T. Souflas, C. Papaioannou, H. Bikas, D. Mourtzis // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2023. – Vol. 124. – P. 2037–2058. – DOI: 10.1007/s00170-022-09920-8.
29. Структура модели имитационного моделирования вероятностного процесса формирования точности исполнительного размера / А.И. Денчик, А.Ж. Касенов, А.Л. Галиновский, Ж.К. Мусина, К.К. Абишев, А.А. Ткачук // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. – 2022. – № 6 (747). – С. 36–44.
30. *Ермаков С.П., Помпеев К.П.* Методика исследования возможности автоматического обеспечения точности технологических процессов изготовления деталей // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. – 2025. – Т. 68, № 2. – С. 176–183. – DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-2-176-183.
31. Digital twin technology facilitates precision improvement in complex product assembly: A progressive deduction method of data-driven tolerance allocation / H. Zhang, Y. Li, D. Xue, X. Tong, B. Gao, J. Yu // *Advanced Engineering Informatics*. – 2024. – Vol. 62. – P. 102790. – DOI: 10.1016/j.aei.2024.102790.
32. Present situation and future trends in modelling of machining operations / C.A. van Luttervelt, T.H.C. Childs, I.S. Jawahir, F. Klocke, P.K. Venuvinod, Y. Altintas, E. Armarego, D. Dornfeld, I. Grabec, J. Leopold, B. Lindstrom, D. Lucca, T. Obikawa, Shirakashi, H. Sato // *CIRP Annals*. – 1998. – Vol. 47 (2). – P. 587–626. – DOI: 10.1016/S0007-8506(07)63244-2.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Theoretical justification for calculating the absolute coordinates of a tool for dimensional setting of CNC machines to enable untended technologies

Alexandra Akintseva^{a, *}, Pavel Pereverzev^b

South Ural State University (National Research University), 76 Lenin Ave., Chelyabinsk, 454080, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0001-8881-8461>, akintsevaav@susu.ru; ^b <https://orcid.org/0000-0002-1416-8918>, pereverzevpp@susu.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 31 March 2026

Revised: 01 April 2026

Accepted: 16 April 2026

Available online: 15 June 2026

Keywords:

Dimensional setting

Absolute tool coordinate

0-0 boundary

Stationary coordinate base

Accuracy life

Digital divide

Untended technologies

CNC machines

Funding

The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation (project No. 25-29-01614, <https://rscf.ru/project/25-29-01614/>).

ABSTRACT

Introduction. The key obstacle to the development of “smart” mechanical engineering enterprises and the implementation of untended technologies lies in the “digital divide” (i.e., the gap between fully digitized process planning and the empirical setting of tool coordinates) during the dimensional setting of CNC machine tools. The design contour of pre-production engineering (PPE) has been completely digitized, but tool setup coordinates are still calculated empirically using trial runs because there is no theory describing the behavior of the non-stationary tolerance zone for a batch of workpieces in the absolute coordinate system of the machine. **Objective.** To theoretically substantiate the existence and uniqueness of the absolute coordinate of a cutting tool, guaranteeing that every workpiece in the batch, starting from the very first one, is machined within tolerance under the influence of multicomponent errors. **Methods.** The study is based on the systems analysis of technological dimensional chains and elasticity theory. The key methodological approach is axiomatic; four basic axioms are formulated (on the batch of parts, stationarity of the machine coordinate system, non-stationarity of the tolerance zone, and the generation of geometry). These axioms serve as the foundation for rigorous proofs of subsequent theorems. **Results.** Based on the adopted axioms, a theorem on the existence of a stationary “0–0 boundary” in the CNC coordinate system was formulated and proven for the first time. This boundary serves as a stationary reference datum linking the position of the non-stationary tolerance zone with the rigid machine coordinate system. Its uniqueness as a condition for minimum guaranteed stock removal is proven. An equation for the balance of tolerance and multicomponent errors is derived, which is a fundamental condition for process feasibility. An “accuracy life” criterion is introduced and justified to quantitatively evaluate the safety margin of the technological system and to limit cutting parameters. **Scientific novelty.** For the first time, the existence of an absolute setting coordinate has been analytically proven based on a system of axioms formalizing the non-stationarity of the tolerance zone and the rigidity of a CNC system. It is shown that the “0–0 boundary” is the only point that guarantees process determinism under parametric uncertainty. **Practical significance.** The developed theory provides a methodological basis for creating digital twins of operations and intelligent CAM modules that automatically calculate setting parameters. This eliminates trial machining cycles, reduces the time required for the production process, and paves the way for the implementation of untended technologies in small- and medium-scale production.

For citation: Akintseva A.V., Pereverzev P.P. Theoretical justification for calculating the absolute coordinates of a tool for dimensional setting of CNC machines to enable untended technologies. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2026, vol. 28, no. 2, pp. 99–118. DOI: 10.17212/1994-6309-2026-28-2-99-118. (In Russian).

References

1. Kuznetsov P.M., Kavernaya I.N., Kostykova O.S., Feofanov A.N. Avtomatizatsiya upravleniya tochnost'yu konturnoi obrabotki na stankakh s ChPU [Automation of contouring accuracy control on CNC machines]. *Tekhnologiya Mashinostroeniya = Technology of Mechanical Engineering*, 2023, no. 2, pp. 12–14.
2. Voronov S.A., Kiselev I.A. Geometricheskii algoritm 3MZBL dlya modelirovaniya protsessov obrabotki rezaniem. Algoritm izmeneniya poverkhnosti i opredeleniya tolshchiny srezaemogo sloya [Cutting process modelling geometric algorithm 3MZBL: algorithm of surface modification and instantaneous chip thickness determination].

* Corresponding author

Akintseva Alexandra V., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
South Ural State University (National Research University),
76 Lenin Ave.,
454080, Chelyabinsk, Russian Federation
Tel.: +7 922 633-56-57, e-mail: akintsevaav@susu.ru

Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya: Mashinostroenie = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering, 2012, no. 6, pp. 70–83.

3. Schwenke H., Knapp W., Haitjema H., Weckenmann A., Schmitt R., Delbressine F. Geometric error measurement and compensation of machines – An update. *CIRP Annals*, 2008, vol. 57 (2), pp. 660–675. DOI: 10.1016/j.cirp.2008.09.008.

4. Yu Y.-Y., Shi D.-M., Ding H., Zhang X.-M. Prediction of thin-walled workpiece machining error: a transfer learning approach. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2025, vol. 36, pp. 2803–2827. DOI: 10.1007/s10845-024-02382-7.

5. Pasko N.I., Kartavtsev I.S. Matematicheskaya model' protsessa izmeneniya razmera detalei pri tokarnoi obrabotke partii detalei [A parts dimension variation process model for batch turning]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = News of the Tula state university. Technical sciences*, 2013, no. 4, pp. 206–210.

6. Antsev A.V., Salnikov S.V., Arseneva A.A. Avtomatizirovannaya sistema kontrolya sostoyaniya rezhushchego instrumenta na osnove fil'tra Kalmana [Automated system for control of the cutting tool condition based on the Kalman filter]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = News of the Tula state university. Technical sciences*, 2022, no. 12, pp. 536–540. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-12-536-540.

7. Muratkin G.V., Sarafanova V.A. Vliyanie tekhnologicheskoi nasledstvennosti napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya na tochnost' nezhestkikh detalei [The effect of the technological heredity of the stress-strain state on the accuracy of nonrigid parts]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin = Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2020, no. 1, pp. 56–64. (In Russian).

8. Belyakov N.V., Maharinsky E.I., Maharinsky Yu.E. Pogreshnost' teoreticheskoi skhemy ustanovki [Error of the theoretical setup scheme]. *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of the Vitebsk State Technological University*, 2005, no. 9, pp. 72–77.

9. Ramesh R., Mannan M.A., Poo A.N., Keerthi S.S. Thermal error measurement and modelling in machine tools. Part II. Hybrid Bayesian Network – support vector machine model. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2003, vol. 43 (4), pp. 405–419. DOI: 10.1016/S0890-6955(02)00264-X.

10. Altintas Y., Brecher C., Weck M., Witt S. Virtual machine tool. *CIRP Annals*, 2005, vol. 54 (2), pp. 115–138. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60022-5.

11. Altintas Y., Kersting P., Biermann D., Budak E., Denkena B., Lazoglu I. Virtual process systems for part machining operations. *CIRP Annals*, 2014, vol. 63 (2), pp. 585–605. DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.007.

12. Greenwood W.H., Chase K.W. A new tolerance analysis method for designers and manufacturers. *Transactions of the ASME. Journal of Engineering for Industry*, 1987, vol. 109 (2), pp. 112–116.

13. Greenwood W.H., Chase K.W. Worst case tolerance analysis with nonlinear problems. *Transactions of the ASME. Journal of Engineering for Industry*, 1987, vol. 110 (3), pp. 232–235.

14. Bjørke Ø. *Computer-aided tolerancing*. 2nd ed. Trondheim, Tapir Publishers, 1989. 251 p.

15. Furferi R. Tolerance analysis methods for the application of ISO and ASME GD&T to mechanical component: 2D and 3D case studies. *Journal of Advanced Manufacturing Science and Technology*, 2025, vol. 5 (3), p. 2025020. DOI: 10.51393/j.jamst.2025020.

16. Grieves M. Digital Twin: Manufacturing excellence through virtual factory replication. *Digital Twin White Paper*, 2014, pp. 1–7.

17. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. Cham, Springer, 2017, pp. 85–113. DOI: 10.1007/978-3-319-38756-7_4.

18. Tao F., Liu W., Zhang M., et al. Five-dimension Digital Twin model and its ten applications. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, vol. 25 (1), pp. 1–18. (In Chinese).

19. Schleich B., Anwer N., Mathieu L., Wartzack S. Shaping the Digital Twin for design and production engineering. *CIRP Annals*, 2017, vol. 66 (1), pp. 141–144.

20. Wang S., Yu Z., Lu C., Li C. A Digital Twin-enabled hybrid deep learning approach for tool wear monitoring in CNC Milling based on multi-sensor fusion. *The Journal of Engineering*, 2026, vol. 2026 (4), p. e70180.

21. Leun E.V. Intellekturnyi tokarnyi rezets s priborami aktivnogo kontrolya temperatury zony rezaniya, razmerov izdeliya i parametrov formy ego poverkhnosti [A lathe cutter with integrated active control devices the temperature of the cutting zone, dimensions of the detail and the shape of its surface]. *Omskii nauchnyi vestnik = Omsk Scientific Bulletin*, 2017, no. 4 (154), pp. 87–93.

22. Myasnikova L.A., Kameneva A.L. Razrabotka kompleksa kontrol'no-izmeritel'nykh protsedur dlya detalei s osobo tochnymi poverkhnostyami na stankakh s ChPU [Development of a complex of control and measuring

procedures for parts with high-precision surfaces on CNC machines]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii = Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2022, no. 11 (137), pp. 32–38. DOI: 10.30987/2223-4608-2022-11-32-38.

23. Khusainov R.M., Ziangirova E.R., Lozinsky V.V. Modelirovanie pokazateley tochnosti tekhnologicheskoy sistemy obrabotki rezaniem [Modeling of accuracy indicators of the technological cutting system]. *Metalloobrabotka = Metalworking*, 2020, no. 3 (117), pp. 11–18.

24. Akintseva A.V., Pereverzev P.P. Model' rascheta tekushchego znacheniya glubiny rezaniya v avtomaticheskoy stupenchatom tsikle programmnoi podachi na operatsii ploskogo shlifovaniya s ChPU [Model of calculating the current value of the cutting depth in an automatic stepwise cycle of the programmed feed on a CNC-controlled flat grinding operation]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova = Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2022, vol. 20, no. 3, pp. 103–110. DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-3-103-110.

25. Brecher C., Manoharan D., Ladra U., Köpken H.-G. Chatter suppression with an active workpiece holder. *Production Engineering*, 2010, vol. 4 (2), pp. 239–245. DOI: 10.1007/s11740-009-0204-y.

26. Teti R., Jemielniak K., O'Donnell G., Dornfeld D. Advanced monitoring of machining operations. *CIRP Annals*, 2010, vol. 59 (2), pp. 717–739. DOI: 10.1016/j.cirp.2010.05.010.

27. Matsubara A., Ibaraki S. Monitoring and control of cutting forces in machining processes: A review. *International Journal of Automation Technology*, 2009, vol. 3 (4), pp. 445–456. DOI: 10.20965/ijat.2009.p0445.

28. Stavropoulos P., Souflas T., Papaioannou C., Bikas H., Mourtzis D. An adaptive, artificial intelligence-based chatter detection method for milling operations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, vol. 124, pp. 2037–2058. DOI: 10.1007/s00170-022-09920-8.

29. Denchik A.I., Kasenov A.Zh., Galinovsky A.L., Musina Zh.K., Abishev K.K., Tkachuk A.A. Struktura modeli imitatsionnogo modelirovaniya veroyatnostnogo protsessa formirovaniya tochnosti ispolnitel'nogo razmera [The structure of the simulation model of the probabilistic process of forming the accuracy of the required dimensions]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 6 (747), pp. 36–44.

30. Ermakov S.P., Pompeev K.P. Metodika issledovaniya vozmozhnosti avtomaticheskogo obespecheniya tochnosti tekhnologicheskikh protsessov izgotovleniya detalei [Methodology for investigating the possibility of automatically ensuring the accuracy of technological processes of parts manufacturing]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie = Journal of Instrument Engineering*, 2025, vol. 68, no. 2, pp. 176–183. DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-2-176-183.

31. Zhang H., Li Y., Xue D., Tong X., Gao B., Yu J. Digital twin technology facilitates precision improvement in complex product assembly: A progressive deduction method of data-driven tolerance allocation. *Advanced Engineering Informatics*, 2024, vol. 62, p. 102790. DOI: 10.1016/j.aei.2024.102790.

32. Van Luttervelt C.A., Childs T.H.C., Jawahir I.S., Klocke F., Venuvinod P.K., Altintas Y., Armarego E., Dornfeld D., Grabec I., Leopold J., Lindstrom B., Lucca D., Obikawa T., Shirakashi, Sato H. Present situation and future trends in modelling of machining operations. *CIRP Annals*, 1998, vol. 47 (2), pp. 587–626. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)63244-1.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2026 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).