

На правах рукописи

Белоусов Николай Алексеевич

**ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ КОНТУРНОЙ ОБРАБОТКИ
НА МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКАХ С ЧПУ ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ
КАЧЕСТВА ОБРАБАТЫВАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

Специальность 2.5.5.
Технология и оборудование механической
и физико-технической обработки

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук



Москва – 2025 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана» (Национальный исследовательский университет) (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель **Кузнецов Павел Михайлович**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты **Молодцов Владимир Владимирович**
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой станков ФГБОУ ВО
«Московский государственный
технологический университет «СТАНКИН»

Мнацаканян Виктория Умедовна
доктор технических наук, профессор кафедры
горного оборудования, транспорта и
машиностроения ФГАОУ ВО «Национальный
исследовательский технологический
университет «МИСИС»

Ведущая организация Акционерное общество «Научно-
производственное объединение «Техномаш»
имени С.А. Афанасьева»

Защита состоится ____/_____/_____ в _____ часов на заседании диссертационного совета 24.2.331.02 в Московском государственном техническом университете имени Н. Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.

Телефон для справок: 8 (499) 263-66-33 доб. 36–28.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью организации, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2025г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н, доцент



А.В. Богданов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Современное производство деталей, относящихся к авиационной и космической промышленности, характеризуется предъявлением высоких требований к качеству их поверхностей и точности геометрических размеров, а также применением специальных материалов, как правило, легко обрабатываемых (алюминиевые, магниевые сплавы и т.п.). Контуры таких деталей содержат большое количество сочетаний различных геометрических примитивов, воспроизводимых на металлорежущих станках с ЧПУ.

Применение легко обрабатываемых материалов объективно смещает оптимальные с технологической точки зрения значения контурной скорости (здесь и далее контурная скорость – результирующая скорость подачи рабочего органа станка, вектор которой равен геометрической сумме векторов скоростей перемещения этого органа вдоль осей координат станка согласно ГОСТ 20523-80) в сторону высоких значений, что в свою очередь, обусловлено более высокими значениями оптимальной величины скорости резания при использовании современных материалов режущей кромки инструмента. Таким образом, существуют предпосылки для повышения производительности контурной обработки при обеспечении качественных показателей получаемых поверхностей.

Повышение производительности достигается как снижением времени на обработку заготовки, так и за счет повышения стойкости инструмента, достигаемое выдерживанием оптимальной скорости резания. Это позволяет сократить время простоя оборудования и снизить себестоимость изготовления за счет сокращения требуемого количества инструмента на обработку одной и той же партии заготовок.

Однако, как показывает практика, при задании технологически обоснованных значений контурной скорости, точностные параметры, изготавливаемых на металлорежущих станках с ЧПУ, деталей резко ухудшаются. Снижение величины контурной скорости относительно технологически обоснованного значения (что на сегодняшний момент времени является основным путем выхода из сложившихся условий) позволяет сохранить точностные параметры поверхностей деталей, но ухудшает характеристики процесса обработки, такие как: производительность, себестоимость, чистота поверхности, а также увеличивает трудоёмкость изготовления деталей из-за необходимости дополнительных доводочных операций.

Таким образом, повышение производительности металлорежущего оборудования с ЧПУ за счет повышения контурной скорости обработки до ее технологически обоснованных значений, при обеспечении требуемого качества получаемых поверхностей, является актуальной задачей.

Степень разработанности. Исследованием вопросов точности и надежности металлорежущего оборудования занимались отечественные и зарубежные ученые, в том числе Проников А.С., Утенков В.М., Кузнецов А.П., Masory O., Burhoe J. C. и ряд других. В частности, решением вопросов, связанных с динамическими характеристиками приводов подач занимались Молодцов В.В., Бушуев В.В., Кузнецов П.М., Терехов В.М., Koren Y., Pritschow G., Altintas Y.

Целью работы является повышение производительности и качества контурной обработки на металлорежущих станках с ЧПУ путем увеличения контурной скорости до технологически обоснованных значений за счет управления точностью в процессе обработки.

Для достижения поставленной цели работы, необходимо решение следующих **научных задач**:

1. Установить взаимосвязь между величиной погрешности размеров на контуре и величиной контурной скорости.

2. Исследовать процесс зависимости величины погрешности, возникающей при перемещении инструмента по двум управляемым координатам, от величины контурной скорости и определить параметры, влияющие на нее.

3. Разработать математическую модель управления параметрами системы приводов станка и определить возможные подходы к управлению отклонением положения инструмента от заданной траектории с целью снижения величины погрешности размеров на контуре при увеличении контурной скорости.

4. Разработать алгоритм управления динамической точностью положения инструмента относительно заданной траектории.

5. Сформировать структуру канала управления, формирующего корректирующие сигналы, изменяющие текущее положение режущего инструмента в динамическом режиме.

Научная новизна работы заключается в:

– установлении взаимосвязи между величиной погрешности размера на контуре и соотношением величин рассогласования скоростных сигналов по координатам;

– разработке методики управления соотношением величин рассогласования скоростных сигналов на основе измерения и анализа их текущих значений с целью снижения погрешности на контуре;

– определении стратегии воздействия на сигналы в скоростном контуре управления приводами станка с ЧПУ без коррекции заданных величин путевых сигналов, формируемых системой управления в соответствии с управляющей программой обработки.

Теоретическая значимость работы заключается:

– в определении величины отклонения положения режущего инструмента в реальном масштабе времени относительно заданной программой траектории его движения;

– в установлении влияния величины соотношения сигналов рассогласования в скоростном контуре управления на точность перемещения инструмента относительно заготовки;

– в выявлении возможности коррекции положения инструмента в автоматическом режиме без модификации управляющей программы обработки.

– в полученной методике формирования информации о корректирующем сигнале управления положением инструмента относительно заданной траектории.

Практическая значимость работы заключается в разработке методики определения величин сигналов рассогласования в скоростном контуре управления приводами перемещения рабочих органов металлорежущих станков с ЧПУ и в

разработке рекомендаций по формированию канала управления соотношением величин рассогласования в скоростном контуре с целью повышения производительности станков с ЧПУ и обеспечения качества контурной обработки без модификации управляющей программы обработки.

Методология и методы исследования. Все разделы работы выполнялись с использованием единых научных позиций математического и физического моделирования многофакторных процессов и системного анализа. Результаты работы сформированы на основе известных теоретических положений в области динамики станков и управления приводами металлорежущих станков, теоретической механики, математического моделирования и теории матриц с применением средств вычислительной техники, программных сред Matlab, SolidWorks, а также при использовании систем ЧПУ, разработанных на кафедре «Металлорежущие станки» в ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана». Результаты экспериментальных исследований получены в лабораторных и производственных условиях с использованием современных средств измерения и вычислительной техники, математических моделей и алгоритмов, необходимых для оценки результатов исследований.

Положения, выносимые на защиту:

– алгоритм управления динамической точностью положения инструмента для обеспечения заданного качества и геометрической точности поверхностей деталей, получаемых на металлорежущих станках с ЧПУ при повышении контурной скорости;

– методика определения и управления величинами сигналов рассогласования в скоростном контуре системы управления приводами перемещения рабочего органа металлорежущего станка с ЧПУ для обеспечения требуемого положения инструмента относительно заготовки.

Степень достоверности и апробации результатов

Достоверность результатов обусловлена использованием известных теоретических положений в области динамики станков и управления приводами металлорежущих станков, системной проработкой проблемы, непротиворечивостью полученных результатов с данными других исследователей и проведенными экспериментами на фрезерном станке с ЧПУ при использовании современных средств измерения и анализа результатов.

Основные результаты работы докладывались на заседаниях кафедры «Металлорежущие станки» ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана» в 2019-2024 гг. и на заседании «Кафедры станков» ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН» в 2024г., а также на 19-ой, 21-ой, 22-ой и 23-ей Международной конференции «Авиация и космонавтика», на XLVI, XLVII, XLVIII и XLIX Международной молодежной конференции «Гагаринские чтения», по результатам выступления на которых получены дипломы третьей, второй и первой степени.

Промежуточные результаты научной работы использованы при выполнении научной исследовательской работы в рамках договора с Фондом содействия инновациям №115ГССС15-L от 22.08.2022 года по теме «Производство линейки фрезерных металлорежущих станков с системой числового программного

управления на основе открытого ПО» (Акт № 2 от 19.02.2024 г. о выполнении Работ по Договору (Соглашению) № 115ГССС15-L/78627 от 22.08.2022 г).

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Название и содержание материалов диссертационной работы соответствует пунктам 2, 3 и 4 раздела «Области исследований» паспорта специальности 2.5.5. Технология и оборудование механической и физико-технической обработки:

– теоретические основы, моделирование и методы экспериментального исследования процессов механической и физико-технической обработки, включая процессы комбинированной обработки с наложением различных физических, химических и комбинированных воздействий;

– исследование механических и физико-технических процессов в целях определения параметров оборудования, агрегатов, механизмов и других комплектующих, обеспечивающих выполнение заданных технологических операций и повышение производительности, качества, экологичности и экономичности обработки;

– создание, включая проектирование, расчеты и оптимизацию, параметров рабочего инструмента и других компонентов оборудования, обеспечивающих технически и экономически эффективные процессы обработки.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 20 научных работах, в том числе 3 публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ; 4 статьи входящих в систему цитирования Scopus; 13 статей и докладов, опубликованных в сборниках трудов научных конференций, общим объемом 5,4 п.л. / 2,42 п.л.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, общих выводов и заключения, списка литературы из 139 наименований и приложения. Общий объём диссертации 175 страниц, включая 77 рисунков и 6 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлено обоснование актуальности работы, приведена оценка степени ее разработанности, сформулированы цели и научные задачи, которые необходимо решить, указана научная новизна, теоретическая и практическая значимости работы. Приведены положения, выносимые на защиту, определены методология и методы исследования, изложены сведения о степени достоверности, апробации и реализации результатов работы.

Глава 1 работы посвящена установлению зависимости величины погрешности размеров на контуре обрабатываемой заготовки, определяемой разностью между значениями координат текущего положения инструмента и значениями координат, заданными программой управления, а также исследованию процесса перемещения инструмента по двум координатам во времени в зависимости от параметров систем следящих приводов станка.

Применение легкообрабатываемых материалов в производстве авиационной и космической техники в сочетании с использованием современного режущего инструмента позволяет задавать высокие расчетные значения контурной скорости при обработке заготовок на металлорежущих станках с ЧПУ.

Однако, при задании технологически обоснованных значений контурной скорости возрастает погрешность обработки (см. Рисунок 1), а, следовательно, точность контурной обработки снижается, поэтому на производстве вынужденно занижают оптимальные значения контурной скорости с целью сохранения геометрической точности деталей. При использовании такого подхода снижается производительность оборудования и ухудшается качество обработанной поверхности.

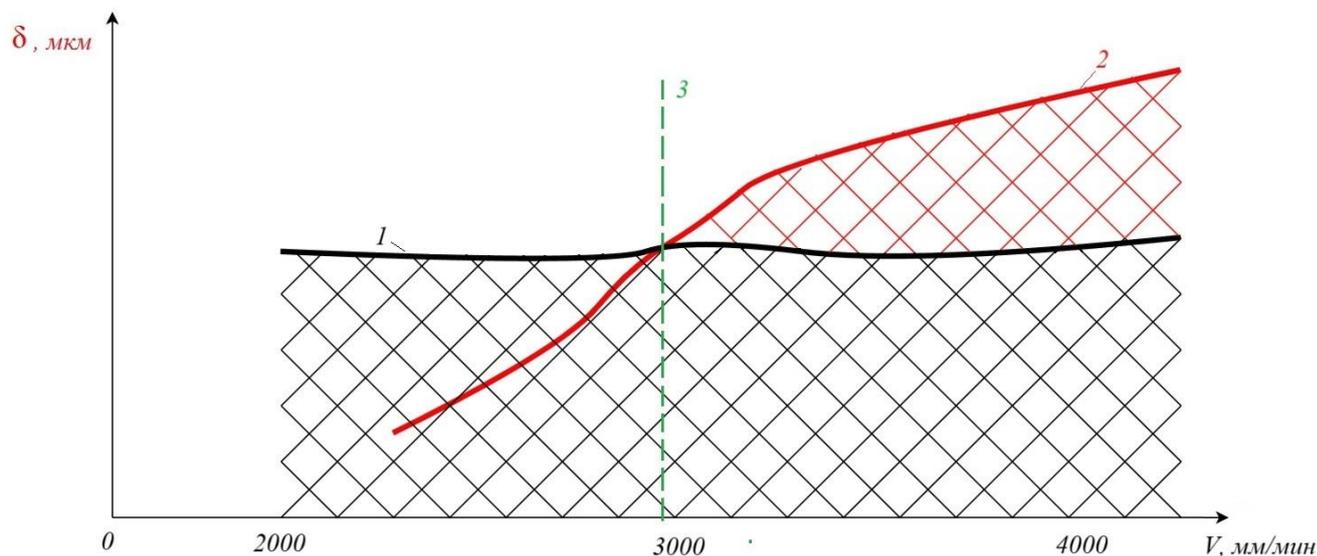


Рисунок 1. Изменение величины динамической погрешности при увеличении контурной скорости на фоне суммарной погрешности механической обработки, характеризуемой влиянием первичных погрешностей (1 — суммарная погрешность при механической обработке, характеризуемая влиянием первичных погрешностей; 2 — динамическая погрешность, обусловленная величиной рассогласования скоростного сигнала; 3 — граничный диапазон значений контурной скорости при переходе за который, динамическая погрешность оказывает преобладающее влияние на точность обработки)

Рассматриваемые ранее суммарная погрешность, характеризующая точность механической обработки, и ее составляющие — первичные погрешности, изменяются незначительно при увеличении контурной скорости (первичные погрешности связанные с установкой заготовки на металлорежущий станок и с настройкой режущего инструмента не зависят от величины контурной скорости), поэтому степень их влияния на точность геометрических размеров деталей практически не изменяется.

В то же время, с увеличением контурной скорости увеличивается величина динамической погрешности. До определённых значений контурной скорости (зависит от металлорежущего оборудования с ЧПУ и в среднем составляет примерно $\sim 3\ 000$ мм/мин) степень влияния динамической погрешности невелика, и величина погрешности не выделяется из величины суммарной погрешности при

механической обработке, в которой, в свою очередь, превалирующее воздействие оказывает погрешность, вызванная упругими деформациями. С увеличением значений контурной скорости свыше 3 000 мм/мин степень влияния динамической погрешности увеличивается, и ее величина начинает оказывать превалирующее воздействие на точность механической обработки.

Данная погрешность, как составляющая суммарной погрешности, начала проявляться только в настоящее время, что связано с изменением технологических параметров благодаря совершенствованию режущего инструмента, использованию в металлорежущих станках современных шпинделей с высокими значениями частоты вращения, а также за счет обработки легкообрабатываемых материалов, которые позволяют задавать высокие значения контурной скорости.

Исследование процесса перемещения привода подачи по одной координате (см. Рисунок 2 и Рисунок 3) и дальнейший анализ согласованной работы нескольких приводов по двум координатам x и y (см. Рисунок 4) показали, что в процессе перемещения рабочего органа станка его фактическое положение отличается от заданного, что обусловлено архитектурой системы управления с обратной связью, работающей на основе компенсации величины рассогласования заданного и фактически отработанного сигналов.

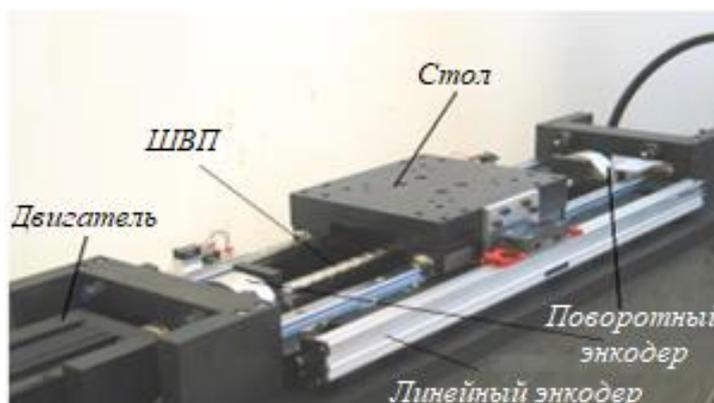


Рисунок 2. Привод, перемещающий стол станка

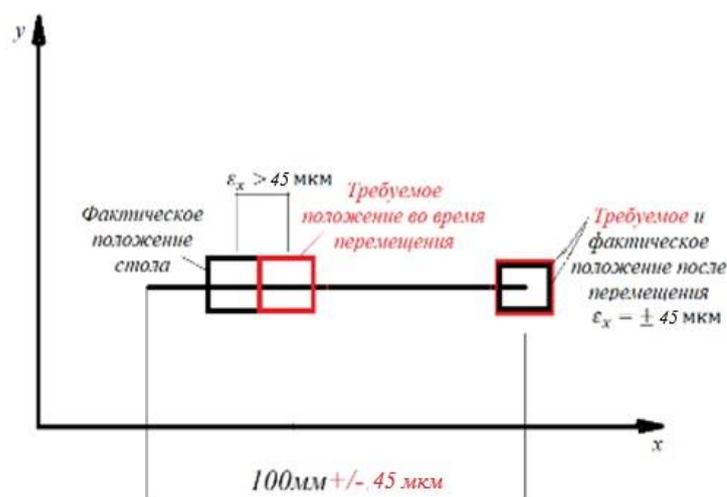


Рисунок 3. Изменение фактического положения стола от заданного в процессе перемещения

При согласованном перемещении по двум координатам рабочий орган станка перемещается по заданной траектории только в том случае, если величины рассогласования скоростных сигналов при работе систем управления каждым приводом идентичны (см. Рисунок 4, а), а если величины рассогласования скоростных сигналов не идентичны, то траектория перемещения рабочего органа станка будет отличаться от заданной (см. Рисунок 4, б), таким образом формируя погрешность обработки контура заготовки.

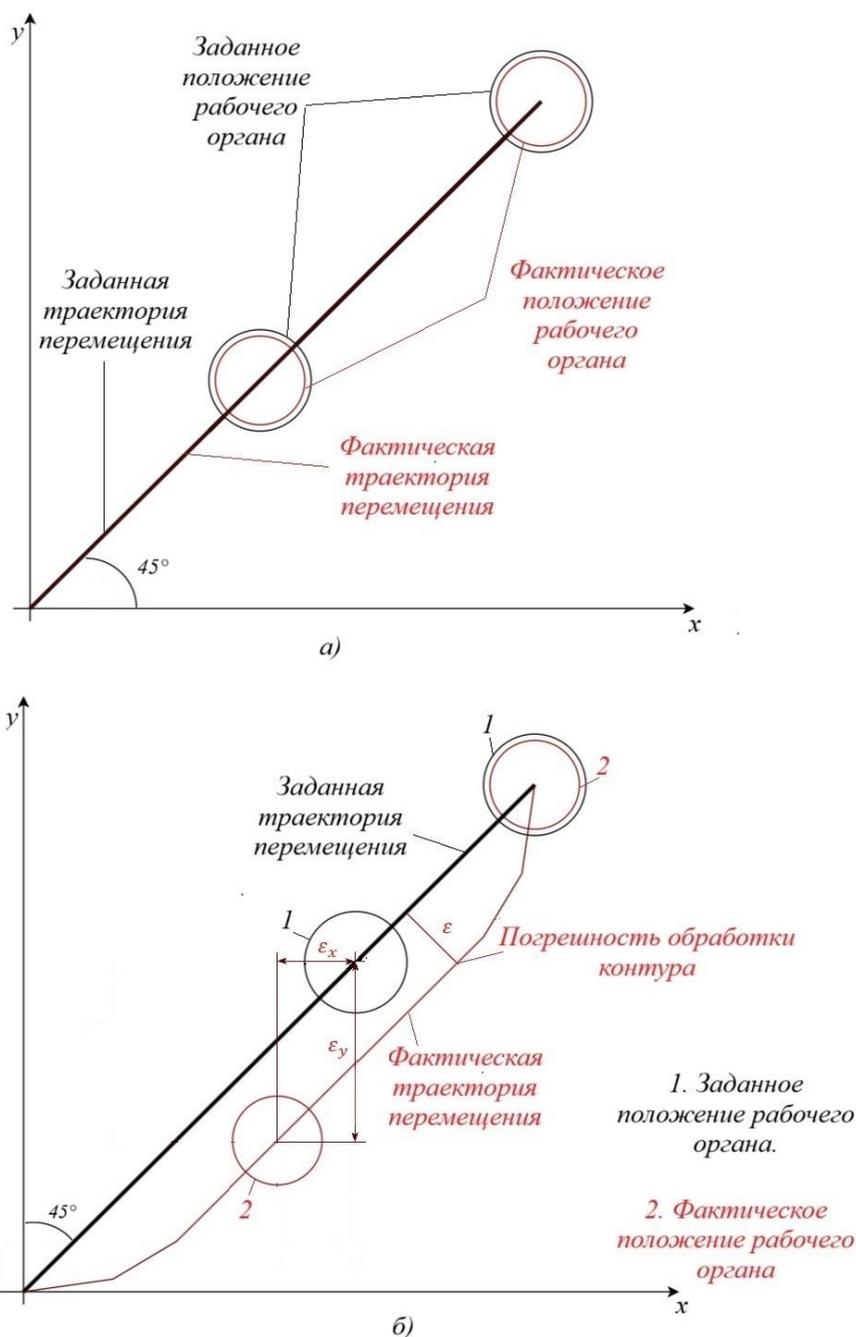


Рисунок 4. Заданное и фактическое положение рабочего органа станка в процессе перемещения по двум координатам: а) – величины рассогласования скоростных сигналов на каждом приводе идентичны; б) – величины рассогласования скоростных сигналов на каждом приводе отличны

При увеличении контурной скорости до технологически обоснованных значений, взаимодействие величин рассогласования скоростных сигналов усиливается и увеличивается отклонение фактической траектории перемещения от заданной, поэтому, чтобы обеспечить точность перемещения исполнительного органа станка по заданной траектории необходимо разработать механизм управления его положением за счет управления величинами рассогласования скоростных сигналов в приводах подачи.

Глава 2 посвящена разработке математической модели управления параметрами системы приводов станка и формированию подходов к управлению отклонением положения инструмента от заданной траектории с целью снижения величины погрешности размеров на контуре.

Для изучения и последующей разработки механизма управления положением исполнительного органа фрезерного станка (инструмента) и для разработки математической модели работы приводов станка построена комплексная модель привода экспериментального фрезерного станка портального типа «СЛБ_АС-69/200» (см. Рисунок 5), разработанного при проведении научно-исследовательской работы в рамках договора от 22.08.2022 №115ГССС15-Л с Фондом содействия инновациям по теме: «Производство линейки фрезерных металлорежущих станков с системой числового программного управления на основе открытого ПО».

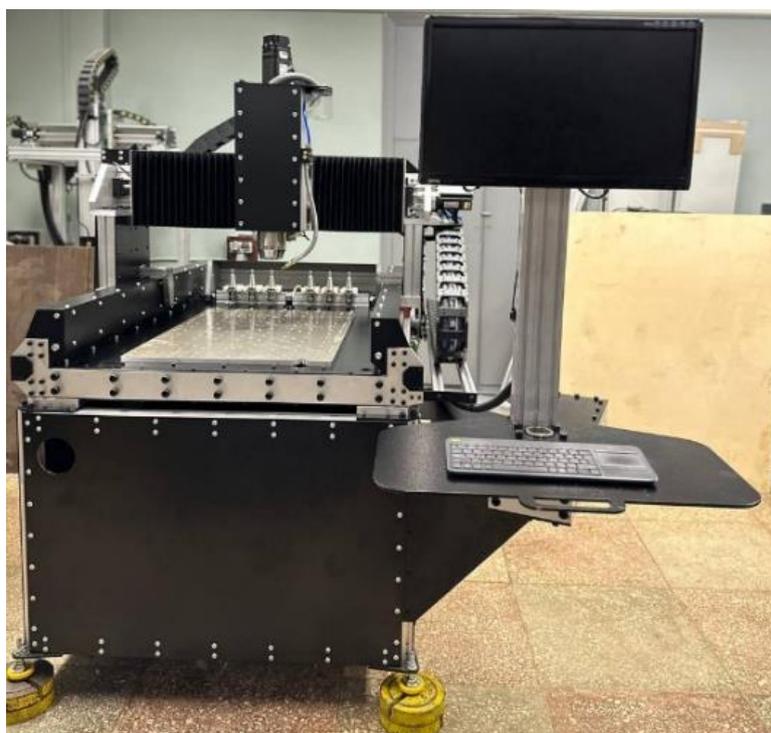


Рисунок 5. Общий вид станка «СЛБ_АС-69/200»

На Рисунке 6 показан отклик настроенной модели, описывающей работу системы управления приводами по осям x и y , на тестовую команду (X_{sim} и Y_{sim}), фактическое положение рабочего органа, перемещаемого приводом по каждой из осей (X_{act} и Y_{act}) и заданное положение рабочего органа, перемещаемого приводом

по каждой из осей (X_{cmd} и Y_{cmd}). Фактическая траектория перемещения и моделируемая согласуются, в то время как заданная траектория перемещения достаточно сильно отличается. Таким образом, разработанная модель описывает действительное положение, что позволяет признать точность и достаточность разработанной модели и продолжить разработку алгоритма управления приводами.

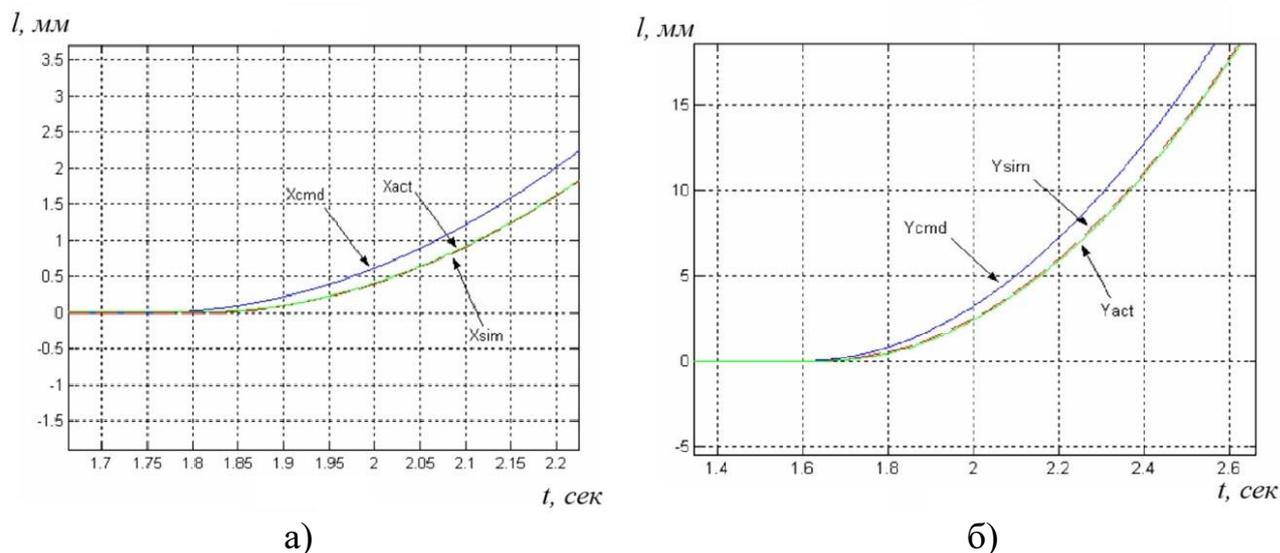


Рисунок 6. Рассогласование между заданным, фактическим и моделируемым положениями для оси x (а) и для оси y (б)

В настоящее время для повышения точности перемещения исполнительных органов металлорежущих станков с ЧПУ в системах управления используется управляющий элемент перекрестной связи (Koren Y., Pritschow G.), имеющий как

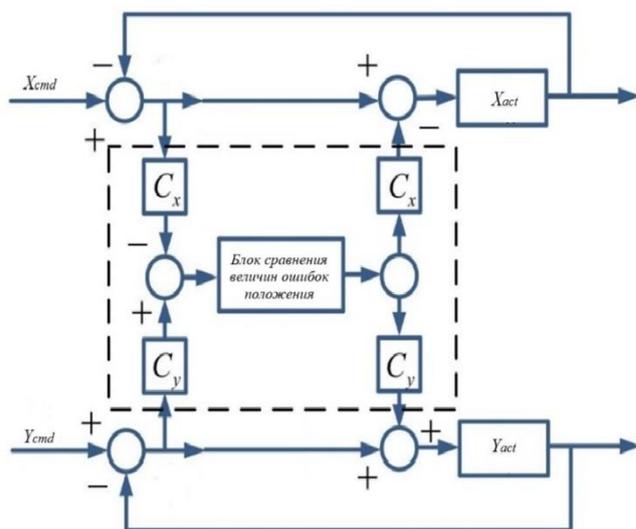


Рисунок 7. Управляющий элемент перекрестной связи

реализацию в виде дополнительного устройства в системе ЧПУ или в виде прописанного алгоритма. Архитектура элемента перекрестной связи представлена на Рисунке 7. Управляющий элемент сравнивает заданное и фактическое положение рабочего органа и на основе геометрических соотношений определяет величины корректирующих сигналов для корректировки фактического положения.

Использование управляющего элемента перекрестной связи снижает величину погрешности обработки контура при увеличении контурной скорости до технологически обоснованных значений.

Однако, данный управляющий элемент имеет существенные недостатки, так как требует построения модели величины погрешности обработки контура в реальном масштабе времени, то есть он не может быть реализован на системах управления, имеющих связь через Ethernet (семейство технологий пакетной

передачи данных между устройствами для компьютерных и промышленных сетей (ГОСТ Р ИСО15745 - 4 — 2010)), в которой информация передается последовательно и имеет некоторую задержку. Подобная реализации передачи данных используется практически во всех металлорежущих станках с ЧПУ нормального и повышенного класса точности. Кроме этого, из-за двойной структуры и повышенной вычислительной мощности, контроллер перекрестной связи работает нестабильно, особенно при обработке заготовок с большим количеством изломов траектории и сопряжений на сравнительно малом участке перемещения, что приводит к отклонению геометрических размеров детали от заданных.

При этом, на основе идеи о перекрестном (взаимосвязанном) управлении сигналами в контуре положения в четвертой главе проведена разработка механизма управления точностью положения инструмента относительно заданного положения за счет дополнительного воздействия в виде корректирующих сигналов в скоростном контуре управления.

Глава 3 работы посвящена разработке алгоритма сравнения текущих величин рассогласования скоростных сигналов по каждой из осей в динамическом режиме.

По результатам рассмотрения процесса перемещения рабочего органа металлорежущего станка с ЧПУ по двум координатам (при согласованной работе нескольких приводов подачи) установлено, что на точность перемещения оказывает влияние величина рассогласования скоростного сигнала (заданного и фактического), а именно непропорциональность (различие) величин рассогласования в каждом приводе. Для обеспечения точности перемещения исполнительного органа станка при увеличении контурной скорости до технологически обоснованных значений, разработан алгоритм сравнения величин рассогласования скоростных сигналов, определяющий привод подачи, рассогласование скоростного сигнала которого необходимо корректировать (см. Рисунок 8).

На блок №1 подаются заданное и фактическое значение скорости подачи по оси x . В блок №2 подается заданное и фактическое значение скорости подачи по оси y . В данных же блоках определяются соответствующие величины ошибок рассогласования скоростных сигналов. В блоке №3 проводится сравнение величин рассогласования скоростных сигналов. Если величины рассогласования скоростных сигналов не идентичны, то определяется привод, величину рассогласования скоростного сигнала которого необходимо увеличить, чтобы обеспечить идентичность величин рассогласования и тем самым обеспечить требуемую точность перемещения рабочего органа станка и, как следствие, точность контурной обработки. Если величины рассогласования скоростных сигналов идентичны, то корректировка значений рассогласования не требуется и приводы обеспечивают заданную точность перемещения.

Выбор управляемой координаты, то есть координаты (привода), для которой будут вноситься изменения в величину рассогласования скоростного сигнала, зависит от определенных для нее ограничений на допустимую величину скорости и ускорения, чтобы избежать перерегулирования и не нарушить стабильность

работы системы автоматического управления по данной координате. Величина корректирующих сигналов определяется при использовании уравнений 1 и 2.

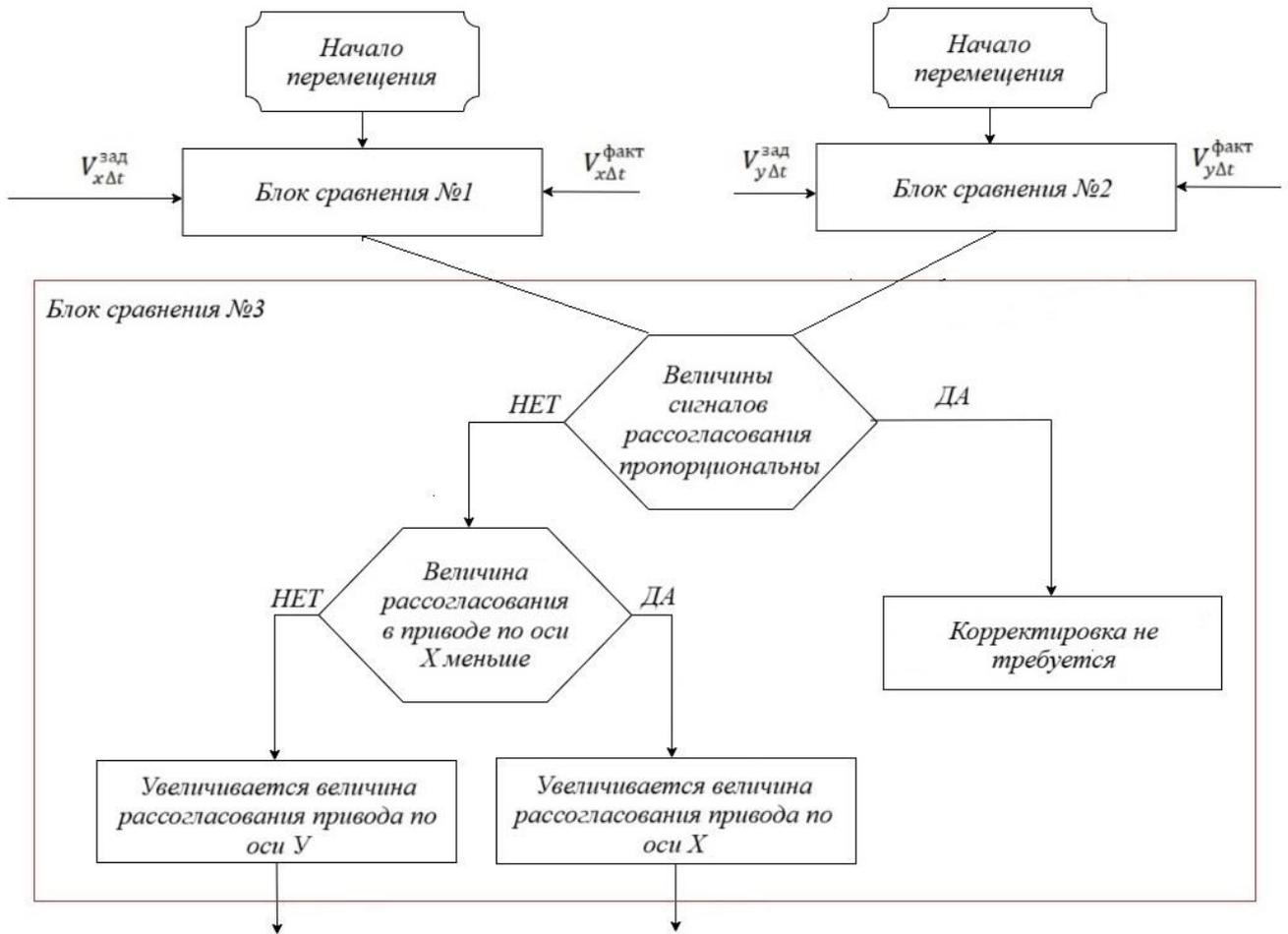


Рисунок 8. Блок-схема работы алгоритма сравнения величин рассогласования скоростных сигналов в приводах

Решение уравнений зависит от знака скоростей по осям x и y . Если скорости по осям x и y имеют одинаковый знак:

$$C_{a,i+1} = \sqrt{\frac{\left(\frac{\Delta\dot{X}_{i+1}}{\dot{X}_{max}} + \frac{\Delta\dot{Y}_{i+1}}{\dot{Y}_{max}}\right) \left(-\left(\frac{\Delta\dot{X}_{i+1}}{\dot{X}_{max}}\right) \left(\frac{\Delta\dot{Y}_i}{\dot{Y}_{max}}\right) + \left(\frac{\Delta\dot{Y}_{i+1}}{\dot{Y}_{max}}\right) \left(\frac{\Delta\dot{X}_i}{\dot{X}_{max}}\right)\right)}{\left(\frac{\Delta\dot{X}_i}{\dot{X}_{max}}\right)^2 + 2\left(\frac{\Delta\dot{Y}_i}{\dot{Y}_{max}}\right) \left(\frac{\Delta\dot{X}_i}{\dot{X}_{max}}\right) + \left(\frac{\Delta\dot{X}_i}{\dot{X}_{max}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\dot{X}_{i+1}}{\dot{X}_{max}}\right) \left(\frac{\Delta\dot{Y}_i}{\dot{Y}_{max}}\right) + \left(\frac{\Delta\dot{Y}_{i+1}}{\dot{Y}_{max}}\right) \left(\frac{\Delta\dot{X}_i}{\dot{X}_{max}}\right)}}} \quad (1)$$

Если скорости по осям x и y имеют разные знаки:

$$C_{a,i+1} = \sqrt{\frac{\left(\frac{\Delta\dot{X}_{i+1}}{\dot{X}_{max}} + \frac{\Delta\dot{Y}_{i+1}}{\dot{Y}_{max}}\right) \left(\left(\frac{\Delta\dot{X}_{i+1}}{\dot{X}_{max}}\right) \left(\frac{\Delta\dot{Y}_i}{\dot{Y}_{max}}\right) - \left(\frac{\Delta\dot{Y}_{i+1}}{\dot{Y}_{max}}\right) \left(\frac{\Delta\dot{X}_i}{\dot{X}_{max}}\right)\right)}{\left(\frac{\Delta\dot{X}_i}{\dot{X}_{max}}\right)^2 - 2\left(\frac{\Delta\dot{Y}_i}{\dot{Y}_{max}}\right) \left(\frac{\Delta\dot{X}_i}{\dot{X}_{max}}\right) + \left(\frac{\Delta\dot{X}_i}{\dot{X}_{max}}\right)^2 - \left(\frac{\Delta\dot{X}_{i+1}}{\dot{X}_{max}}\right) \left(\frac{\Delta\dot{Y}_i}{\dot{Y}_{max}}\right) + \left(\frac{\Delta\dot{Y}_{i+1}}{\dot{Y}_{max}}\right) \left(\frac{\Delta\dot{X}_i}{\dot{X}_{max}}\right)}}} \quad (2)$$

Глава 4 работы посвящена разработке архитектуры канала управления соотношением величин рассогласования скоростных сигналов по двум координатам и разработке алгоритма формирования корректирующих сигналов для изменения положения режущего инструмента (исполнительного органа металлорежущего станка с ЧПУ), а также проведены экспериментальные исследования в части обеспечения точности контурной обработки при увеличении контурной скорости (производительности) за счет использования разработанного алгоритма и проведён сравнительный анализ при использовании стандартных способов управления точностью.

Канал управления, формирующий корректирующие сигналы, изменяющие текущее положение режущего инструмента в динамическом режиме, реализован на основе архитектуры перекрёстной связи скоростных контуров управления и работает по принципу увеличения рассогласования скоростного сигнала в приводе, перемещающимся с меньшей величиной рассогласования, что позволяет обеспечить не только требуемое соотношений пропорций величин ошибок рассогласования скоростных сигналов и заданных скоростных сигналов в управляемых приводах, но и не нарушает динамическую стабильность всей системы, поскольку не превышаются предельно допустимые величины коэффициентов усиления и, следовательно, не нарушается стабильность работы системы управления.

Постоянная во времени корректирующего контура – контроллера соотношения величин ошибок рассогласования скоростных сигналов для управляемых приводов определяется следующим образом:

$$\begin{aligned}
 T &= F\bar{T} \\
 &= Fk(\dot{e} + ae) + F(Y_d\hat{\theta}) + Fe \\
 &= Fk\left\{\frac{d}{dt}(F^T x_d - F^T x) + a(F^T x_d - F^T x)\right\} + F(Y_d\hat{\theta}) + F(F^T x_d - F^T x) \\
 &= Fk\frac{d}{dt}(F^T x_d - F^T x) + ak(x_d - x) + F(Y_d\hat{\theta}) + (x_d - x) \\
 &= Fk\left(vRF^T x_d + F^T \frac{\dot{x}_{d\text{зад}}}{\dot{x}_{d\text{факт}}} - vRF^T x - F^T \frac{\dot{x}_{\text{зад}}}{\dot{x}_{\text{факт}}}\right) + ak(x_d - x) + F(Y_d\hat{\theta}) \\
 &\quad + (x_d - x) \\
 &= kv(FRF^T)(x_d - x) + (ak + 1)(x_d - x) + k\left(\frac{\dot{x}_{d\text{зад}}}{\dot{x}_{d\text{факт}}} - \frac{\dot{x}_{\text{зад}}}{\dot{x}_{\text{факт}}}\right) + F(Y_d\hat{\theta})
 \end{aligned} \tag{3}$$

Структура разработанного канала управления, формирующего корректирующие сигналы для обеспечения требуемого соотношения величин рассогласования скоростных сигналов представлена на Рисунке 9.

На Рисунке 10 приведены изображения обработанной поверхности заготовок типа «корпус» при стандартной настройке систем управления приводами (Рисунок 10, а) и при использовании разработанного алгоритма соотношения величин рассогласования скоростных сигналов (Рисунок 10, б). Как видно из

представленных рисунков, поверхность обработки чище, а на обработанном контуре отсутствуют сколы.

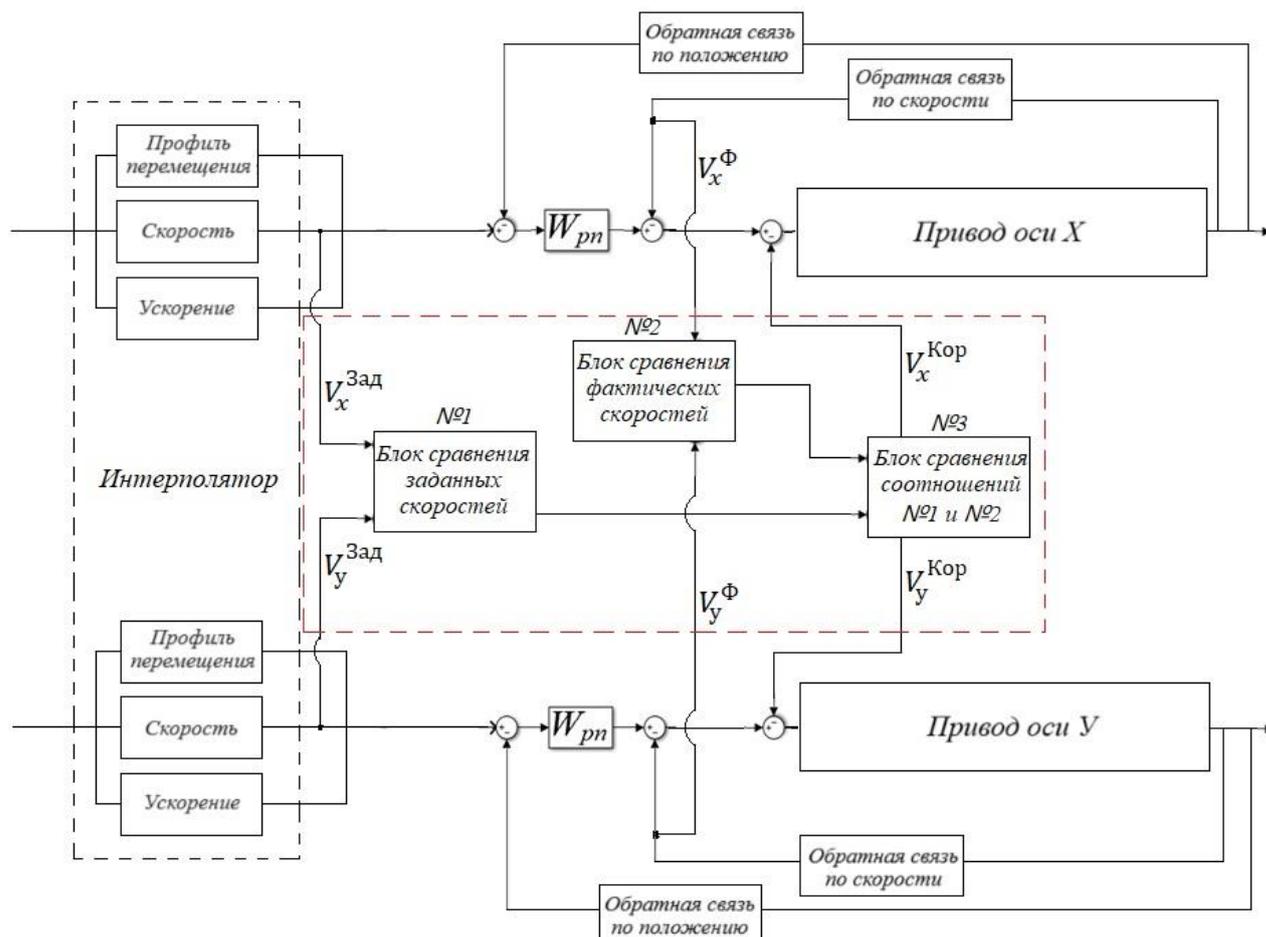


Рисунок 9. Канал управления соотношением величин рассогласования скоростных сигналов по двум координатам

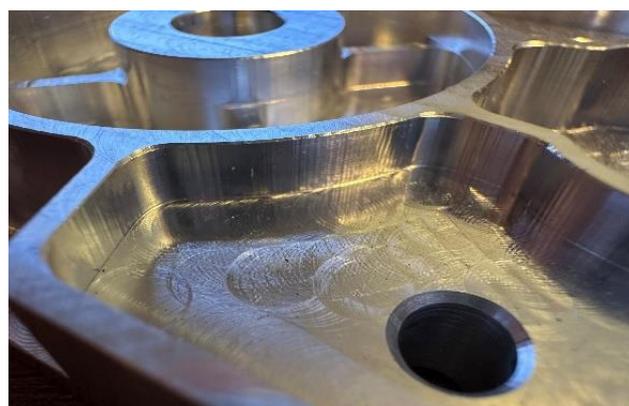
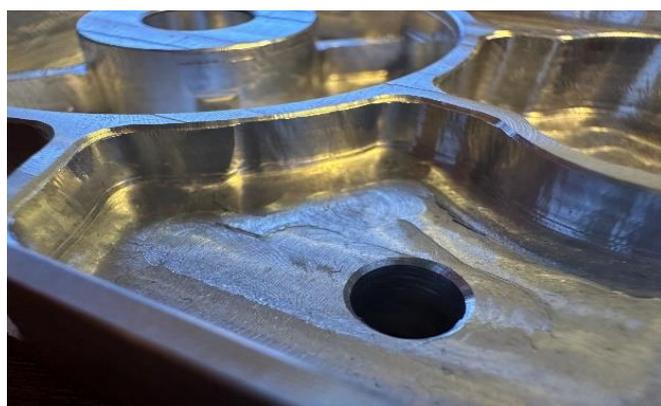


Рисунок 10. Поверхность заготовки: а) – при стандартной конфигурации драйверов управления; б) – при использовании алгоритма соотношения скоростных сигналов

Таким образом, использование алгоритма поддержания необходимого соотношения величин рассогласования обеспечивает возможность обработки на

технологически обоснованной контурной скорости, то есть без изменения (снижения) расчетных режимов резания, что позволяет сохранить характеристики процесса обработки, такие как: производительность, себестоимость, чистота поверхности и не ухудшает точностные параметры поверхностей деталей.

Общие выводы по диссертационной работе

1. Металлорежущие станки с ЧПУ не обеспечивают требуемой точности перемещения исполнительного органа при увеличении контурной скорости до технологически обоснованных значений.

2. Заданная величина скорости подачи и фактическая величина скорости подачи на каждом приводе (по каждой координате) отличаются на величину рассогласования скоростного сигнала, значение которой определяется динамическими характеристиками приводов подачи.

3. При увеличении контурной скорости до технологически обоснованных значений (свыше 3 000 мм/мин), на точность обработки превалирующее воздействие оказывает динамическая ошибка, обусловленная увеличением диспропорции величин рассогласования скоростных сигналов.

4. При перемещении исполнительного органа станка под углами 45°, 135°, 225° и 315° к осям координат, величина погрешности, вызванная непропорциональностью рассогласования скоростных сигналов, достигает максимальной величины, поэтому заготовку необходимо базировать на столе станка таким образом, чтобы снизить протяженность участков траектории перемещения, расположенных под указанными углами.

5. Для обеспечения требуемой точности при контурной обработке с использованием технологически обоснованных значений контурной скорости (3 500 мм/мин и более) необходимо обеспечить пропорциональность величин рассогласования скоростных сигналов.

6. Разработанная математическая модель, описывающая текущее положение исполнительного органа станка в зависимости от величины рассогласования скоростного сигнала управления, позволяет определять его реальное положение во времени.

7. Возможность поддержания необходимой пропорции величин рассогласования скоростных сигналов при контурной обработке требует применения дополнительных корректирующих сигналов в скоростном контуре системы управления.

8. Разработанный подход к формированию корректирующих сигналов по скорости позволяет управлять точностью контурной обработки без изменения управляющей программы обработки.

9. Разработанный канал управления обеспечивает реализацию процессов управления точностью контурной обработки при увеличении контурной скорости.

10. Предложенные в работе новые, научно-обоснованные технические решения, позволяют повысить производительность контурной обработки на металлорежущих станках с ЧПУ при обеспечении требуемого качества получаемых поверхностей.

Приложения содержат: управляющие программы для драйверов управления приводами подачи, алгоритм работы контроллера перекрестной связи и алгоритм разработанного скоростного контроллера перекрестной связи, а также акт внедрения результатов диссертационной работы в АО «Эталон».

Список публикаций по теме диссертации

1. Кузнецов П.М., Белоусов Н.А., Ягопольский А.Г. Управление точностью траектории движения рабочего органа станка с ЧПУ // СТИН. 2021. № 7. С. 2-4. (0,28 п.л. / 0,11 п.л).
2. Модальная диагностика материалов для изготовления базовых деталей металлорежущих станков / Н. А. Белоусов [и др.] // СТИН. 2022. № 2. С. 16-20. (0,87 п.л. / 0,17 п.л).
3. Обеспечение точности обработки сложных контуров на металлорежущих станках с ЧПУ / Н. А. Белоусов [и др.] // СТИН. 2023. № 11. С. 2-5. (0,43 п.л. / 0,21 п.л).
4. Control of Trajectory Precision in a CNC Machine Tool / N. A. Belousov [et. al.] // Russian Engineering Research. 2021. Vol. 41, № 10. P. 934-935. (0,28 п.л. / 0,11 п.л).
5. Modal Diagnostics of Materials for Metal-Cutting Machines / N. A. Belousov [et. al.] // Russian Engineering Research. 2022. Vol. 42, № 4. P. 387-390. (0,87 п.л. / 0,17 п.л).
6. Belousov N.A., Kuznetsov P.M., Control of the movement error of the executive body of the CNC machine // XLV Academic Space Conference, Dedicated to the Memory of Academician S.P. Korolev and Other. 2022. № 2549. P. 1–8. (0,51 п.л. / 0,34 п.л).
7. Accurate Machining of Complex Contours on CNC Metal-Cutting Machines / N. A. Belousov [et. al.] // Russian Engineering Research. 2024. Vol. 43, № 12. P. 1567-1570. (0,43 п.л. / 0,21 п.л).
8. Белоусов Н. А. Разработка программного обеспечения расчёта корректирующих сигналов для обеспечения точности контурной обработки деталей со сложной геометрией контура // Гагаринские чтения.: Тез. докл. XLV Межд. конф. Москва. 2019. С. 312-313. (0,1 п.л. / 0,1 п.л).
9. Кузнецов П. М., Белоусов Н. А. Контроль выполнения управляющей программы приводом подачи по отдельным координатам в реальном масштабе времени для повышения точности контурной обработки // Будущее машиностроения России.: Тез. докл. Всерос. конф. Москва. 2019. С. 3-5. (0,1 п.л. / 0,07 п.л).
10. Кузнецов П. М., Белоусов Н. А. Цифровизация производственной системы изготовления изделий авиационной техники // Всероссийская научно-методическая конференция, посвященная 100-летию со дня рождения Н.П. Малевского.: Тез. докл. Всерос. конф. Москва. 2020. С. 14-16. (0,15 п.л. / 0,08 п.л).
11. Кузнецов П. М., Белоусов Н. А. Моделирование корректирующих сигналов обеспечения точности контурной обработки деталей со сложной

геометрией контура // Гагаринские чтения.: Тез. докл. XLVI Межд. конф. Москва. 2020. С. 392-393. (0,13 п.л. / 0,07 п.л).

12. Кузнецов П. М., Белоусов Н. А Управление точностью контурной обработки на станках с ЧПУ // Авиация и космонавтика.: Тез. докл. Межд. конф. Москва. 2020. С. 249-250. (0,14 п.л. / 0,09 п.л).

13. Белоусов Н. А., Дерюгин А.С. Управление точностью двухкоординатной контурной обработки на станках с ЧПУ // Гагаринские чтения.: Тез. докл. XLVII Межд. конф. Москва. 2021. С. 348-349. (0,13 п.л. / 0,1 п.л).

14. Кузнецов П. М., Белоусов Н. А Управление ошибкой перемещения исполнительного органа станка с ЧПУ // XLV Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва. Королёвские чтения 2021.: Тез. докл. Межд. конф. Москва. 2021. С. 132-134. (0,15 п.л. / 0,09 п.л).

15. Белоусов Н. А., Гвинджилия М. Р. Управление контурной ошибкой линейного привода подачи // Гагаринские чтения.: Тез. докл. XLVIII Межд. конф. Москва, 2022. С. 241-242. (0,16 п.л. / 0,12 п.л).

16. Кузнецов П. М., Белоусов Н. А Система управления изготовлением деталей аэрокосмической техники сложного контура // XLVI Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва. Королёвские чтения 2022.: Тез. докл. Межд. конф. Москва. 2022. С. 88-90. (0,14 п.л. / 0,06 п.л).

17. Белоусов Н. А., Охрименко Н.И. Обеспечение точности обработки сложных контуров на металлорежущих станках с ЧПУ // Гагаринские чтения.: Тез. докл. XLIX Межд. конф. Москва. 2023. С. 287. (0,12 п.л. / 0,08 п.л).

18. Кузнецов П. М., Белоусов Н. А Управление величиной контурной ошибки на металлорежущих станках с ЧПУ // Авиация и космонавтика.: Тез. докл. Межд. конф. Москва. 2022. С. 193-194. (0,14 п.л. / 0,08 п.л).

19. Кузнецов П. М., Белоусов Н. А Управление точностью обработки сложных контуров на станках с числовым программным управлением // XLVII Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва. Королёвские чтения 2023.: Тез. докл. Межд. конф. Москва. 2023. С. 317-318. (0,15 п.л. / 0,09 п.л).

20. Кузнецов П. М., Белоусов Н. А Повышение производительности металлорежущего оборудования с ЧПУ за счет управления качеством обрабатываемых поверхностей // Авиация и космонавтика.: Тез. докл. Межд. конф. Москва. 2023. С. 121-122. (0,12 п.л. / 0,07 п.л).