

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра «Оборудование и технологии машиностроительного производства»

(наименование)

15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение

машиностроительных производств»

(код и наименование направления подготовки)

Технология автоматизированного машиностроения

(направленность (профиль))

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему Разработка комплексной методики определения технических
характеристик малогабаритных станков

Студент

М.С. Судиловский

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный

к.т.н., доцент Д.А. Расторгуев

руководитель

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2020

Содержание

Введение.....	3
1 Обзор методов диагностики и испытаний оборудования.....	6
1.1 Основные положения о испытаниях и диагностике станков	6
1.2 Точность станков	7
1.3 Жесткость станков	9
1.4 Методы машинного обучения	13
1.5 Анализ точности и эффективности обработки	16
1.6 Определение прямолинейности движения.....	19
2 Динамика процесса фрезерования.....	31
2.1 Общие положения	31
2.2 Модель фрезерования.....	33
2.2 Оптимизация фрезерования	42
3 Методики испытания станков.....	47
3.1 Виды испытаний и контролируемые параметры	47
3.2 Измерение жесткости станка	47
3.3 Определение баланса деформаций шпиндельного узла - фрезы	49
3.4 Геометрическая точность станка.....	50
4 Методика испытаний и диагностики геометрической точности	56
4.1 Параметры точности.....	56
4.2 Проверка на параллельность и перпендикулярность движения	56
4.3 Методы и средства измерений.....	58
4.5 Установка станка.....	60
4.5 Подготовка проверки и настройка контрольных приборов	61
4.6 Тест на стабильность системы.....	63
5 Анализ жесткости и динамических параметров станка	67
Заключение	80
Список используемой литературы	85

Введение

Все больше станков различного исполнения выпускают в категории малогабаритных, портативных или настольных. Они предназначены для обработки в основном методами фрезерования пластика, дерева, цветных сплавов. Обработка заключается в формировании пазов различной конфигурации, отрезки, разрезки, гравировки. Инструмент – мелкоразмерные фрезы. При необходимости можно оборудовать такие станки головками для лазерной обработки, 3D печати полимерными материалами, контрольными головками.

Для качественной обработки такие станки должны обладать определенными конструктивными параметрами. К ним относят жесткость конструкции, жесткость сопряжений-стыков, демпфирование динамических возмущений, конструктивная точность относительных перемещений узлов станка, точность позиционирования при отработке управляющих воздействий. При этом из-за малых габаритов такие станки обладают незначительной жесткостью и при обработке возникают динамические процессы возмущений. По видам такие возмущения могут одновременно относиться к вынужденным или параметрическим колебаниям, а также к автоколебаниям.

Цель работы – комплексная систематизация требований к малогабаритным станкам портального типа, предназначенных для фрезерных и гравировальных работ и разработка методики для обеспечения и определения этих параметров для конкретного станка, разработанного в рамках проекта «Формула-станок».

Необходимо выявить закономерности в поведении формообразующих технологических подсистем при изменении их пространственных связей по перемещению, скорости, ускорению для обеспечения параметров по точности деталей.

Достижение указанной цели обеспечивается за счет решения следующих задач:

- классификации технических требований к станкам;
- анализ и расчет размерных требований в рамках размерного анализа сборочных конструкторских цепей;
- разработка методики определения геометрических параметров станка;
- разработка методики определения конструктивных параметров станка (жесткости, демпфирования);
- экспериментальное исследование жесткости, демпфирования станка;
- разработка рекомендаций по формированию технических параметров станка в виде паспорта технологического оборудования.

Гипотеза исследования состоит в том, что для эффективного использования портативных фрезерных станков с автоматизированным управлением необходимо иметь заверенные надежные данные по:

- геометрической точности;
- конструктивной и эксплуатационной жесткости в статическом и динамическом состоянии;
- надежности работы механической части и системы управления.

Теоретико-методологическую основу исследования составили технология машиностроения, теория конструирования деталей машин, размерный анализ, моделирование методом конечных элементов.

Базовыми для настоящего исследования явились также: теория конструирования станков.

Методы исследования: теоретическое моделирование, натурные испытания.

Опытно-экспериментальная база исследования - прототип портативного фрезерного станка.

Теоретическая значимость исследования заключается в:

- систематизации требований к портативным станкам;

- разработке методики по определению в статическом состоянии геометрических параметров портативного фрезерного станка;

- методике определения деформации в статическом и динамическом состояниях рабочего органа фрезерного станка в рабочем пространстве в зависимости от его положения направляющих элементов.

Практическая значимость исследования заключается в разработке комплексной методики для формирования геометрических характеристик станка по параллельности, перпендикулярности, стабильности позиционирования в рабочей области станка с учетом различных положений на направляющих инструментального шпинделя. Методика определения частотных характеристик собственных частот и форм колебания зависимости от позиционирования рабочего органа станка на направляющих элементах.

Достоверность и обоснованность результатов исследования обеспечивались:

- основанном на реальных характеристиках станка теоретическом моделировании;

- размерным анализом для обоснования технических требований для отдельных деталей;

- использованием экспериментальных данных, полученных на реальном прототипе.

1 Обзор методов диагностики и испытаний оборудования

1.1 Основные положения о испытаниях и диагностике станков

Для обеспечения высокой точности и стабильности размеров деталей возникает необходимость разработки новых способов и методов технологического воздействия на заготовку. Это требует разработки новых конструкций станков и модернизации технологического оборудования. Одним из направлений современного машиностроения является все более широкое применения малогабаритных, портативных, настольных металлорежущих станков.

На данном оборудовании обрабатывают различные материалы. Детали по своим параметрам могут относиться к группе прецизионных изделий. Технологические методы обеспечения размерной точности и ее стабильности при изготовлении таких высокоточных деталей характеризуются различными технологическими параметрами, условиями выполнения, технологическим обеспечением, схемами установки заготовки, кинематикой формообразования, которые в значительной степени определяются характеристиками станков. При их большом разнообразии, неопределенных технических параметрах станков спрогнозировать точность обработки на таком оборудовании затруднительно. Паспортные данные или отсутствуют или могут отличаться в худшую сторону из-за маркетинговых преувеличений. На таких станках реализуются процессы механической, электрохимической, электроэрозионной обработки, лазерной резки и маркировки, аддитивные процессы. Они направлены в первую очередь на формирование геометрии детали с обеспечением ее точности. Изменения в структуре, если происходят, затрагивают поверхностные слои на небольших глубинах. Изменения напряженно-деформированного состояния в объеме, если происходят на данных этапах, связаны с нарушением внутреннего равновесного состояния при снятии неравномерного припуска.

Существуют типовые методики испытаний и проверки станков, разработанные на основе еще станкостроительного опыта советской промышленности и на основе Российских стандартов [1-5].

Существует обширная литература по вопросам проектирования станков, их элементов [6-8]. Вопросы динамики станков заложены в работе [9]. На более современном уровне самоорганизующихся процессов в технологических системах рассмотрены особенности функционирования станков в [10].

1.2 Точность станков

Для проверки станков применяют ряд стандартов, которые регламентируют различные параметры и методики их определения. В стандартах рассматриваются методы определения точности узлов и деталей станков, стандарты измерения точности, классификация ошибок измерений. Точность станка определяется точностью перемещения между любыми двумя точками в рабочей зоне станка или максимальной погрешностью вращения.

Погрешность - это отклонение измеренного значения от «номинального» значения параметра. У параметра точность есть характеристика - повторяемость. Это ошибка позиционирования между несколькими последовательными попытками переместить узел станка в одно и то же положение. Повторяемость часто считается наиболее важным параметром станка с ЧПУ. Часто задача состоит в том, чтобы диагностировать эти ошибки и затем компенсировать их. Чтобы улучшить повторяемость по позиционированию, необходимо свести к минимуму статическое трение в направляющих, механизмах подачи и тепловые погрешности. Для станков достижение точности с точки зрения механической части является сложной и дорогостоящей задачей, тогда как повторяемость определяется больше характеристиками системы управления.

Станок характеризуется линейной, плоской или объемной точностью. Для настольного станка более актуальными являются линейная и плоская точность.

Разрешение или дискретность позиционирования - это то, насколько точно обрабатывается сигнал управления. Это наименьшее заметное изменение в интересующем нас параметре, которое может быть обнаружено контрольным инструментом. Другое определение - наименьшее приращение положения, которое может быть задано системой управления движением или наименьший программируемый шаг, наименьший механический шаг, который может выполнить станок во время движения от одной опорной точки до другой по заданной траектории. Эта дискретность дает нижнюю границу повторяемости (рисунок 1).

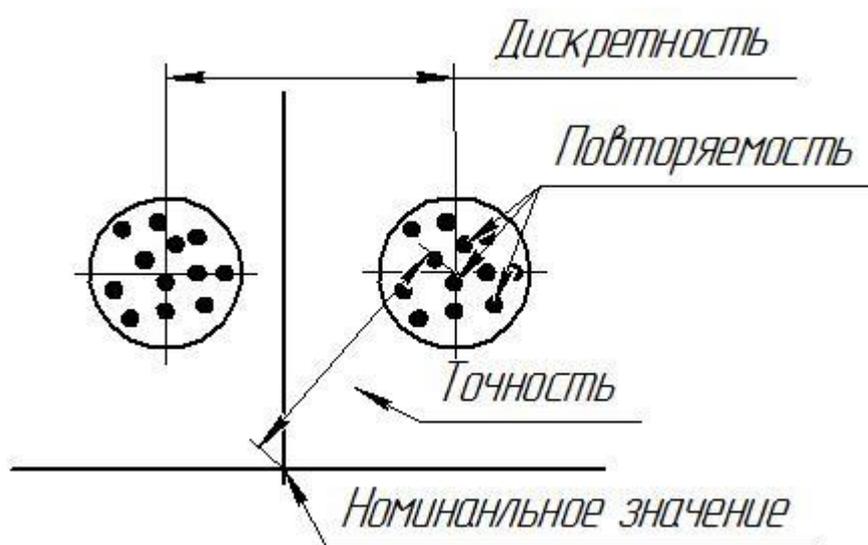


Рисунок 1 - Схема точности, дискретности и повторяемости

Повторяемость может характеризоваться каким-либо законом распределения и описываться кривой распределения данного параметра. Измеряемые характеристики станка описываются средним значением параметра и его среднеквадратичным отклонением. Первый параметр задает точность, второй – стабильность или повторяемость процесса.

Существует ряд нормативных документов, которые в разных аспектах нормируют показатели оборудования. Они входят в группу стандартов серии ИСО 230. К ним относят ГОСТ Р ИСО 230 – 1 – 2010 Испытания станков. Часть 1. Методы измерения геометрических параметров. Точность геометрических параметров станков, работающих на холостом ходу или на чистовых режимах.

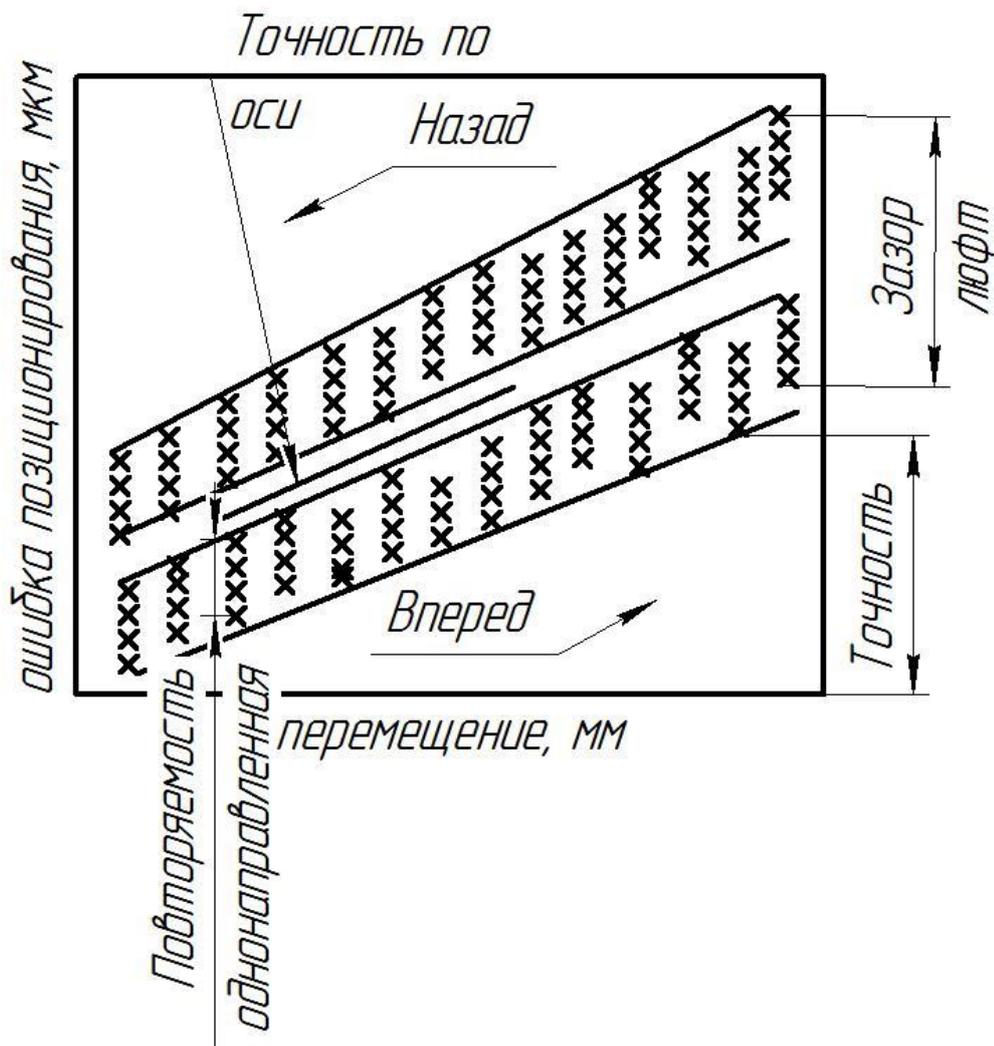


Рисунок 1.2 - Схема положения точек позиционирования станка

1.3 Жесткость станков

В статье [37] рассматривается жесткость упругой системы станка с высокими требованиями к точности и производительности. Эти критерии

проектирования являются одними из наиболее важных критериев для обрабатываемого оборудования. Для более корректной оценки рассматривается оценка жесткости в общем случае, когда имеет место одновременное действие силы и момента.

Проблема обеспечения жесткости при обработке определяется типом станка. Проблема определения жесткости станка связана с физическим различием между понятиями - коэффициентами линейной и круговой жесткости. Это проявляется, в частности, в разных их единицах измерения. Для преодоления этого недостатка вводится понятие - коллинеарное значение жесткости (КЗЖ), которое представляет эквивалентную жесткость при одновременном линейном и вращательном смещениях. Данное понятие справедливо для статической и динамической оценок. Для оценки станка может использоваться новый безразмерный критерий, связанный с проектированием оборудования: отношение минимального КЗЖ к жесткости привода станка, которая обычно представляет собой самое слабое место современных станков. В качестве примера применения разработанного подхода рассматривается рабочее пространство вертикально фрезерного станка.

Использование КЗЖ позволяет количественно отобразить следующий важный факт: зависящее от кинематики обработки изменение жесткости в станках традиционного типа в основном определяется структурной жесткостью деталей машин. Системы станков с параллельной структурой вносят дополнительную составляющую в жесткость, которая зависит от взаимной ориентации узлов станка. Собственно, жесткость традиционной компоновки станка существенно зависит от жесткости станины, в то время как жесткость станка параллельной структуры (типа трипод) зависит как от жесткости базовой станины, так и от изменения жесткости при относительном изменении ориентации движущейся платформы. Результаты показывают, что относительно лучшие характеристики жесткости имеют машины с последовательной стандартной компоновкой, а станки с

параллельной кинематической схемой имеют более низкие показатели жесткости.

В последние годы в обрабатывающей промышленности наблюдается рост требований к точности и повышению производительности обрабатываемых деталей. Для достижения этих параметров производители оборудования должны определять наиболее важные характеристики, определяющие рабочие характеристики станка. При проектировании применяют методы многофакторной оптимизации для поиска наилучших конструктивных параметров. Жесткость, это способность механической упругой системы станка выдерживать нагрузки от процесса обработки без значительного изменения ее геометрии (деформации) [39]. Это один из важнейших критериев проектирования механических узлов, технологических систем и станков. Жесткость напрямую влияет на точность позиционирования и является одним из ключевых параметров, используемых для сравнения станков с различными кинематическими типами [27]. В станках существуют критические направления, вдоль которых прогибы должны быть минимальными, то есть жесткость должна быть максимальной. Для достижения этой цели проводятся многочисленные исследования [49 - 51].

Жесткость пространственной конструкции может характеризоваться не только одним коэффициентом, а матрицей коэффициентов жесткости или просто матрицей жесткости. Параметры этой матрицы могут иметь неоднородные единицы измерения. При ее применении могут возникать вычислительные трудности, а также трудности определение значений параметров этой матрицы.

В статье [24] рассматриваются основные ограничения производительности для фрезерных операций, связанные с вибрациями. В частности рассматриваются вибрации, возникающие от резания по «следу». С этими вибрациями связаны два ключевых параметра: глубина резания, достижимая без вибраций, и частота вибрации. Оба параметра связаны с

динамикой возбуждения узлов станка и параметрами фрезерования. Их определение в любом направлении резания при работе фрезерного станка требует сложных аналитических моделей и комплексного моделирования, которые обычно применяются только для определения наихудших условий резания в работающих станках.

Использование методов машинного обучения позволяет обойтись без расчета двух вышеупомянутых параметров с помощью трех этапной методики. Она включает в себя следующие шаги: 1) экспериментально определяют частотные характеристики, приведенные в точке нахождения инструмента; 2) проводят аналитические расчеты частотных параметров по двум направлениям; и 3) применяют методы машинного обучения. Результаты этих расчетов затем могут быть использованы для прогнозирования вибрации при различных комбинациях направлений фрезерования и положения узлов станка.

Эта методика подтверждена реальными экспериментами на фрезерном станке, выполняющим черновое фрезерование стали 45 фрезой диаметром 125 мм, оснащенной девятью резцами с углом 45° . Результаты подтвердили высокую изменчивость частотных характеристик по рабочей зоне станка.

Тестировались следующие методы регрессии: искусственные нейронные сети, и новые статистические подходы по регрессиям, которые и показали максимальную точность и преимущество перед другими моделями машинного обучения. Погрешность по точности составила 0,95 мм для критической глубины резания и 7,3 Гц для частоты вибрации во всей рабочей зоне станка и по всем направлениям подачи. Эти среднеквадратичные значения являются приемлемыми с промышленной точки зрения, принимая во внимание, что критическая глубина этого диапазона варьируется между 0,68 мм и 19,20 мм и частотой вибрации от 1,14 Гц до 65,25 Гц. Данные статистические модели легче оптимизировать, чем искусственные нейронные сети.

Жесткость станка совместно с демпфирующими свойствами определяет совокупность динамических и статических смещений станка. Производительность операций фрезерования в основном ограничена появлением вибраций, вызываемых самим процессом. Кинематика фрезерования с периодическими ударами при врезании зубьев и изменения толщины припуска на каждом зубе при вращении инструмента приводит к вибрациям регенеративного типа (резания по «следу»). Имеется обширная библиография по подавлению вибрации для регенеративных колебаний инструментов и деталей [7, 8]. Меньше изучен вопрос по собственным формам колебаний, связанный с элементами станка с низкой динамической жесткостью. С этими вибрациями связаны два ключевых параметра: глубина резания, которая может быть достигнута без этих регенеративных вибраций, и частота вибраций.

Соответственно, механические характеристики фрезерного станка должны сначала определяться для конкретных положений фрезы в рабочей зоне станка в виде экспериментальных частотных характеристик. В сочетании с определенными параметрами инструмента и аналитической моделью сил фрезерования с определением толщины стружки в динамике экспериментальные динамические параметры позволяют провести дискретный расчет критических глубин резания и частот колебаний по всей рабочей зоне станка.

1.4 Методы машинного обучения

Использование методов машинного обучения позволяет полученные модели включать в средства проектирования, которые предоставляют полезную информацию для инженера-проектировщика о критических характеристиках станка и процессах обработки. Для вертикально-фрезерного станка необходимо определить оси, в направлении которых возникает сильная зависимость частоты вибрации от жесткости упругой системы. По

этим осям могут быть необходимы конструктивные изменения в упругой системе для снижения этого влияния.

Машинные методы обучения могут применяться для производственных и лабораторных исследований, особенно в отношении несбалансированных наборов данных. Это связано с ограничениями по материальным затратам на исследования, временными ограничениями, экстремальными и уникальными ситуациями, для которых характерно сильное зашумление данных. Кроме того, для определения динамических характеристик фрезерных станков в реальных условиях работы применяются методы измерений в режиме реального времени.

Использование методик машинного обучения для испытаний портативных станков настольного типа позволит существенно ускорить исследования с связи с меньшими эксплуатационными и временными затратами.

Для повышения надежности моделирования, обоснованности принятых конструктивных и технологических решений, также необходимо использовать методы машинного обучения. Для лабораторных, а тем более учебных условий, возникает проблема в ограниченности размеров экспериментальных данных. Эта проблема возникает из-за сложности исследований таких станков. Трудно поместить в ограниченную зону обработки систему измерительных датчиков. Ограничения существуют также по доступности образцов и инструмента.

Исходя из этих ограничений видно, что количество экспериментов для сбора данных, необходимых для моделирования, ограничено. Кроме того, динамика процесса резания, частота вибраций, амплитуда и глубина резания для портативных станков зависит от расположения фрезерной головки. При каждой модернизации конструкции станка эти параметры изменяются, что требует проведения дополнительных исследований. До настоящего времени не было попыток смоделировать частоту вибрации в портативных станках с использованием методов машинного обучения. Первый подход использует

методы машинного обучения для классификации текущего статуса обработки. Эти состояния оцениваются в основном как «стабильные» и «нестабильные» условия резания [47], [50], [41]. Вторым подходом, представленным в литературе [26], [28], является использование математических моделей на основе методов машинного обучения для прогнозирования максимальной стабильной глубины резания в реальном времени.

Были протестированы различные алгоритмы машинного обучения для классификации состояния устойчивости процесса обработки в реальном режиме времени. Например, исследователь в [37] использует машины опорных векторов (support vector machine - SVM), используя только сигналы тока двигателя, а затем радиальные базисные функции и многослойные перцептроны (Multi Layer Perceptron - MLP). Эти средства используют данные, основанные на сигналах о колебаниях, для классификации процесса резания, как стабильного или нестабильного.

В [31] использовали вейвлет-разложение, чтобы извлечь статистические параметры из вибрационных сигналов, собранных акселерометрами на шпинделе машины, и подать их в обученную искусственную нейронную сеть (ИНС). В этом случае метод вейвлет-разложения был предпочтительнее преобразования Фурье. В [22] использовалась та же методика, основанная на вейвлет-разложении для колебательных сигналов, но с использованием машины опорных векторов для классификации состояний с учетом в этом случае трех состояний: вибрация, отсутствие вибрации и переходное состояние.

Дополнительно была использована нечеткая логика в качестве алгоритма диагностики в [41] для прогнозирования глубины резания, обеспечивающей стабильную обработку без вибраций. В работе сравнивали различные алгоритмы машинного обучения: регрессионный анализ, ИНС и деревья решений. Они пришли к выводу, что ИНС дает лучшие результаты, когда алгоритмы основаны на полной и четкой информации о параметрах заготовок, материале и геометрии резцовых вставок, режимах резания. Также

если имелась полная информация о параметрах колебаний, полученных в результате реальных экспериментов на различных материалах заготовок (алюминии, никелевом сплаве и стали).

1.5 Анализ точности и эффективности обработки

Производительность обработки и качество поверхности после обработки зависят от многих параметров процесса, от режимов резания и контура обрабатываемой поверхности, и соответственно, распределения припуска [20], пространственной ориентации инструмента [43] и сил резания [17]. В подавляющем большинстве случаев вибрации вызваны обработкой по следу (регенеративные колебания) [30], [43]. Режущая кромка инструмента обрабатывает предварительно обработанную поверхность. При этом возникают силы, которые приводят к колебаниям деталей и узлов станка с самой низкой динамической жесткостью. Эти режимы могут быть связаны либо с несущими конструктивными элементами станка [21], [24] (обычно с очень низкой частотой, ниже 200 Гц), либо с системой инструмента шпинделя-держателя инструмента [44] (на более высоких частотах, выше 200 Гц) или к заготовке, когда она имеет гибкие тонкие стены или основание (выше 500 Гц) [23]. Обычно частоты возбуждения, связанные с операциями фрезерования, находятся в диапазоне ниже 100 Гц. В конкретном случае при обработке мелкогабаритным инструментом с частотой порядка 5000 об/мин частота возбуждения оказывается выше 200 Гц. Стабильность процесса фрезерования в случае портативных фрезерных станков малой мощности сильно зависит от соотношения жесткостей инструмента и шпинделя, а также модальных параметров конструкции станка. Необходимо учесть также характеристики заготовки и схемы ее установки. Поэтому критические режимы обработки связаны с конструктивными параметрами фрезерного станка и определяются собственными частотами упругой системы станка.

Что касается вибраций, то ключевыми параметрами являются собственная частота колебаний подсистемы инструмента и глубина резания, при которой происходит процесс самовозбуждения и появления автоколебаний. Первый параметр представляет интерес для конструктора станка. Подбирать параметр необходимо вне зоны частот, возникающих в процессе обработки. Вторым параметром может быть изменен инженером-технологом до начала обработки. Определение этих ключевых параметров: собственной частоты колебаний и вибрации при резании, а также глубины резания требует анализа и учета ряда следующих параметров.

Материал заготовки необходим для нахождения коэффициента удельной силы резания. Тип инструмента (его геометрия, количество зубьев фрезы, угол наклона режущей кромки) определяет и частотные характеристики процесса и силовые. Также учитываются параметры обработки (радиальная и осевая глубина, скорость резания, подача и так далее), модальные параметры системы заготовка-приспособление-станок [35].

Все эти параметры связаны с операцией обработки, за исключением модальных параметров элементов станка. Они меняются в определенных положениях узлов при обработке, определяются конструкцией станка и зависят в первую очередь от конструктивной жесткости элементов оборудования. Из-за незначительной жесткости оборудования и особенно инструмента при фрезеровании на портативных станках следует учитывать сложные взаимосвязи процессов обработки, упругой системы для обеспечения устойчивости. Для высокой точности и обоснованности моделирования, параметры модели должны быть определены на основе экспериментальных данных.

В [45] рассматривается численное моделирование сил, возникающих при фрезеровании и их влияние на деформации и напряжения, возникающие в конструкции станка. На основании разработанной силовой модели обработки с учетом скорости подачи в разных направлениях исследовалась

критическая нагрузка и ее влияние на деформацию упругой системы станка. Результаты такого анализа являются исходными данными для оптимизации элементов конструкции станка, которые необходимо скорректировать.

Для анализа статических напряжений и деформаций рамной станины станка, подвергаемой различным нагрузкам в процессе фрезерования, разрабатываются математические модели. В дополнение к деформации рамы станка должна была исследована точность позиционирования фрезерного инструмента, представленная смещением контрольной точки в вершине инструмента. Результаты исследования показывают следующую картину. Как следует из результатов численного моделирования, получена максимальная деформация рамы станка в направлении оси X. Наибольшее значение напряжения было локализовано в линейных направляющих и узле крепления шпинделя фрезерного станка. Позиционирование заготовок с учетом этого необходимо проводить так, чтобы обработка вдоль заготовки проводилась в другом направлении. Для расширения технологических возможностей станка необходимо пересмотреть конструкцию машины, уделив особое внимание жесткости машины в направлении оси X.

В [42] рассматривается непрерывное измерение жесткости узлов станка в рабочей зоне. По сравнению с обычным измерением жесткости эта методика является специфичным измерением, поскольку учитывает влияние скорости нагрузки на статическую выходную характеристику жесткости. Этот эффект является дополнительным диагностическим индикатором, и на данный момент является малоизученным параметром статической жесткости для станков малоразмерного класса. Например, если скорость нагрузки превышает деформацию 5 мкм/с, жесткость станка значительно возрастает. Жесткость изменяется приблизительно вдвое, от 43 до 84 Н мкм⁻¹. Чтобы устранить скоростное влияние на измерение коэффициента жесткости, скорость нагрузки была снижена, а также применялось специальное программное обеспечение для оценки. Методология измерения очень

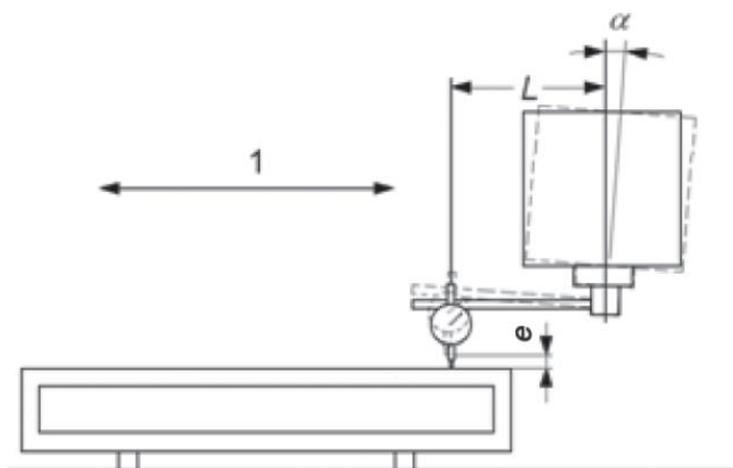
эффективна с точки зрения времени измерения, и она подходит для определения жесткости станков портативного класса.

1.6 Определение прямолинейности движения

Ошибки в прямолинейности движения узла станка, движущегося по линейной траектории, напрямую влияют на прямолинейность и плоскостность обработанных поверхностей. Также влияние оказывается на форму, расположение и ориентацию других геометрических элементов заготовки, обработанных на станке. Методы измерения влияния погрешности движения на прямолинейность основаны на измерении смещения узла относительно эталона, который задает прямолинейность. Опорным значением прямолинейности может быть физический объект (линейный, натянутый провод) или опорные линии, обеспечиваемые световым лучом оптического устройства. Эталон прямолинейности должен быть расположен приблизительно параллельно направлению движения подвижного узла и обеспечивать аналогичные показания на обоих концах рабочего хода. Измерительный преобразователь контролирует отклонения расстояния между эталоном прямолинейности и траекторией движения в различных точках. Они могут быть распределены равномерно или случайно по всей длине измерения. Измерение ошибки движения по прямолинейности зависит от расположения и направления линии измерения. Поэтому аналогичные проверки для одного и того же движения, выполняемого в разных местах, могут иметь разные результаты. На рисунке 3 влияние угловой погрешности α представлено как

$$e = \sin(\alpha) \cdot L, \quad (1)$$

где L - длина смещения, м.

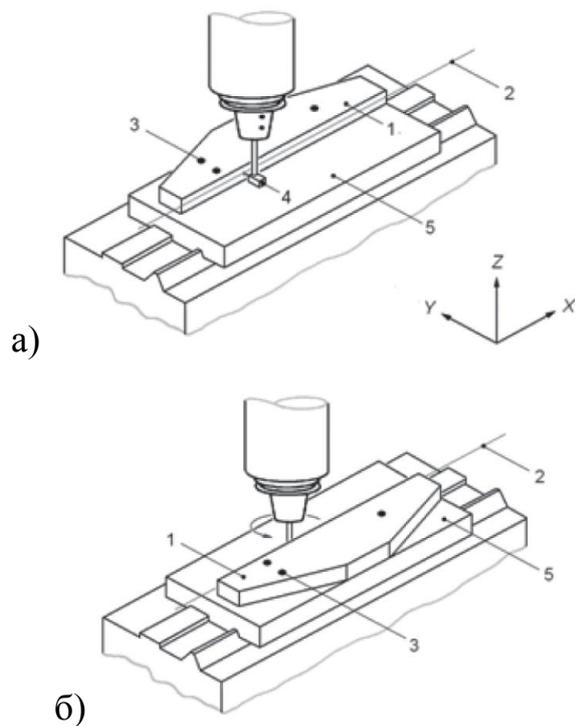


1 - линейное движение; e - отклонение из-за угловой погрешности движения и смещения; L - длина смещения; α - угловая погрешность

Рисунок 3 - Влияние движения угловой ошибки на измерения прямолинейности

Измерительная установка включает в себя линейку и датчик линейного перемещения. В этой схеме измерения эталоном прямолинейности является линейка. При данной схеме можно учитывать отклонения прямолинейности в вертикальном и горизонтальном направлениях. Для измерений отклонений от прямолинейности в вертикальном направлении, прямая линия должна фиксироваться в двух точках, которые дают минимальное отклонение из-за силы тяжести.

Датчик линейного перемещения должен быть расположен как можно ближе к функциональной точке движущегося узла (элемент крепления инструмента или заготовки). Измерение должно производиться путем перемещения датчика линейного перемещения по прямой и регистрации наблюдаемых смещений. При обработке данных измерений следует учитывать известные ошибки базовой линейки. Если линейные ошибки неизвестны, их можно определить и удалить из измерений погрешности движения по прямолинейности в горизонтальной плоскости с использованием метода обращения (рисунок 4).



1 линейка; 2 измерительная линия; 3 опорные точки линейки (3) с обеих сторон; 4 датчика линейного перемещения; 5 машинный стол

Рисунок 4 - Установка измерения прямолинейности с использованием линейки: а – нормальное измерение; б – обратное измерение

Особенность метода обращения линейки для измерения прямолинейности движения заключается в том, что после того, как при первом проходе измерения записаны для нормальной, обычной установки, линейка поворачивается на 180° относительно ее продольной оси. Датчик линейного перемещения также поворачивается, чтобы считывать смещение относительно той же базовой поверхности линейки (рисунок 4, б). Затем измерения повторяются, перемещая узел станка и записывая отклонения. На отклонения E_1 и E_2 обоих графиков влияют ошибка прямолинейности эталонной поверхности линейки и погрешность движения по прямолинейности. Однако из-за особой конфигурации двух схем, возможно алгебраически разделить эти отклонения. На рисунке 5 средний график М представляет отклонения эталонной грани линейки. Применяются уравнения (2) и (3):

$$M(X) = \frac{E_1(X)+E_2(X)}{2}, \quad (2)$$

$$S(X) = \frac{E_1(X)-E_2(X)}{2}, \quad (3)$$

где $M(X)$ - отклонение от прямолинейности эталонной поверхности линейки в данной позиции измерения X ;

$S(X)$ - отклонение от прямолинейности оси движения в данной позиции измерения X ;

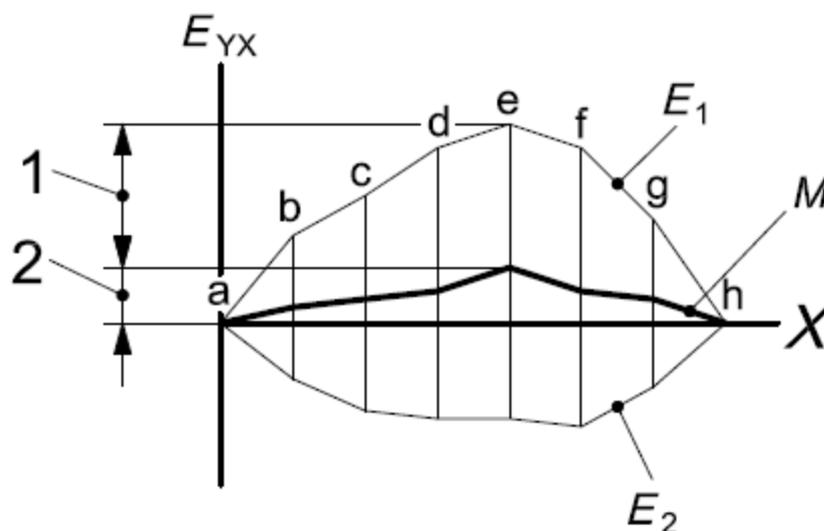
$E_1(X), E_2(X)$ - данные измерений, полученные при прямом и обратном измерениях.

Процедура измерения и анализ данных. Узел станка, движение которого должно быть проверено, должен быть перемещаться в ряд целевых положений в пределах его диапазона движения. Интервалы измерения должны быть не более 25 мм для направляющих длиной 250 мм или менее. Для более длинных траекторий интервал не должен превышать 1/10 длины движения. В заданном положении узел должен оставаться в покое достаточно долго для возможности записи данных.

Измерение может проводиться в непрерывном режиме (на ходу) в зависимости от используемого измерительного оборудования и предполагаемого использования станка. Скорость перемещения по умолчанию должна соответствовать скорости подачи.

Необходимо согласовать параметры используемого измерительного оборудования, схему настройки для измерения погрешности и способы использования станка. Графическое представление результатов измерений является предпочтительным. Данные испытаний должны включать в себя дату, время, станок, используемый инструмент, положение измерительной траектории, смещения заготовки (координаты ее начальной и конечной точки), смещения инструмента. Необходимо описать метод анализа (определение контрольной линии, номер прохода), режим измерений

(непрерывный или прерывистый), время задержки при снятии показаний, если измерения проводятся с остановкой. Если измерения на ходу, то снимаются скорость и направление подачи, положение не тестируемых осей.



X - ось X ; E_{YX} - отклонения от прямолинейности X в направлении оси Y ; 1 - ошибка прямолинейности X в направлении оси Y [$S(X)_{\max}$]; 2 - ошибка прямолинейности линейки; a, h – крайние точки измерений; $E_1(X)$ - график прямых измерений; $E_2(X)$ - график обратных измерений; M – среднее арифметическое $E_1(X), E_2(X)$.

Рисунок 5 - Определение погрешности прямолинейности линейным методом

Измерение угловых ошибок движений. Для каждой линейной оси движения станка должны быть измерены три угловых ошибки движения в ортогональных направлениях. Датчик для измерения угла должен быть отрегулирован так, чтобы измерять относительную угловую погрешность движения между базовой поверхностью для закрепления инструмента и поверхностью для закрепления заготовки, когда узел станка движется вдоль своей линейной оси движения.

Схема измерения и контрольно-измерительные приборы. Обычные методы измерения угловой погрешности движения используют лазерные

угловые интерферометры или автоколлиматоры. Для станка проекта «Формула-станок» для измерения угловых ошибок используются точные уровни для измерения наклона горизонтальных осей (поворота вокруг оси линейного движения).

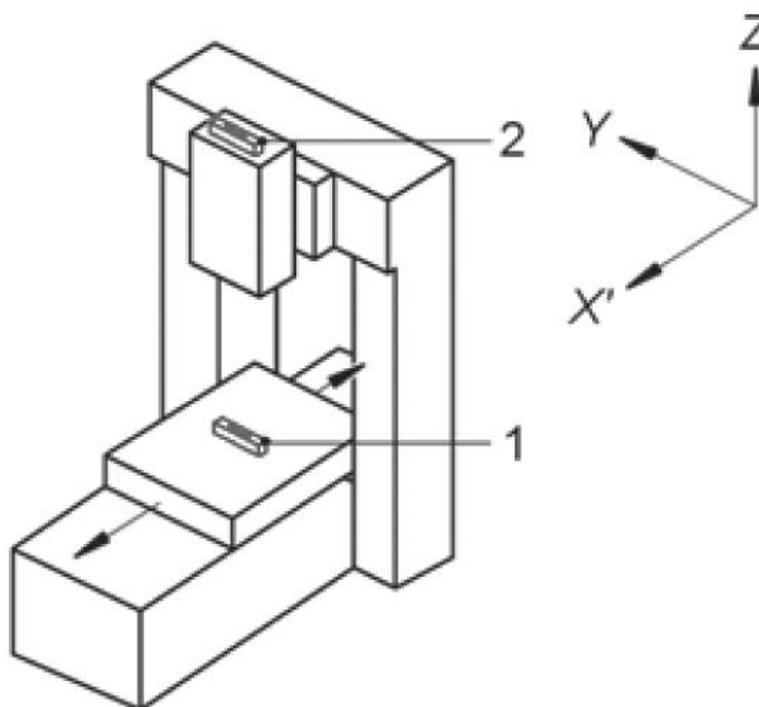
Когда проходит линейное движение в горизонтальной плоскости, уровень может измерять угловую ошибку в двух направлениях.

Измерение уровнями проводится следующим способом. При использовании точного уровня инструмент должен быть прикреплен к движущемуся узлу. Для определения взаимной угловой ошибки между узлом станка, в котором закреплен инструмент, и узлом для закрепления заготовки, измерения выполняются с использованием двух уровней (смотри рисунок 6).

Метод с использованием отдельного измерения отклонения от прямолинейности. Это измерение выполняется путем проведения двух параллельных измерений этого параметра. Принцип иллюстрируется на рисунке 7, который показывает схему для измерения наклона вертикального подвижного шпинделя с использованием угольника и одного или двух датчиков линейного перемещения. Этот способ может быть применен к любому вертикальному подвижному элементу. Датчики настроены на измерение прямолинейности в направлении перпендикулярном линии движения узла. Он перемещается вдоль оси, перпендикулярной направлению измерения прямолинейности, и эти данные фиксируются. Затем датчик проводится вдоль угольника и измерение повторяется. Затем шпиндель станка перемещается в горизонтальной плоскости в положение 2 (смотри рисунок 7).

Датчик линейного перемещения устанавливается на удлинительном рычаге (позиция 5), чтобы снова войти в контакт с базовой измерительной поверхностью, и процедура измерения повторяется. Необходимо выполнить измерение по той же линии вдоль контрольной поверхности угольника. Угловое отклонение в любом данном вертикальном положении - это разница между двумя измеренными локальными значениями отклонения

прямолинейности в этой позиции, деленная на расстояние между двумя положениями шпинделя.



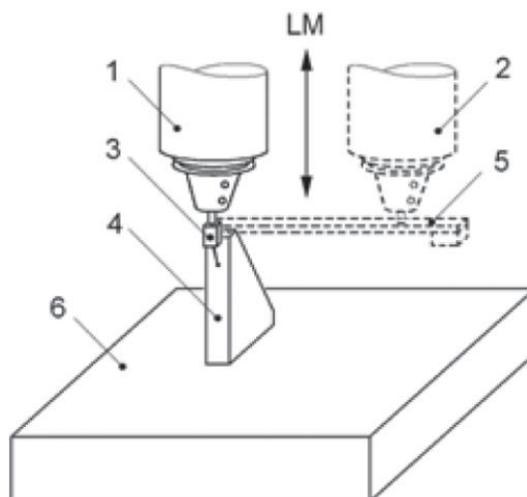
1 - уровень; 2 - эталонный уровень

Рисунок 6 - Измерение угловой погрешности движения по оси X

Поскольку во время процедуры измерения необходимо переместить один ползун станка (либо стол, либо каретка со шпинделем), чтобы приспособить удлинитель в направлении, отличном от вертикального, измерение наклона по вертикальной оси должно быть скорректировано с учетом изменения угловой ориентации стола или шпинделя, вызванные этим движением. Чтобы избежать этой потенциальной проблемы, ползун можно перемещать в поперечном направлении (например, в положение 2 шпинделя на рисунке 7) и перенастраивать с использованием уровня.

Процедура измерения и анализ данных проводится в следующем порядке:

1. Станок должен быть запрограммирован на перемещение контрольного измерительного датчика и позиционирование его в серии заданных положений.



1 - позиция 1 шпинделя; 2 - позиция 2 шпинделя; 3 - датчик линейного перемещения; 4 - линейка, установленная на столе станка; 5 - кронштейн для смещенного положения шпинделя 2; 6 – стол; LM - линейное направление движения

Рисунок 7 - Измерение наклона вертикально движущегося ползуна с использованием дифференциальных измерений прямолинейности

В заданном положении станок остается в покое достаточно долго для записи данных отклонения (линейного или углового). Заданные позиции выбирают во всем диапазоне перемещения по оси. Интервалы измерения должны быть не более 25 мм для траекторий движения длиной 250 мм или менее. Для более длинных траекторий движения интервал не должен превышать 1/10 длины оси.

По крайней мере, один набор однонаправленных измерений выполняется во всех целевых позициях. Скорость перемещения должна быть согласована пользователем и производителем. Набор измерений должен состоять из координат точек заданных положений и соответствующих показаний измерительного датчика. Вместо дискретных измерений в

выбранных позициях допускаются непрерывные измерения в пределах диапазона измерений.

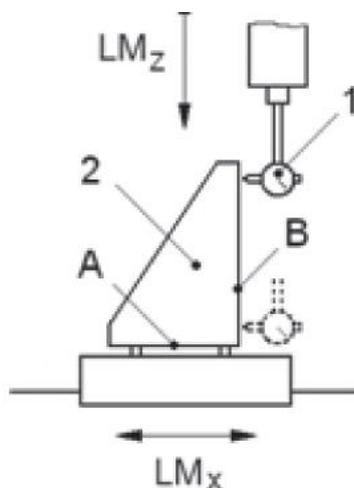
Отклонение от перпендикулярности осей движения. Измерение отклонения от перпендикулярности между двумя осями движения состоит из двух измерений погрешности параллельности между осью линейного движения и неподвижной осью, где неподвижные оси представлены опорной плитой или поверочной линейкой. Методы измерения, описанные ранее в разделе, также используются для оценки отклонения от перпендикулярности между осями движения.

Процедура определения отклонения от перпендикулярности проходит следующим способом. По возможности в центре рабочей зоны устанавливаются две контрольные направляющие. Они выровнены так, что они номинально параллельны осям движения, чьи отклонения от перпендикулярности относительно друг друга должны быть измерены. Для каждой оси линейный движущийся узел станка перемещается вдоль нее. Датчик линейного перемещения измеряет смещение в направлении, ортогональном оси движения. Получается отклонение от прямолинейности между функциональной точкой детали-узла и контрольной направляющей, соответствующей этой оси. Ошибка параллельности каждой оси движения к соответствующей измерительной линии определяется, как описано ранее. Алгебраическая сумма двух ошибок параллельности приводит к отклонению от перпендикулярности между двумя осями линейного движения.

Поверочная плита должна быть расположена таким образом, чтобы ее опорные поверхности были номинально выровнены по двум осям движения, перпендикулярность которых должна измеряться. Линейный датчик смещения должен быть использован для измерения отклонения от параллельности по каждой оси относительно соответствующей опорной поверхности поверочной плиты. Пример настройки измерения показан на рисунке 8.

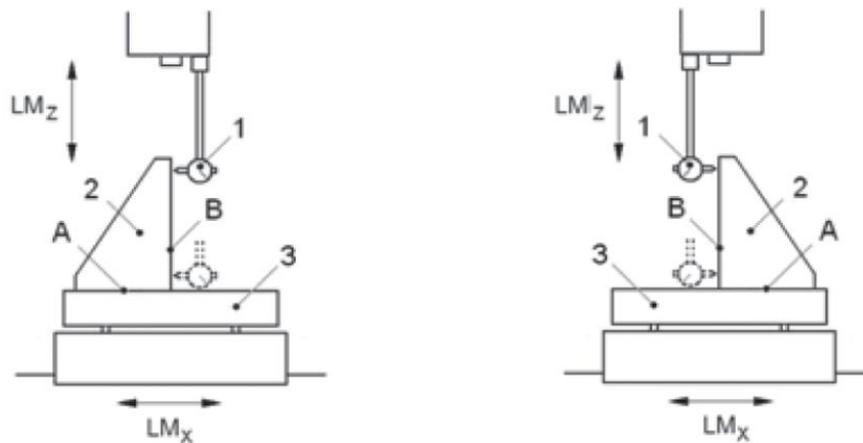
Одна поверхность контрольного угольника может быть выровнена точно по первой траектории с помощью датчика линейного перемещения, а вторая траектория измеряется в соответствии с методикой, изложенной раньше. Если для измерения используется контрольный угольник, рекомендуется процедура измерения с разворотом. Необходимо повернуть контрольный угольник на 180° , чтобы устранить ошибку измерительного средства.

Датчик линейного перемещения перебрасывается после смены положения угольника, чтобы гарантировать, что оба измерения относятся к одним и тем же осям и поверхностям угольника. Если этого не сделать, на результат будет влиять угловая ошибка движения по одной из осей. В таких случаях вычисленная погрешность отклонения от перпендикулярности представляет собой среднее значение ошибок перпендикулярности полученное в двух положениях угольника и датчика (рисунок 9).



1 датчик линейного перемещения; 2 эталонный угольник; А - первая базовая поверхность эталонной площади; В - вторая контрольная поверхности опорной площади; Линейное движение LM_x вдоль оси X; Линейное движение LM_z по оси Z

Рисунок 8 - Измерение отклонения от перпендикулярности с использованием эталонного угольника



1 - датчик линейного перемещения; 2 – поверочный угольник; 3 - поверочная плита; А - первая базовая поверхность поверочного угольника; В - вторая базовая поверхность поверочного угольника; линейное движение LM_x вдоль оси X; линейное движение LM_z по оси Z

Рисунок 9 - Метод обращения при измерении перпендикулярности

Выводы по разделу:

В первом разделе рассмотрены основные понятия, связанные с нормированием точности и других показателей, характеризующих качество металлообрабатывающего оборудования. Это требования из ГОСТов по точности, требования по жесткости и виброустойчивости, требования по точности позиционирования, которые определяются характеристиками систем управления. В данной работе основной упор сделан на контроль геометрических параметров, связанных с точностью изготовления элементов фрезерного станка, а также конструктивной жесткостью конструкции станка, которая определяет фактически особенности процесса обработки на фрезерном станке. В разделе приводится описание базовых методов по определению прямолинейности движения рабочих органов станка. Рассмотрены основные методы контроля процессов обработки, протекающих на станке, включая определение статических и динамических деформаций. Рассмотрены алгоритмы анализа полученной информации с диагностических

сигналов, которые определяются задачами управления. Они могут быть системы управления по отклонению со сравнивающими алгоритмами с каким-либо пороговым уровнем сигнала. Это могут быть частотные алгоритмы, которые определяют пиковые характеристики смещений или сил на определенных частотах. Для анализа могут использоваться новые методы машинного обучения. Сигналы, которые используются для управления и диагностики, могут быть параметрами, регистрируемыми в процессе резания, такими, как непосредственно смещение элементов станка, параметры, управляющие электрическим приводом главного движения или подачи станка - сила тока, напряжение. Новые способы диагностики позволяют выделять информацию в комплексе из параметров процесса фрезерования, в том числе проводить диагностику состояния инструмента, точность обработки, качество получаемой поверхности.

2 Динамика процесса фрезерования

2.1 Общие положения

Процесс обработки резанием носит ярко выраженный динамический характер. Особенно это наглядно видно при обработке мелкогабаритным нежестким инструментом. Данная ситуация характерна для обработки на малогабаритных настольных станках фрезерного типа. Для обеспечения высокой точности необходимо учитывать динамические явления, возникающие при обработке.

Первые теории о характере динамических явлений при резании материалов объясняли происхождение периодических сил, которые создают колебания при резании, на основе внешних источников. Исследователи считали, что силы возмущения являются внешней силой по отношению к упругой системе станка и совершенно отсутствует влияние деформаций упругой системы станка на величину и направление изменяющейся силы. На основе таких выводов, колебания при резании рассматривались как вынужденные колебания под действием периодических внешних сил. Источником их считали, например, процесс образования и отделения элементов стружки или, если есть, периодически срывающийся нарост.

В дальнейшем исследования привели к выводу, что вибрации при резании носят автоколебательный характер. При их анализе и исследованиях необходимо учитывать влияние деформации упругой системы станка. В настоящее время развито огромное количество теорий о причинах возникновения автоколебаний при резании.

Например, на основе экспериментальных материалов, выполненных на примере нелинейной системы с одной степенью свободы, предложено такое объяснение возникновения автоколебаний при резании. Смысл его сводится к тому, что автоколебания при резании обусловлены наличием падающего участка характеристики сил трения от скорости скольжения. При этом

колебательные движения заготовки, инструмента и узлов станка могут усиливаться из-за изменения рабочих углов резания относительно сечения срезаемого слоя. Во время первого оборота, когда на поверхности еще нет волн на поверхности резания, источником автоколебаний могут служить только зависимость силы резания от относительной скорости резания. Во время следующих оборотов заготовки или инструмента возбуждение автоколебаний зависит от трех источников: запаздывания сил резания, не линейной зависимости силы от скорости скольжения и резания по следу.

Также одной из причин появления автоколебаний при резании названа неоднозначность силы резания от мгновенной толщины срезаемого слоя. Экспериментально установлено, что сила резания при подаче инструмента на заготовку имеет величину меньшую, чем сила резания при той же мгновенной толщине срезаемого слоя, но при отходе инструмента от заготовки. Эта неоднозначность вызвана деформационным упрочнением материалы на начальной стадии. При врезании инструмента он обрабатывает материал в исходном не упрочненном состоянии, а при отходе происходит снятие слоя материала, испытавшего деформационное упрочнение. К данному объяснению на основе механике резания добавляется влияние изменения углов резания у режущей части инструмента.

Экспериментально также определено запаздывание изменений радиальной силы относительно тангенциальной составляющей силы. Это приводит к эллипсовидной траектории движения вершины инструмента. За счет этого формируются неоднозначные силы резания по толщине при подаче инструмента на заготовку и от нее.

Причины появления вибраций разнообразны. Они могут одновременно действовать, усложняя анализ ситуации, потому-что если источником вибраций является несколько механизмов различной природы, сложно обеспечить устранение колебаний.

2.2 Модель фрезерования

Для исследования влияния различных технологических и конструктивных параметров фрезерного станка с мелкогабаритным инструментом на характер колебаний была разработана математическая модель.

На основе расчетной схемы (рисунок 10) разработана математическая модель процесса обработки концевой фрезой с произвольным количеством зубьев, учитывающая влияние комплексных вибраций на параметры обработки [16].

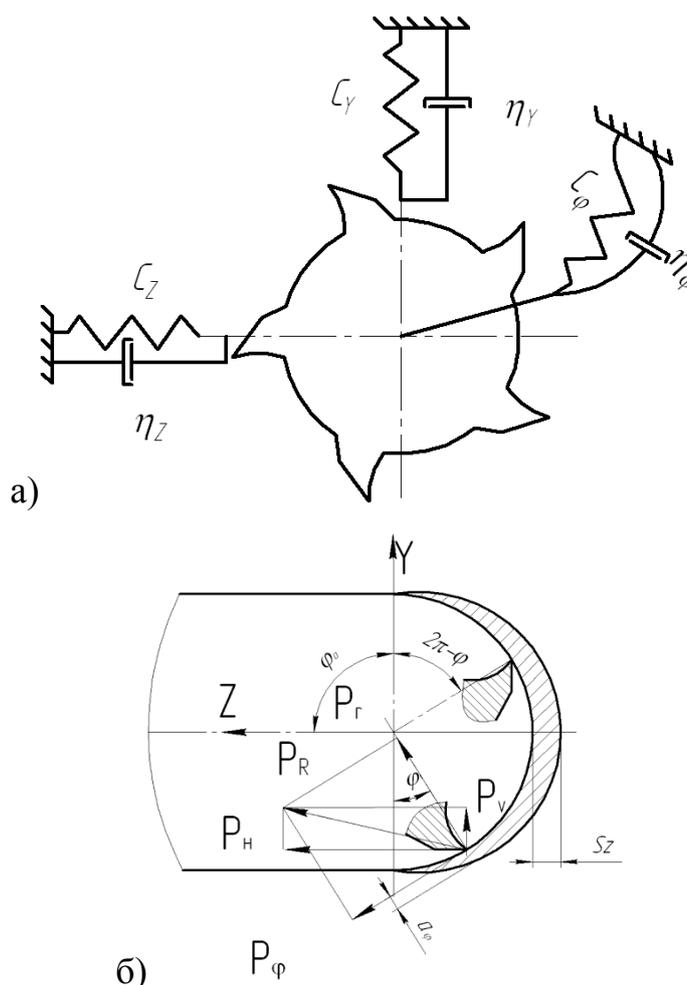


Рисунок 10 - Расчетная схема процесса обработки: а – схема упругой системы инструментальной подсистемы; б – схема процесса фрезерования

Движения инструмента при фрезеровании в плоскости поперечной относительно оси инструмента и с учетом крутильных колебаний фрезы описывается системой уравнений [13]

$$\begin{cases} \frac{m \cdot d^2 y(t)}{dt^2} + \eta_y \frac{dy(t)}{dt} + C_y y(t) = R_1^*(t); \\ \frac{m \cdot d^2 z(t)}{dt^2} + \eta_z \frac{dz(t)}{dt} + C_z z(t) = R_2^*(t); \\ \frac{J \cdot d^2 \varphi(t)}{dt^2} + \eta_\varphi \frac{d\varphi(t)}{dt} + C_\varphi \varphi(t) = R_2^*(t) \cdot D_\varphi / 2, \end{cases} \quad (4)$$

где m – приведенная масса доминирующей колебательной системы, кг;

J – приведенный момент инерции, м^4 ;

$z(t)$, $y(t)$, $\varphi(t)$ – смещения по соответствующим осям координат, м, рад;

η_z , η_y , η_φ – обобщенные коэффициенты сопротивления (демпфирования) по соответствующим координатам, Н·с/м, Н·с/рад;

C_z , C_y , C_φ – коэффициенты жесткости фрезерной оправки по соответствующим координатам, Н/м, Н/рад;

D_φ – диаметр фрезы, м;

$R_1^*(t)$, $R_2^*(t)$ – составляющие силы резания по соответствующим координатам (вертикальная и горизонтальная составляющие соответственно), Н, которые находятся по следующим формулам

$$\begin{aligned} R_1^*(\varphi) &= R_1(\varphi^*) \cos \varphi^* - R_2(\varphi^*) \sin \varphi^*; \\ R_2^*(\varphi) &= R_1(\varphi^*) \sin \varphi^* - R_2(\varphi^*) \cos \varphi^*; \end{aligned} \quad (5)$$

где $\varphi^* = \varphi - (q - 1) \frac{2\pi}{z^*} = \omega \cdot t - (q - 1) \frac{2\pi}{z^*}$; $R_1(\varphi^*)$, $R_2(\varphi^*)$ – радиальная P_r

и касательная P_φ составляющие силы резания;

ω – угловая скорость фрезы с учетом крутильных колебаний инструмента φ ;

z^* – число зубьев фрезы;

q – номер зуба, принимает значения $q = 1, 2, \dots, z^*$.

$$R_1(\varphi^*) = \begin{cases} Kb\{A_0 a_\Sigma^{y_p} + B_0\} & \text{при } a_\Sigma > 0; \\ 0 & \text{при } a_\Sigma \leq 0; \end{cases} \quad (6)$$

$$R_2(\varphi^*) = \begin{cases} Kba_\Sigma^{y_p} & \text{при } a_\Sigma > 0; \\ 0 & \text{при } a_\Sigma \leq 0; \end{cases} \quad (7)$$

где k – номер поворота фрезы, принимает значения $k = 1, 2, 3, \dots$;

a_Σ – суммарная толщина срезаемого слоя, которая находится по формуле

$$a_\Sigma = a_\varphi + y(t - T - \tau) - y(t - \tau), \quad (8)$$

где a_φ – заданная мгновенная толщина среза, м;

$\tau = \tau(t)$ – функция усадки стружки (в первом приближении принималась постоянной);

T – время поворота фрезы зуба;

φ_0 – угол контакта фрезы с изделием.

Зубья фрезы работают поочередно. Причем за полный оборот фрезы каждый из зубьев работает и по подаче, и против подачи. Толщина срезаемого слоя при фрезеровании по подаче

$$a_\varphi = \begin{cases} 0 & \text{при } 2\pi k + (q-1)\frac{2\pi}{z} < \omega t < 2\pi(k+1) - (q-1)\frac{2\pi}{z} - \varphi_0; \\ -S_Z \sin[\omega t - (q-1)\frac{2\pi}{z}] & \text{при } 2\pi k + (q-1)\frac{2\pi}{z} - \varphi_0 \leq \omega t \leq 2\pi(k+1) + (q-1)\frac{2\pi}{z}; \end{cases} \quad (9)$$

При фрезеровании против подачи

$$a_\varphi = \begin{cases} -S_z \sin[\omega t - (q-1)\frac{2\pi}{z^*}] \\ n\pi u 2\pi k + (q-1)\frac{2\pi}{z^*} \leq \omega t \leq 2\pi(k+1) + (q-1)\frac{2\pi}{z^*} + \varphi_0; \\ 0 \quad n\pi u \quad 2\pi k + (q-1)\frac{2\pi}{z^*} - \varphi_0 < \omega t < 2\pi(k+1) + (q-1)\frac{2\pi}{z^*}. \end{cases} \quad (10)$$

Моделирование данной системы уравнений проводилось в системе MATLAB в подсистеме Simulink. Поскольку структурная схема получается громоздкой, на рисунках 11, 12, 13 она приведена блоками по частям. Каждый блок решает определенную задачу.

Моделирование проводилось по данным, частично из [4], частично из экспериментальных данных, полученных при измерении на фрезерном станке.

Задавались следующие параметры. Диаметр фрезы 10 мм. Частота вращения фрезы n в диапазоне от 3 до 10 об/с. Время оборота фрезы на один зуб (запаздывание по следу) $T=1/(nz^*)=0,0011-0,013$ с. Отставание изменения силы резания от изменения толщины среза τ в долях периода колебаний $\tau=0-0,005$ с. Угловая скорость вращения фрезы $\omega=2\pi n$, рад/с. Приведенная масса $m=1,3$ Н·с²/м. Значение обобщенного коэффициента демпфирования по результатам обработки затухающих колебаний $\eta_l=0,2 \cdot 10^4$ Н·с/м. Значение обобщенного коэффициента жесткости $C_l=0,5 \cdot 10^7$ Н/м.

Коэффициент жесткости резания $K=145$ Н/м² для стали 45. Значения коэффициентов $A_0=0,52$; $B_0=0,05$; $u_p=0,65$. Число зубьев фрезы $z^*=5$.

Результаты моделирования приведены на рисунке 14.

В общем балансе упругих деформаций узлов и деталей станка самая значительная часть при фрезеровании концевыми фрезами на настольном портальном станке приходится на инструмент.

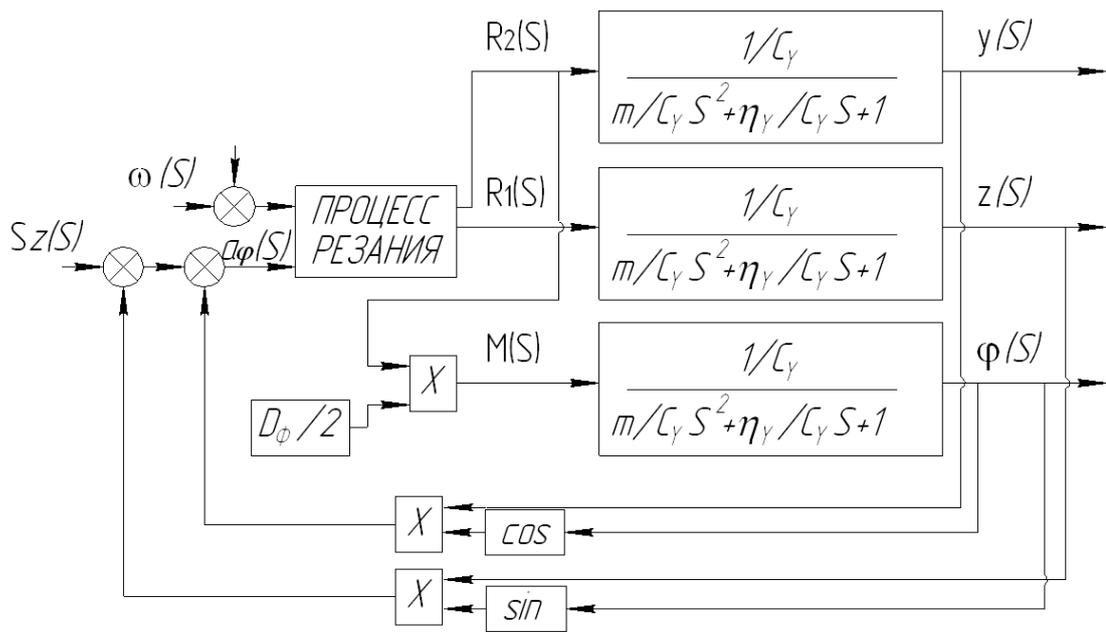


Рисунок 11 - Структурная схема замкнутой технологической системы фрезерования

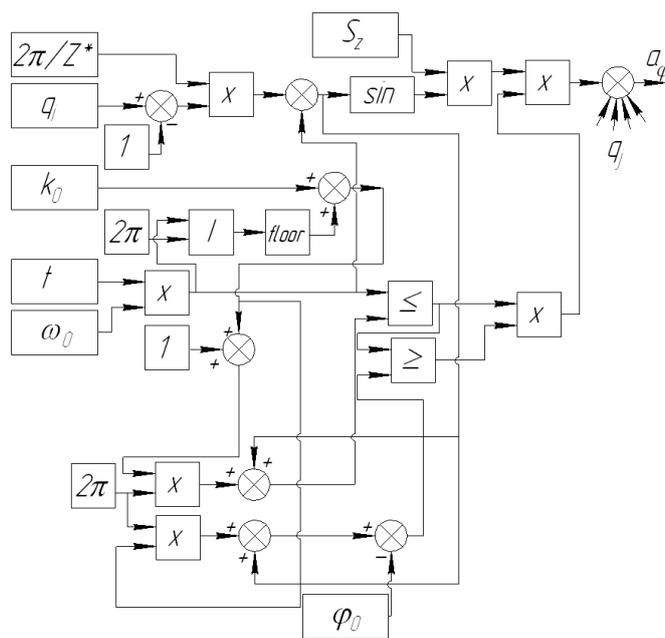


Рисунок 12 - Структурные схемы элементов обработки – схема формирования толщины стружки

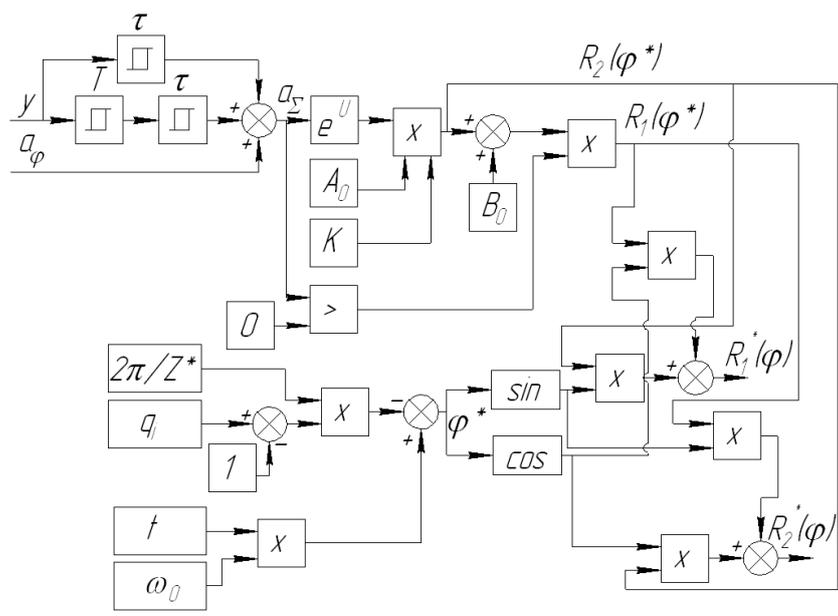


Рисунок 13 - Структурные схемы элементов обработки - процесса фрезерования

Это обусловлено его маленькими сечениями, что и создает при минимальной крутильной и изгибной жесткости максимум деформаций.

Но из-за этого возникает эффект уменьшения интенсивности колебаний в низкочастотной составляющей спектра в поперечных направлениях для фрезы. Это связано с увеличением амплитуды крутильных колебаний. Данный эффект связан с рассеянием энергии вибраций. Но из-за повышенных динамических нагрузок на режущем клине наблюдается снижение стойкости инструмента.

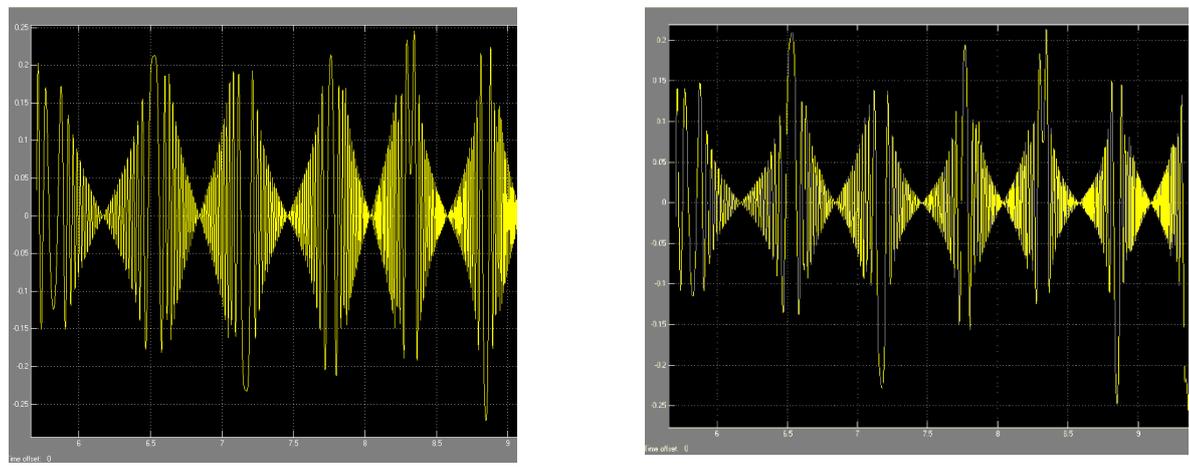


Рисунок 14 – Результаты моделирования

Так как величина поперечных колебаний фрезы уменьшается, можно при увеличении производительности за счет роста подачи с 0,6 до 0,9 мм/об, обеспечить точность обработки по 8 качеству (технологический допуск на операцию до 0,03 мм), шероховатость до Ra2,5 мкм. Параметры вибраций для данных условий обработки поддерживаются в диапазоне: частота колебаний 270-300 Гц; амплитуда – 0,02-0,025 мм. Для соответствующей колебательной скорости:

$$v_{\text{кол}} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot A = 2 \cdot 3,14 \cdot 300 \cdot 0,02 \cdot 10^{-3} = 0,04 \text{ м/с}, \quad (11)$$

что составляет 2,4 м/мин, стойкость инструмента составит 90 мин.

Схема обработки фрезой, которая работает по несимметричной схеме фрезерования, показана на рисунке 15.

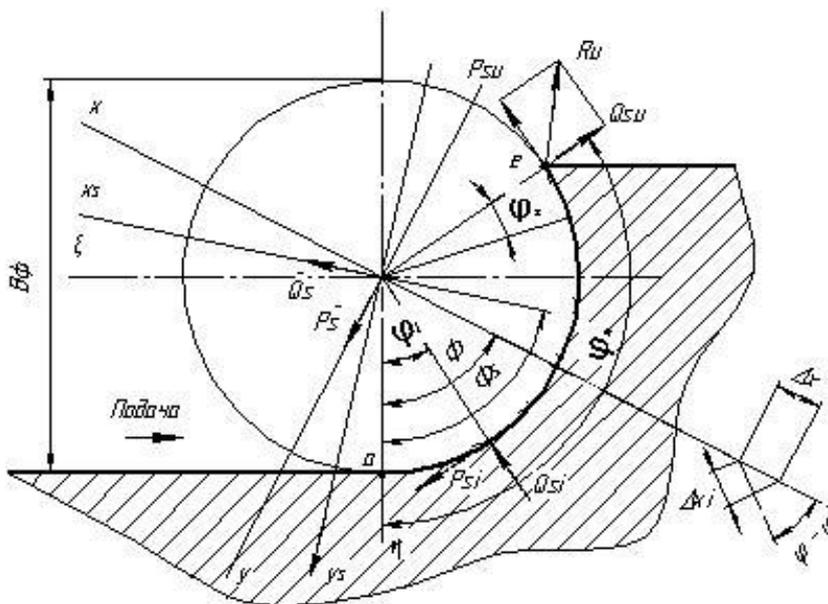


Рисунок 15 - Силовая схема встречного фрезерования

Для динамического моделирования можно использовать систему уравнений, где силовое нагружение распределено по контурам – нормальному и касательному. Такое представление позволяет учитывать влияние

$$\begin{cases} T_{x2}^2 \ddot{x} + T_{x1} \dot{x} + x = \dot{Q}; \\ T_{y2}^2 \ddot{y} + T_{y1} \dot{y} + y = \dot{P}; \\ T_p \dot{P} + P = -k_x x - T_{ky} \dot{y}; \\ T_Q \dot{Q} + Q = P - T_{kx} \dot{x} - T_{ky2} \dot{y}; \end{cases} \quad (12)$$

Вариант этой системы с учетом крутильного контура

$$\begin{cases} T_{x2}^2 \ddot{x} + T_{x1} \dot{x} + x = \dot{Q}; \\ T_{y2}^2 \ddot{y} + T_{y1} \dot{y} + y = \dot{P}; \\ T_p \dot{P} + P = -k_x x - T_{ky} \dot{y} - T_{k1\phi} \phi; \\ T_Q \dot{Q} + Q = P - T_{kx} \dot{x} - T_{ky2} \dot{y} - T_k; \\ T_J^2 \ddot{\phi} + T_{dx} \dot{\phi} + \phi = k_k M_{кр}; \end{cases} \quad (13)$$

где $P = \Delta P / P_s$, $Q = \Delta Q / Q_s$, $y = \Delta y / y_s$, $x = \Delta x / x_s$ - отношение приращения сил резания, трения и перемещений к их статическим величинам;

$$T_{x2} = T_{y2} = \omega_x^{-1}, \quad T_{x1} = T_{y1} = d_x / \gamma, \quad T_p = l_p / V_s, \quad T_Q = l_Q / V_s;$$

где l_p , l_Q – пути резания для запаздывания составляющих сил P и Q , мм;

V_s – скорость резания, м/мин;

ω_x – круговая частота, 1/с;

γ – частота замкнутой упругой системы.

При использовании инструментальной оснастки, в конструкции которой имеется инструмент с ослабленным, уменьшенным сечением он совершает крутильные колебания, поэтому математическая модель приобретает вид (13) где $M_{кр} = P_z \frac{D_\phi}{2}$, $k_k = 1/c_k$, $T_J = J/c_k$, $T_{dx} = dx/c_k$,

$M_{кр}$ – крутящий момент;

d_x – коэффициент демпфирования;

ϕ – угол закручивания, рад;

J – момент инерции, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$.

Колебательная скорость

$$V_k = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot A, \quad (14)$$

где f – частота системы;

A – суммарная амплитуда колебаний.

Ниже представлена структурная схема (рисунок 16), моделирующая динамику процессов деформирования технологической системы, с учетом автоколебаний и колебаний крутильного контура.

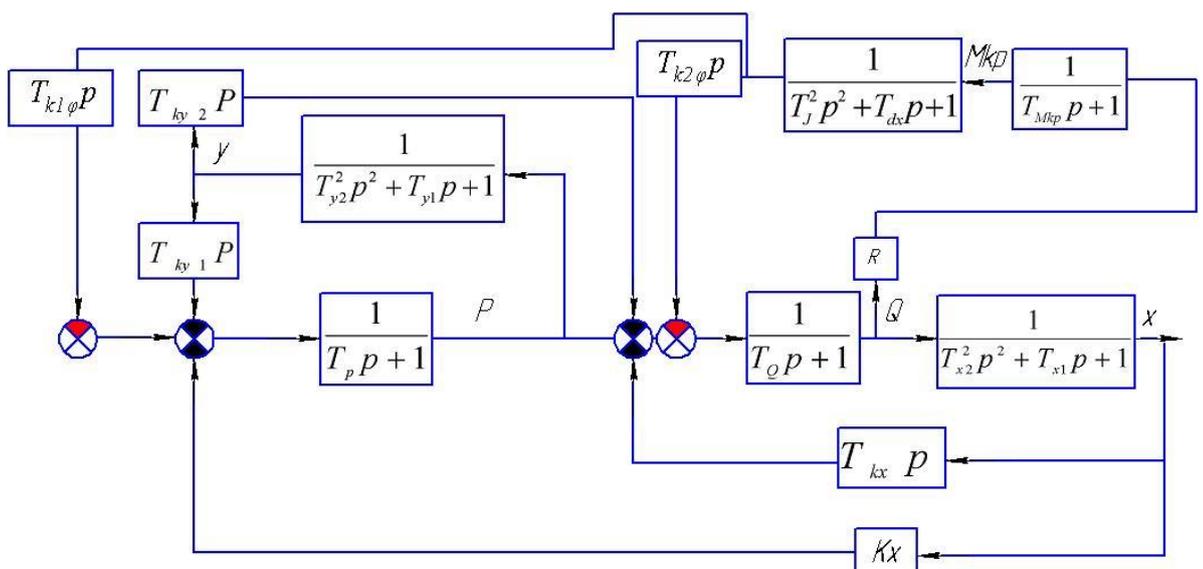


Рисунок 16 - Структурная схема динамических характеристик процесса фрезерования

В общем, структуру упругой системы станка представляют в виде трех взаимосвязанных контуров. Это контур поперечных, касательных и крутильных деформаций.

2.2 Оптимизация фрезерования

Фрезерование является наиболее распространенным процессом обработки элементов плоских поверхностей деталей машин, пазов, уступов. Системы автоматизированного проектирования технологии САМ проектируют необходимые траектории формообразующих движений рабочих органов станка, задают разные технологические команды и выполняют подготовку управляющих программ в кодах постпроцессора соответствующего станка с обеспечением проверки выполнения программы при визуализации процесса на экране монитора компьютера [14].

Однако, не смотря на существенную помощь технологу при решении задач подготовки производства, такие системы, как правило, не определяют режим резания, а в лучшем случае предоставляют возможность выбора из существующей базы данных так называемым «табличным» методом. Такие методы рассчитаны на использование универсальных фрезерных станков, т.е. адаптированы к существующим рядам подач и частот вращения шпинделя, тогда как станки с ЧПУ, как правило, имеют непрерывный диапазон регулирования. В результате, назначенный в большинстве случаев по опыту работника режим резания, оказывается далеким от оптимального, что значительно ухудшает производственные показатели.

Оптимизационная задача относится к классическим однокритериальным задачам нелинейного программирования, которые не имеют принципиальных трудностей в решении. Тем не менее, определение системы ограничений и создание действующего, надежного и простого в использовании инструмента решения представляет довольно актуальную задачу современного машиностроительного производства.

Оптимизация основана на математической модели процесса фрезерования, которая состоит из набора неравенств и целевой функции.

Оптимизируемыми параметрами являются обычно подача S_z и частота вращения фрезы n . Первое ограничение связывает скорость с периодом T стойкости инструмента:

$$V = \frac{\pi D_\phi n}{1000} = \frac{C_v D_\phi^{q_v} k_v}{T^m H^{x_v} S_z^{y_v} B^{u_v} z^{p_v}}, \quad (15)$$

откуда ограничение по стойкости инструмента имеет вид:

$$n S_z^{y_v} \leq \frac{1000 C_v D_\phi^{q_v} k_v}{\pi D_\phi T^m H^{x_v} B^{u_v} z^{p_v}} = \frac{318 C_v D_\phi^{q_v-1} k_v}{T^m H^{x_v} B^{u_v} z^{p_v}}, \quad (16)$$

где D_ϕ , z – диаметр (мм) и количество зубьев фрезы; H ,

B – глубина (мм) и ширина (мм) фрезерования;

T – стойкость (мин);

C_v , k_v , q_v , m , x_v , u_v , p_v – коэффициенты и показатели степени эмпирической зависимости [16].

Мощность резания N_p (кВт) зависит от составляющей P_z силы резания, которая в теории резания измеряется в Ньютонах и скорости V резания, которая измеряется в м/мин. После подстановки известных силовых зависимостей и уравнения скорости:

$$N_p = \frac{P_z V}{6 \cdot 10^4} = \frac{P_z \pi D_\phi n}{1000 \cdot 6 \cdot 10^4} = \frac{C_{Pz} H^{x_{Pz}} S_z^{y_{Pz}} B^{u_{Pz}} z \cdot k_{Pz} \pi D_\phi n}{1000 \cdot 6 \cdot 10^4 \cdot D_\phi^{q_{Pz}} \cdot n^{w_{Pz}}} \leq N_{cm} \eta, \quad (17)$$

откуда ограничение по мощности привода главного движения:

$$n^{1-w_{Pz}} \cdot S_z^{y_{Pz}} \leq \frac{1.91 \cdot 10^7 N_{cm} \eta}{C_{Pz} H^{x_{Pz}} B^{u_{Pz}} z \cdot k_{Pz} D_\phi^{1-q_{Pz}}} \quad (18)$$

где η – коэффициент полезного действия повода главного движения,

C_{Pz} , k_{Pz} , x_{Pz} , y_{Pz} , u_{Pz} , q_{Pz} , w_{Pz} – коэффициенты и показатели эмпирической зависимости силы резания от режима и условий фрезерования [16].

Необходимо для оптимизации режимов резания учитывать дополнительные ограничения. Они могут определяться жесткостью схемы установки заготовки на данном станке, параметрами инструмента по прочности, качеством обработанной поверхности.

При фрезеровании поверхностей высота шероховатости зависит от геометрических параметров режущей части, от величины подачи.

Из геометрических соотношений рисунка 15:

$$b = S_z \cos \alpha = \frac{S_z}{D_\phi} \sqrt{D_\phi^2 - 4E^2} \quad (19)$$

Ограничение по жесткости для упругой системы станка:

$$\frac{0.4 \cdot C_{Pz} H^{x_{Pz}} S_z^{y_{Pz}} B^{u_{Pz}} z \cdot k_{Pz}}{D_\phi^{q_{Pz}} n^{w_{Pz}}} = P_n, \quad (20)$$

где P_n – предельное усилие привода подачи, Н. Оно выводится из соотношения $0,4 P_z = P_n$.

Ограничение по допустимой силе механизма подачи:

$$\frac{S_z^{y_{Pz}}}{n^{w_{Pz}}} \leq \frac{P_n \cdot D_\phi^{q_{Pz}}}{0.4 \cdot C_{Pz} H^{x_{Pz}} B^{u_{Pz}} z \cdot k_{Pz}} \quad (21)$$

Кинематические ограничения:

- по подаче (мм/мин.):

-

$$S_{\min} \leq S \leq S_{\max} \quad (22)$$

- по частоте вращения (об/мин.):

-

$$n_{\min} \leq n \leq n_{\max} \quad (23)$$

Целевая функция - производительность:

$$f = n \cdot S_z \rightarrow \max. \quad (24)$$

Полученная система уравнений используется для выбора оптимального режима резания при фрезеровании.

Выводы по разделу:

Во втором разделе проанализирован процесс фрезерования, который является базовым для рассматриваемого малогабаритного портативного фрезерного настольного станка. Для данного метода обработки разработана расчетная схема. Она включает в себя многозубый инструмент - фрезу, которая может работать двумя способами: по подаче и против подачи. Параметры характеризующие конструктивные особенности станка - это жесткость во взаимно перпендикулярных направлениях и соответствующие коэффициенты демпфирования по данным осям. Эти характеристики прикладываются как к инструменту, характеризую свойства инструментального шпинделя, так и к заготовке, характеризую заготовку с приспособлением, закрепленного на столе станка.

Для расчетной схемы составлена математическая модель в виде системы уравнений. Она характеризует деформацию заготовки и инструмента под действием сил резания в различных направлениях, а также включает в себя уравнения, определяющие силы фрезерования (тангенциальную, осевую и радиальную). По предложенной математической модели данные силы являются переменными характеристиками в

зависимости от угла поворота фрезы. Он определяет переменную толщину срезаемого слоя, которая зависит от числа зубьев фрезы, величины подачи, угла фрезерования, угла поворота фрезы и числа зубьев. Сила резания также зависит от положения обрабатываемой поверхности, которая зависит от положения инструмента и заготовки на предыдущем проходе/повроте заготовки. То есть определяется следом от предыдущего оборота инструмента. Учитывается резание по «следу». Также в уравнении вводится запаздывание, связанное с задержкой изменения силы резания при изменении положения относительно инструмента и заготовки (инерционность процесса резания). Все характеристики, связанные с процессом фрезерования, взяты из литературных источников. Для расчетной схемы и полученной математической модели составлена структурная схема, которая позволила смоделировать данный процесс в программе matlab. Результаты моделирования показывают, что влияние крутильной жесткости оказывает значительное влияние на поперечные деформации инструмента, что особенно актуально при обработке на малогабаритных станках фрезами мелко размерной серии. Смещение инструмента вносит определяющую долю деформации в балансе смещений технологической системы.

3 Методики испытания станков

3.1 Виды испытаний и контролируемые параметры

Испытания станков с точки зрения нормативного обеспечения и организации контрольных испытаний классифицируются на несколько видов. Это могут быть контрольные испытания. В ходе них проверяется качество станка на основе контроля качества изделия, обработанного на данном станке. На этапе опытно-конструкторских и исследовательских работ станки могут проходить испытания исследовательские, доводочные, предварительные или приемочные. На основе результатов контрольных испытаний необходимо обеспечивать оптимизацию проектных, конструкторских и технологических решений, заложенных в проектируемом станке. Заканчивается проектирование станка приемочными испытаниями. В ходе данного вида испытаний обрабатывается или один опытный образец или партия опытных образцов.

Изготовление станка для данного проекта в единичном экземпляре относится к единичному производству необходимо иметь программу приемосдаточных испытаний для данного вида продукции. Ниже приводится описание комплекса работ, которые необходимо выполнить для сертификации или получения технического паспорта станка, работ.

3.2 Измерение жесткости станка

Измерение жесткости проводится на всех типах испытываемых станков. Измеряется жесткость узлов станка в рабочей зоне с использованием - динамометра. Это прибор для измерения силы и датчика прогиба шпинделя. Измерительная цепь состоит из двух датчиков. Первый датчик силы может представлять собой тензодатчики при наличии тензоизмерительной станции.

Если ее нет, то можно использовать механический динамометр пружинного типа.

Для создания значительных усилий используется рычажный прибор. Для создания ограниченных сил на инструменте можно использовать пружинный динамометр типа безмен. Для контроля смещений используется высокоточный контактный щуп для измерения положения деталей станка. Регистрация данных осуществляется вручную или, если выход датчиков электрический, с помощью компьютера. Для измерения жесткости используется небольшая частота дискретизации от 10 до 100 Гц. Усилие прикладывается гидравлическим или механическим домкратом с ручным управлением.

Описание методики измерения. Измерение жесткости состоит из создания усилия домкратом и передачи его на датчик силы по вертикальной оси Z в пространстве между столом и шпинделем. Датчик отклонения установлен с помощью магнитной стойки, которая закрепляется на столе возле оси шпинделя.

Эта установка позволяет измерить деформацию шпинделя под нагрузкой. Приложение нагрузки повторяется несколько раз при неизменных условиях измерения. Скорость приложения нагрузки определяется по времени от начала нагрузки до ее завершения.

На измерение жесткости влияет особенность станка. Современный станок имеет систему принудительной компенсации положения шпинделя по оси Z приводом. Измерительная линейка расположена рядом с направляющей. Она фиксирует изменение в 1 мкм. Когда нагрузка прикладывается к шпинделю относительно стола, происходит смещение этой направляющей, которая активно компенсируется сервомеханизмом.

С таким устройством не имеет смысла измерять жесткость, когда компенсация положения отключена. Эта система регулирования жесткости активируется во время работы станка.

3.3 Определение баланса деформаций шпиндельного узла - фрезы

Станок портального типа вследствие своих малых размеров, небольших сечений конструктивных элементов несущей системы станка имеет достаточно ограниченные параметры по конструктивной жесткости. Из-за этого накладываются серьезные ограничения на предельные режимы резания и на группы обрабатываемых материалов. То есть конструкционные стали и сплавы с высокими прочностными свойствами обработать на малогабаритных станках затруднительно или невозможно. Необходимо учесть, что обработка ведется, как правило, мелко размерным фрезерным инструментом. Например, для станка портального типа в рамках проекта «Формула-станок» применяемый инструмент изменяется от 1 до 10 мм. Естественно, когда используется инструмент малых диаметров, он будет лимитирующий упругой системой, которая испытывает максимальные деформации при резании. То есть в общем балансе упругой деформации всей технологической системы данный инструмент будет вносить большую часть. Если диаметр инструмента увеличивается, силовая нагрузка начинает перераспределяться по элементам станка. Соответственно, большие деформации начинают испытывать шпиндельный узел с механизмом его закрепления на направляющих втулках, сама система направляющих. Причем последние элементы взаимно ориентированы в перпендикулярных направлениях. Из-за конструктивных особенностей, деформация по разным направлениям этих направляющих, будет иметь разную величину для одного и того же значения силы резания. При перемещении шпиндельной головки по направляющим относительно плоскости стола меняется соотношение вылетов на направляющих. Меняется система рычагов и баланс деформации в рабочей зоне станка изменяется.

Для определения общей деформационной картины необходимо промоделировать деформацию шпиндельного узла в различных положениях относительно плоскости стола. Для этого необходимо последовательно

производить смещение шпиндельной каретки по направляющим в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Для исследования деформации элементов станка использовались девять контрольных точек. В каждой точке создавалась нагрузка силой, действующей по взаимно перпендикулярным направлениям x и y . Это связано с тем, что при фрезеровании, направление движения инструмента может быть самым произвольным и в любых направлениях.

3.4 Геометрическая точность станка

Точность обработки на станке зависит от уровня геометрической точности самого станка. Она определяется точностью изготовления отдельных деталей и точностью сборки их между собой в основные узлы. Для малогабаритного портативного станка к ним можно отнести основание или стойку с направляющими вдоль поверхности стола, подвижную каретку с направляющими втулками, которая используется для монтажа направляющих в перпендикулярном направлении относительно пазов стола станка, шпиндельный узел (рисунок 17, 18).

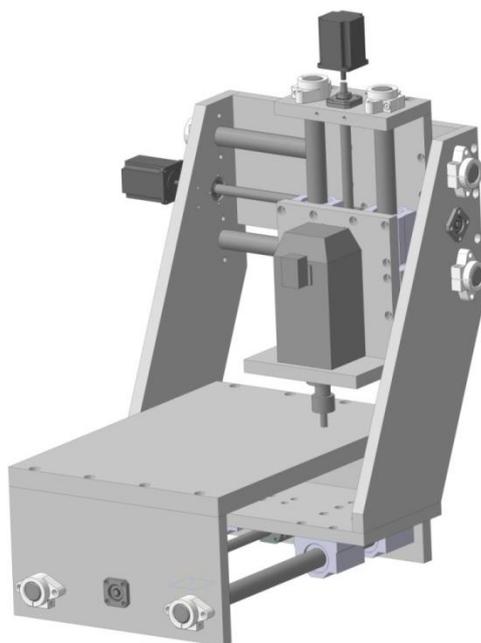


Рисунок 17 – Схема станка

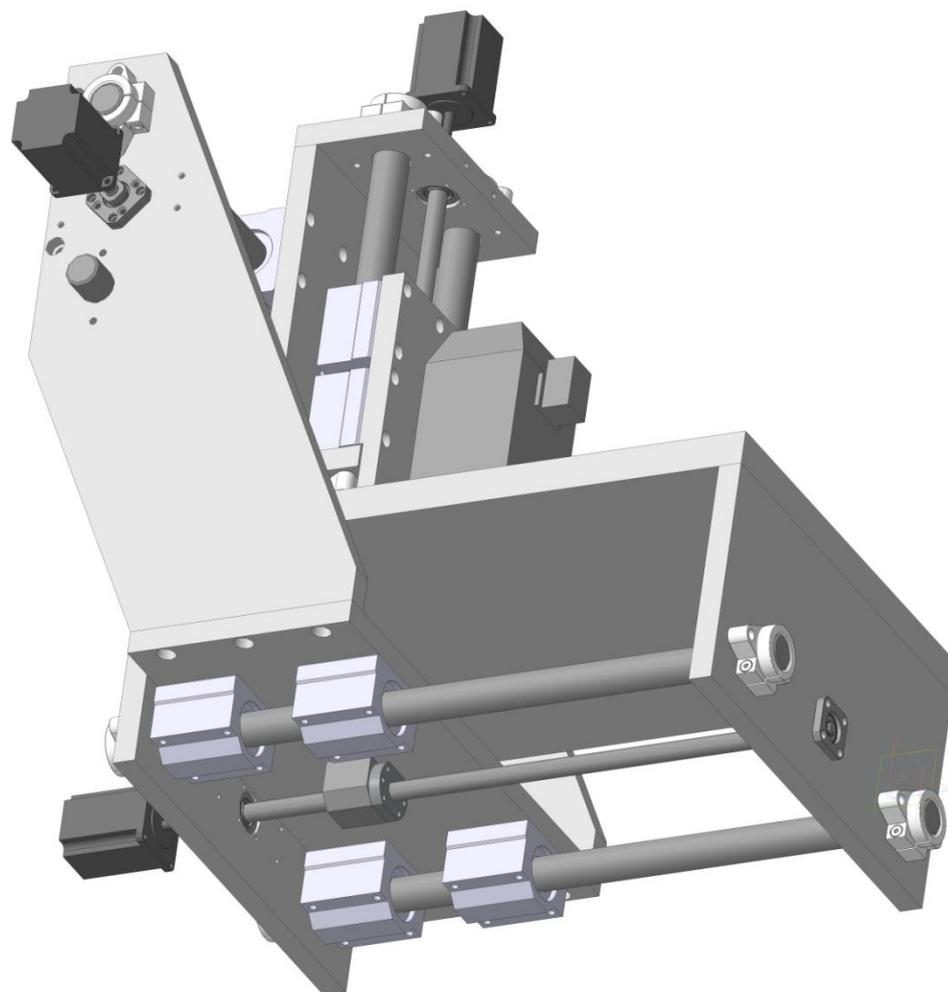


Рисунок 18 – Схема станка в другой проекции

Это отдельная часть, которая определяет точность позиционирования инструмента относительно плоскости стола по перпендикулярности. Основным элементом геометрической точности для данного станка является точность положение центра фрезы в горизонтальной плоскости, параллельной установочной поверхности стола станка. Размер по высоте для фрезерных работ, характерных для данного типа станка, как правило, является не ответственным параметром. Но изменение глубины фрезерования, которое связано не только с изменением припуска и толщины обрабатываемой заготовки, но и с погрешностью позиционирования инструмента по высоте, приводит к общему изменению силы фрезерования.

А это, в свою очередь, изменяет положение фрезы в плоскости стола станка за счет изменения его поперечных деформаций.

Точность позиционирования инструмента по высоте определяется комплексом размерных взаимосвязей двух механизмов подачи, которые позиционируют шпиндельный узел в горизонтальной плоскости. Для определения точности позиционирования по высоте далее выполнен размерный сборочный анализ.

Для этого необходимо составить размерную схему (рисунок 19). Для этого, на сборочном чертеже станка, выделены замыкающие звенья. Они представлены в виде отклонений по высоте вершины инструмента относительно плоскости стола станка. Схемы составляются в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Для каждого направления составлена размерная цепь, куда входят размеры деталей, а также параметры сопряжений, которые определяют отклонения замыкающего звена.

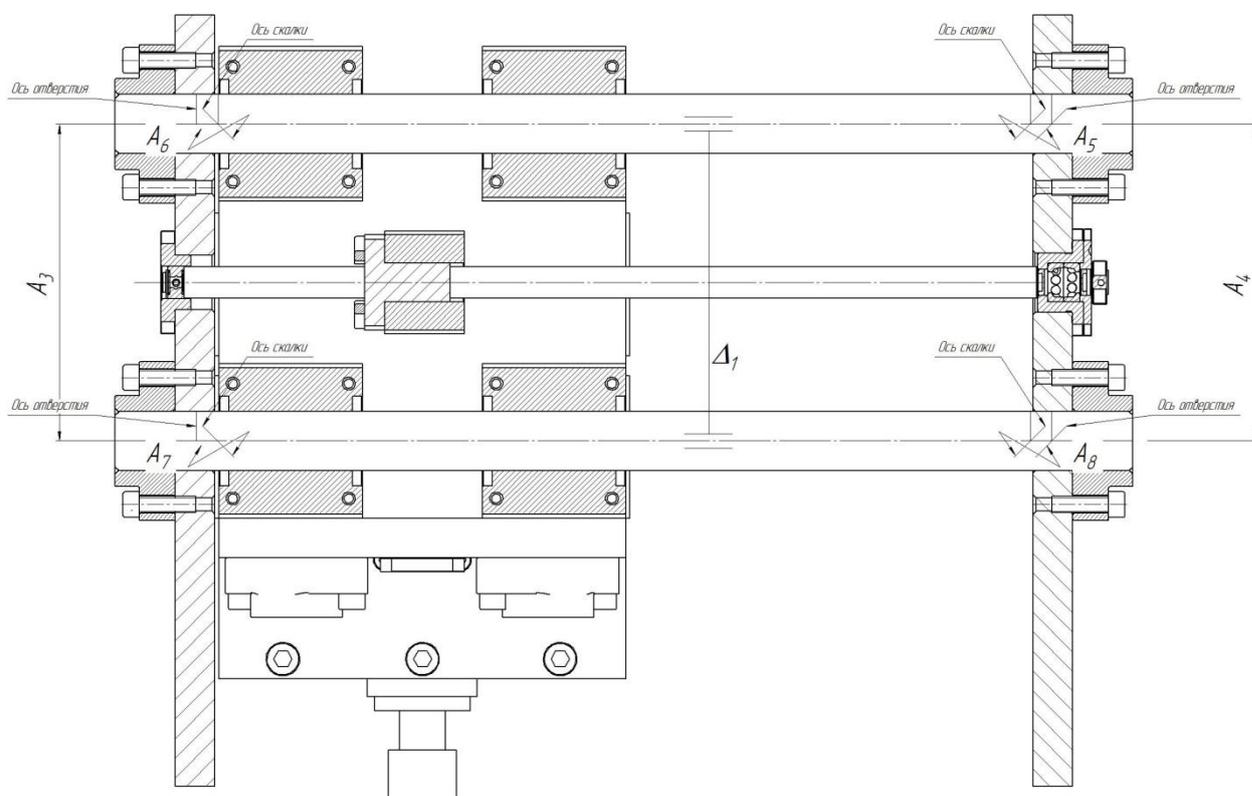


Рисунок 19 – Размерная схема для верхней каретки с шпинделем

Расчет размерных параметров, влияющих на точность станка.

Для анализа точности движений и позиционирования шпинделя портального фрезерного станка выполняется размерный анализ. На точность движений шпинделя, закрепленного на вертикальной каретке, влияет отклонение от параллельности горизонтальных направляющих скалок. Эта не параллельность зависит от точности выполнения отверстий под скалки относительно нижней базовой поверхности боковых панелей, точности межосевого расстояния отверстий. Причем эти параметры необходимо учитывать совместно для двух боковых панелей с двух сторон. Относительно друг друга они формируют отклонение от соосности базовых отверстий, в которые вставляются направляющие скалки. Эти направляющие в отверстия установлены с зазором, который дополнительно вносит свою долю в погрешность по не параллельности направляющих скалок между собой. Далее необходимо учесть суммарную усредненную горизонтальную траекторию движения вертикальной каретки с шпинделем относительно базовой поверхности стола станка. На точность обработки влияет также отклонение от перпендикулярности оси шпинделя относительно установочной плоскости станка.

Узлы и детали, влияющие на точность станка. Точность геометрии полученных заготовок на данном станке зависит от нескольких базовых узлов. Первое - это вертикальная каретка со шпинделем, которая перемещается по вертикальным направляющим на системе спаренных линейных подшипников. Для перемещения вертикальной каретки используются пара горизонтальных направляющих, которые зафиксированы в боковых панелях станка. Третьим узлом станка, который определяет точность траектории формообразующих узлов - это система направляющих, установленных в нижних панелях основания станка. Это пара направляющих перпендикулярна относительно верхних горизонтальных направляющих. Линейные подшипники производят перемещение базовой плиты с

закрепленной заготовкой. Соответственно, две пары горизонтальных направляющих определяют отклонение от плоскости движения вершины инструмента концевой фрезы. Размерная схема верхней каретки – отклонение от параллельности. На рисунке представлена размерная схема, где определяется не параллельность двух направляющих скалок. В эту размерную цепь входят два межосевых расстояния, которые определяют положение отверстий, которые базируют скалки. Так как эти отверстия идентичны, номинальные значения данных размеров равны между собой. Плоскости боковых панелей опираются на базовую плиту. Расстояние, которое определяет положение нижних отверстий, в размерной цепи не учитывается. В отклонение от параллельности входят также зазоры, с которыми скалки вставлены в отверстия. Данные параметры вместе с межосевым расстоянием формируют размерную цепь, которая показана на рисунке. Уравнение размерной цепи выглядит следующим образом:

$$\Delta_1 = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6, \quad (25)$$

где A_3, A_4 - межосевое расстояние, мм;

A_5, A_6, A_7, A_8 – зазоры между скалкой и базовым отверстием в боковой панели, мм.

Выполним расчет размерной цепи в виде прямой задачи. Для этого зададимся отклонением от параллельности, который принимает равным 0,005 мм. Соответственно методом неполной взаимозаменяемости определим параметры составляющих звеньев по уравнению

$$TA_i = \frac{\Delta_1}{t\sqrt{\sum_8 \lambda_i}} = 0,0017 \text{ мм.} \quad (26)$$

Допуски получаются на составляющие звенья очень жесткие. Это приводит к необходимости исключения зазоров в сопряжениях путем выбора посадки с натягом. Далее необходимо выбирать люфты в системе линейный

подшипник – направляющие скалки. Данные требования необходимо указать в детализовке на изготовление соответствующих деталей, а также в сборочном чертеже конструкции станка.

Выводы по разделу:

В третьем разделе рассматривается методика определения жесткости станка в статическом положении. Для этого необходимо нагрузить выбранный элемент или узел станка заданной силой в заданном направлении и провести измерения деформаций в направлении действия этой силы. Для этого используется нагрузочное динамометрическое устройство и индикатор часового типа, закрепленный в штативе. В процессе измерения производят несколько раз нагружение и разгрузку. Производят построение кривой, которая позволяет определить не только коэффициент жесткости, но и определить параметры гистерезиса. Они связаны с контактной деформацией в стыках, а также люфтами. В этом разделе также рассматривается баланс деформации элементов станка. Выведено, что определяющим, лимитирующим элементом по деформациям является инструмент. Из-за его небольшого диаметра возникает, как правило, максимальная деформация на конце данного инструмента и он является ограничительным звеном по максимальной нагрузке, которая допустима на предлагаемом станке. Также выполнен размерный анализ по определению обоснованных геометрических отклонений на размеры и отклонения расположения поверхностей на отдельные детали станка, которые позволили бы обеспечить необходимую геометрическую точность по движению инструментального шпинделя по верхней и нижней кареткам станка. Для этого в разных направлениях составлены размерные сборочные цепи и для замыкающих размеров произведен расчет допусков на составляющие звенья, где параметрами являются допуски на размеры, отклонения расположения.

4 Методика испытаний и диагностики геометрической точности

4.1 Параметры точности

В первой части стандарта на испытания станков регламентируется геометрическая точность машин, работающих в режиме холостого хода или на чистовых режимах. Другие виды испытаний (на точность отработки системы управления, проверку виброустойчивости, шума, энергопотребление) регламентируются другими стандартами.

При проверке геометрической точности элементов станка контролируют прямолинейность движения по направляющим. Определяют максимальное значение отклонения, отклонение от прямолинейности по траектории движения. Измерение может проводиться двумя способами. Определяется попадание по заданной характеристике в заданный допуск или определяется фактическое значение параметра. При этом контролируется относительное положение узлов. У фрезерного станка это отклонение от перпендикулярности оси шпинделя относительно плоскости стола станка, отклонение от перпендикулярности установочной плиты под шпиндель относительно стола станка, перекос или не параллельность направляющих относительно друг друга, а также относительно плоскости стола станка. Контролируется точность вращения шпинделя, его биение, угловое отклонение по направлениям осей X и Y. Проверке подлежат люфты в подвижных сопряжениях, гистерезис в реверсных парах (ходовые винты-гайки).

4.2 Проверка на параллельность и перпендикулярность движения

На ориентацию траекторий движения узлов станка относительно друг друга обычно влияют геометрические недостатки, полученные при его сборке (например, недостаточное выравнивание направляющих, опорных

базовых поверхностей). Линейные и угловые ошибки движения элементов станка имеют локальные возмущения или отклонения. Измерение и фиксация разницы между относительной траекторией функциональной точки линейного движущегося элемента и функциональной поверхностью (опора или направляющая), прямой линией (осевая средняя линия или пересечение плоскостей) или траекторией функциональной точки на другом линейном движущемся компоненте требует исключения влияния этих локальных возмущений на саму траекторию и исключения влияния локальных возмущений на опорный (базовый) элемент. Эта цель достигается путем привязки соответствующих исходных прямых линий к линейным траекториям движения и путем привязки исходной прямой линии к базовым элементам станка.

Отклонения от параллельности оси линейного движения и оси угла поворота между опорной прямой траекторией функциональной точки линейного перемещения узла и оси средней линии вращающейся составляющей, измеряются в двух ортогональных плоскостях. Отклонения от параллельности между осью вращения и поверхностью, это угол между осевой средней линией вращающегося узла и базовой плоскостью, связанной с функциональной поверхностью станка. Отклонения от перпендикулярности между двумя осями линейного движения двух плит станка по осям Z и X- это разность между направлением траектории функциональной точки линейного подвижного узла относительно соответствующей ему главной оси линейного движения и направлением траектории функциональной точки другого линейного движущегося элемента станка относительно его соответствующей главной оси линейного движения. Отклонения от перпендикулярности между осью линейного движения и осевой вращения это угловое отклонение от 90° между исходной линией траектории точки на линейном подвижном узле по отношению к средней осевой линии вращающегося шпинделя станка.

Также может контролироваться плоскостность базовой поверхности стола. Допуски определяют допустимые погрешности (отклонения)

оцениваемой характеристики станка и параметров геометрической точности и должны быть определены в соответствии с функциональными требованиями к проектируемому станку. При определении допусков также следует учитывать требования к изготовлению его деталей, их сборке и контролю. Допуски должны быть выражены в единицах соответствующей измеряемой характеристики при испытании.

Если не указано иное, для любых испытаний, описанных в ISO 230, допуски должны указывать максимально допустимое значение для параметра, представляющего интерес. Это указание в пределах указанной границы измерения (длина измерения для испытания на прямолинейность, объем измерения для испытания на объемную точность, диапазон приложенного усилия для теста на соответствие и гистерезис и так далее).

ISO 1101 является стандартом для допусков, применяемых к узлам станка и характеристикам их деталей. Такой стандарт также применяется для назначения требований на функциональные поверхности станка и их испытания.

4.3 Методы и средства измерений

Неопределенность измерений следует принимать во внимание при определении допусков и при оценке соответствия контролируемого параметра указанным допускам. При представлении отчета о результатах измерения должен быть дан количественный показатель по точности или качеству результата измерения, чтобы можно было сравнить результаты измерений, как между собой, так и с указанными значениями допусков. Такое количественное указание оценивается и выражается как неопределенность измерения. Следует учитывать, что упрощенное тестирование не требует подготовки оценки неопределенности измерений. Неопределенность возникает для всех наиболее распространенных измерений: прямолинейности, перпендикулярности, точности и

повторяемости позиционирования с числовым управлением по осям движения и так далее с применением доступных процедур испытаний и измерительных систем. Правильное определение объекта измерения является обязательным. Ни одно измерение не должно проводиться без четкого понимания того, какой параметр измеряется и при каких условиях.

Основными факторами, влияющими на погрешность измерения, являются:

- погрешность измерения измерительного устройства;
- погрешность калибровки и отклонения измерительных средств;
- применение измерительного устройства и инструментов со смещением и отклонением от центрирования измерительного устройства относительно оси станка;
- ошибки из-за влияния изменений в окружающей среде, таких как влияние температуры и вибраций;
- повторяемость измерений, включая настройку.

Измерительное устройство и инструменты используются в соответствии с рекомендациями производителя. Измерительное устройство и инструменты устанавливаются статически и динамически жестко и без какого-либо гистерезиса. Базовые узлы станка для установки заготовки ведут себя как твердые недеформируемые тела, если не указано иное. Если эти предположения не выполняются, дополнительные факторы неопределенности измерений должны быть приняты во внимание и учтены при контроле.

Геометрические испытания обычно выполняются с использованием измерительных приборов, эталонных деталей или искусственных эталонов (например, светового луча, силы тяжести). Измерительными эталонами являются поверочные линейки и измерительные оправки. Неточности измерений из-за приборов, а также из-за используемых методов должны быть приняты во внимание во время испытаний. Измерительный прибор не должен вызывать каких-либо погрешностей измерения, превышающих

заданную долю допуска, подлежащего проверке. Для каждого прибора должен быть доступен калибровочный лист.

Испытуемые машины и контрольно-измерительные приборы должны быть защищены от воздействия внешней среды, таких как пониженная или повышенная температура, сквозняки, а также от мешающего света или теплового излучения (солнечного света, чрезмерно близких электрических ламп и так далее). А температуру измерительных приборов следует стабилизировать перед измерением. Предпочтительно, чтобы измерение повторялось, а результат должен быть получен путем усреднения измерений. Если результаты измерений значительно различаются, причину следует искать либо в методе или измерительном приборе, либо в самом станке.

4.5 Установка станка

Станок должен быть полностью собран и полностью работоспособен в соответствии с инструкциями проектировщиков, которые должны быть представлены в письменной форме. Все необходимые операции, геометрическое выравнивание и функциональные проверки должны быть выполнены в соответствии с рекомендуемыми методиками, а результаты должны быть задокументированы.

Станок должен быть установлен на подходящем основании. Для портативного станка это может быть устойчивый стол. Геометрические испытания должны проводиться в среде с приемлемыми условиями вибрации. Рядом не должно быть работающего оборудования. Если возникают проблемы с вибрацией, следует проверить значения внешних вибраций. Методы вибрационных испытаний указаны в ISO230-8.

Выравнивание. Целью выравнивания или нивелирования является получение условия статической устойчивости машины, что облегчает последующие измерения, особенно те, которые относятся к прямолинейности движения определенных узлов. Хотя часто это удобный метод для

достижения прямолинейности движения, абсолютное выравнивание не является обязательным требованием для станков.

Температурный режим отдельных узлов перед испытаниями. Целью испытаний, описанных в ISO 230, является оценка точности станка в условиях, максимально приближенных к условиям нормальной работы, в том числе в отношении смазки и рабочего прогрева конструкции станка. Во время геометрических и механических испытаний такие узлы, как шпиндель, направляющие, ходовые пары, которые подвержены нагреву и, как следствие, изменению положения или формы, должны быть доведены до надлежащей температуры путем холостого хода станка в соответствии с условиями использования и инструкциями производителя. Эталонная температура для промышленных измерений размеров составляет 20°C, поэтому измерительные приборы и измеряемые объекты должны находиться в равновесии с окружающей средой, где температура поддерживается на уровне 20°C.

Следует принимать во внимание, насколько размер станка (или его параметров) изменяется в течение нормального рабочего цикла при изменении от температуры окружающей среды до рабочей температуры. Предварительная последовательность прогрева и температура окружающей среды, при которой станок должен быть проверен, должны быть предметом соглашения между производителем и пользователем.

4.5 Подготовка проверки и настройка контрольных приборов

Большинство измерений по указанным стандартам выполняются для определения погрешности движения между узлами станка, которые используются для установки, и узлами, которые закрепляют и направляют режущий инструмент. Могут использоваться различные приспособления и контрольные инструменты, способные измерять одни и те же параметры и имеющие погрешность измерения одного уровня. Внимание должно быть

уделено термической стабилизации измерительных средств. Испытательные настройки системы станка включают в себя два элемента, один из которых реализует контрольную точку, линию или поверхность, а второй - датчик какого-либо типа для считывания отклонений относительно этой контрольной точки, линии или поверхности. Опорной базой может быть упор, эталонная линейка, поверочная плита. Датчик может быть емкостным или вихретоковым, лазерным интерферометром или обычным индикатором часового типа. Перед началом измерения необходимо убедиться, чтобы конкретная настройка контрольно-измерительных средств была выполнена правильно в рабочей зоне станка. Такая проверка включает два основных теста: на гистерезис и на стабильность.

Настройка и тест на воспроизведение. Целью теста на гистерезис является обнаружение любых эффектов гистерезиса или отклонений воспроизведения фиксированного положения узла станка при повторениях движения. Они могут быть вызваны ослаблением болтов при проверочной настройке, недостаточной конструктивной прочностью и так далее. Любой гистерезис, связанный с наладкой станка, учитывается при определении геометрической точности в виде поправки, которая приводит к исключению повторяемости результатов измерений. Гистерезис контрольно-измерительного приспособления определяется путем приложения последовательно силы в двух направлениях и измерении результирующего отклонения в исходной точке. Чувствительность теста к величине силы должна быть незначительна. Диапазон сил может составлять от 20 Н до 200 Н в зависимости от измерительной системы и разрешения датчика линейного перемещения. Применяемые усилия не должны повреждать элементы станка или контрольного приспособления. Рекомендуется усилие менее 40 Н, чтобы избежать появления гистерезиса. Измерять силы непосредственно нет необходимости.

Процедура испытаний заключается в следующем. Необходимо установить и обнулить датчик смещения между двумя положениями в

направлении проверяемой оси. Приложить усилие рукой к эталонному элементу (опоре, линейке, плите). После того, как сила приложена, постепенно уменьшить эту силу до нуля и считать показания на датчике смещения. Приложить усилие рукой в противоположном направлении, постепенно уменьшить усилие до нуля и опять считать показания датчика смещения. Разница в показаниях - это и есть гистерезис в контрольной точке. Приложить усилие к державке датчика смещения. Постепенно уменьшить эту силу до нуля и считать показания на датчике смещения. Приложите усилие рукой в противоположном направлении, с той же процедурой. Разница в показаниях равна гистерезису системы крепления датчика перемещения. Сумма полученных значений гистерезиса для двух элементов (базовой поверхности и датчика) представляет собой общий гистерезис контролирующей системы. Обычная практика заключается в том, что гистерезис установки должен составлять менее 10% от величины желаемой повторяемости измерений. Если получено значение значительно больше этого рекомендуемого диапазона, и если этот гистерезис нельзя уменьшить путем дополнительной настройки установки, это может быть вызвано самим станком. В таких случаях дальнейшие испытания должны быть прекращены, пока это условие не будет исправлено.

4.6 Тест на стабильность системы

Станки подвержены действию вибраций различного происхождения, как от внутренних, так и от внешних источников. Эти колебания изменяются как по частоте, так и по амплитуде, в зависимости от времени, положения в рабочей зоне станка и направления оси измерения. Оптимальные значения коэффициентов жесткости и демпфирования станков могут исключать влияние этих вибраций на фактические эксплуатационные характеристики оборудования. Однако неправильная установка испытываемого станка может также сделать проверку чувствительной к этим вибрациям. Тест на

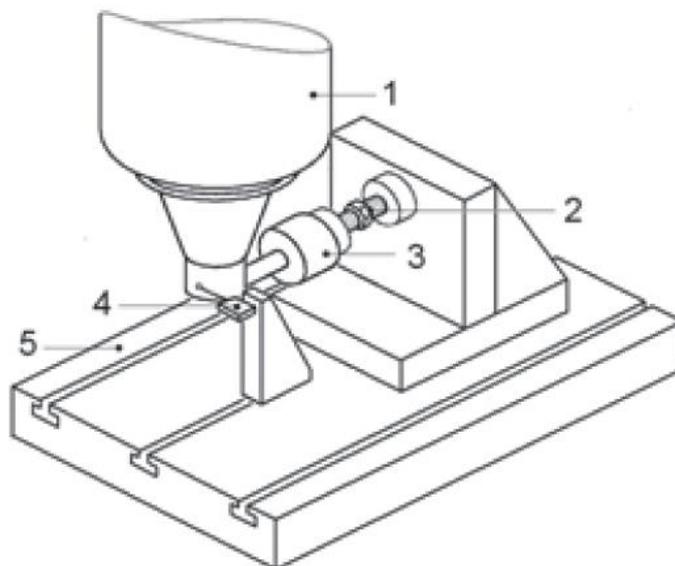
стабильность (устойчивость) системы предназначен для того, чтобы убедиться, что подготовительный монтаж измерительной системы не оказывает существенного влияния на неопределенность измерений.

Процедура испытаний заключается в следующем. Установить измерительный прибор так, как это делается для теста на производительность. Установить рабочие органы станка в середине хода для проверки работоспособности. Установите прибор/датчик на ноль и произведите выборочную проверку со скоростью и временем, равными тем, которые использовались в тесте, не перемещая станок. Диапазон показателей данных выборки не должен превышать 10% от допустимого значения допуска проводимого теста.

Статическая податливость станка и гистерезисные испытания. Эти испытания предназначены для оценки статического соответствия станка и определения гистерезиса, когда статическая нагрузка прикладывается между инструментом и заготовкой или между любыми узлами станка. Они дают упрощенное представление о том, как будут проходить более строгие испытания на соответствие по геометрической точности. Значения коэффициентов податливостей варьируются в зависимости от направления осей станка и направления приложенного усилия. Эти данные должны быть записаны вместе с результатами испытаний.

Линейная податливость измеряется вблизи центра рабочей зоны и измеряется по каждой оси линейного позиционирования. Линейная податливость для узлов станков с осями вращения измеряется как радиальное смещение от средней оси вращения. Разработчик конструктор при проектировании должен указать максимальную допустимую нагрузку и предоставить подробные инструкции по конструкции механизмов крепления. Поскольку нагрузки, применяемые в испытаниях, могут быть велики, правильная конструкция этих механизмов необходима для безопасности персонала и станка.

Испытания на статическую податливость станка и гистерезис с применением внешней силы. Типовая измерительная установка показана на рисунке 20.



1 - корпус шпинделя; 2 – нагрузочный винт; 3 – тензодатчик; 4 - датчик линейного перемещения; 5 – базовая поверхность стола станка

Рисунок 20 – Схема определения податливости станка

Нагрузочное устройство 2 и датчик силы 4 (это может тензодатчик или любое динамометрическое устройство) жестко закреплены последовательно между элементом станка, удерживающим инструмент 1 (шпиндель), и деталью, связанной с рабочей поверхностью стола станка 5 в направлении вдоль оси, которая проверяется в данном тесте. Датчик линейного перемещения 4 показывает относительное смещение от нагрузки. Статическая нагрузка создается внешним нагрузочным устройством, таким как винт 2. Это может быть и гидравлический привод. Метод, количество точек и направлений приложенных нагрузок должны быть указаны в стандартах для конкретного станка.

Выводы по разделу:

В четвертом разделе рассматривается методика для определения геометрической точности проектируемого, разработанного станка. Для этого определяется погрешность расположения рабочего органа в виде торца инструментального шпинделя в рабочей зоне станка при перемещении верхней каретки относительно нижней во всем возможном диапазоне значений. После этого идет построение карты погрешностей в рабочей зоне, которая позволяет определить максимальную и минимальную точность. Выбрана методика измерения, необходимые инструментальные средства (индикатор часового типа или, как альтернативный вариант, датчики бесконтактного типа) установленные в инструментальном шпинделе.

Базами являются рабочая поверхность стола станка или поверочная плита, которая устанавливается на этом столе.

5 Анализ жесткости и динамических параметров станка

Для оценки конструкторских параметров портативного станка для фрезерования необходимо исследовать его свойства по двум направлениям. Первое связано с исследованием конструктивной жесткости элементов и узлов станка. Второе направление связано с исследованием частотных динамических характеристик конструкции станка. Для получения параметров деформации используем блок расчета системы Ansys статический анализ конструкций. Для этого необходимо 3-D модель станка со всеми узлами и деталями, необходимыми для обеспечения жесткости при обработке, импортировать в разрешении *.x_t в Workbench. Для этого в первоначальной сборке убираем детали, которые не влияют на деформацию станка при резании. Это крепежные элементы: винты, гайки, опоры для направляющих скалок. Это связано с деформацией, которая будет протекать преимущественно в базовых отверстиях, где зафиксированы направляющие скалки в опорных плитах (рисунок 21).

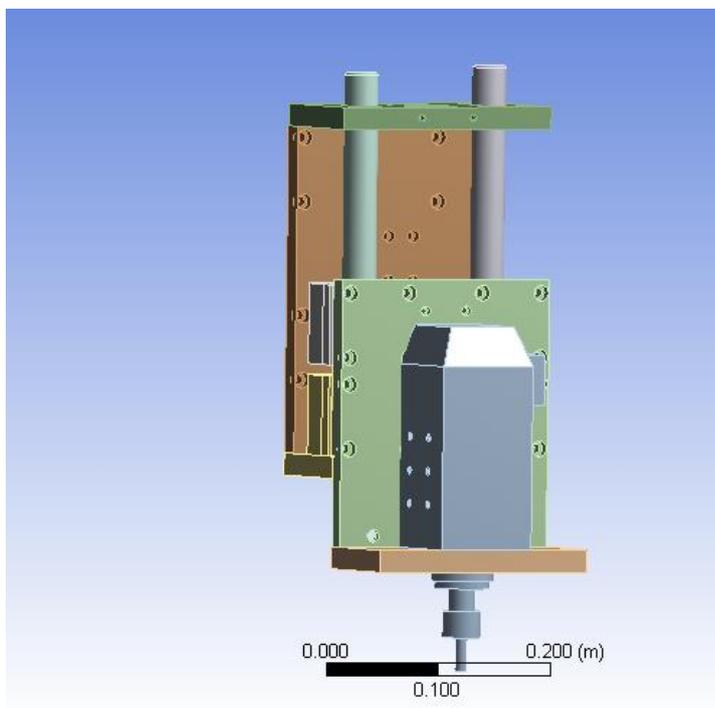


Рисунок 21 – Модель каретки со шпинделем

Упрощенная модель необходима для уменьшения времени расчета методом конечных элементов. Для всех элементов станка выбираем материал - конструкционную сталь. Фактический материал деталей станка, несущих элементов стола, боковых плит - алюминиевый сплав, который имеет прочностные характеристики ниже, чем у конструкционной стали. Но для упрощения расчетов, для всех несущих элементов принимаем для расчета материал конструкционную сталь.

После импорта модели производим коррекцию контактных зон. Принимаем эти зоны связанными между собой для создания корректной сетки конечных элементов. После этого производится разбиение модели на конечные элементы в автоматическом режиме.

Для отработки методики расчета деформационных параметров и частотных характеристик используется первоначально только один узел - это каретка со шпинделем станка, установленная на одной паре вертикальных направляющих.

Для нагружения выбираем силы, направленные по осевым координатам x и y которые равны 200 Н. Данная сила возникает при фрезеровании сталей, цветных сплавов, фрезой с максимальным размером фрезы 10 мм, которую возможно установить в шпинделе данного станка. Закрепление модели производится по задней стенке плиты каретки, на которой по торцам крепятся опорные плиты для установки направляющих скалок, по которым производится перемещение каретки со шпинделем на линейных подшипниках.

Результаты выполненного статического анализа приведены в таблицах 1,2 и на рисунках 22, 23.

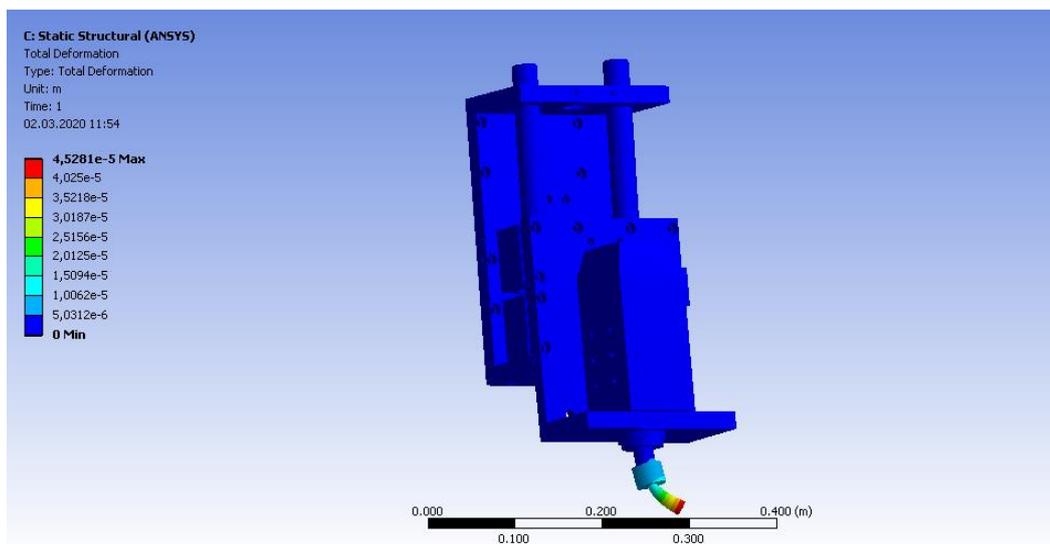


Рисунок 22 – Результат нагружения станка силой фрезерования для нижнего положения каретки

Как видно из результатов, максимально деформация наблюдается на режущем инструменте, который имеет очень малые размеры. При этом, для расчета выбирался инструмент с максимально возможным диаметром. В общий баланс деформации основную долю вносит именно инструмент. Отклонения в геометрическом положении инструмента в основном будут определяться его жесткостью, конструктивными размерными взаимосвязями, которые формируются при сборке всех направляющих элементов: скалок, линейных подшипников, несущих плит данного станка.

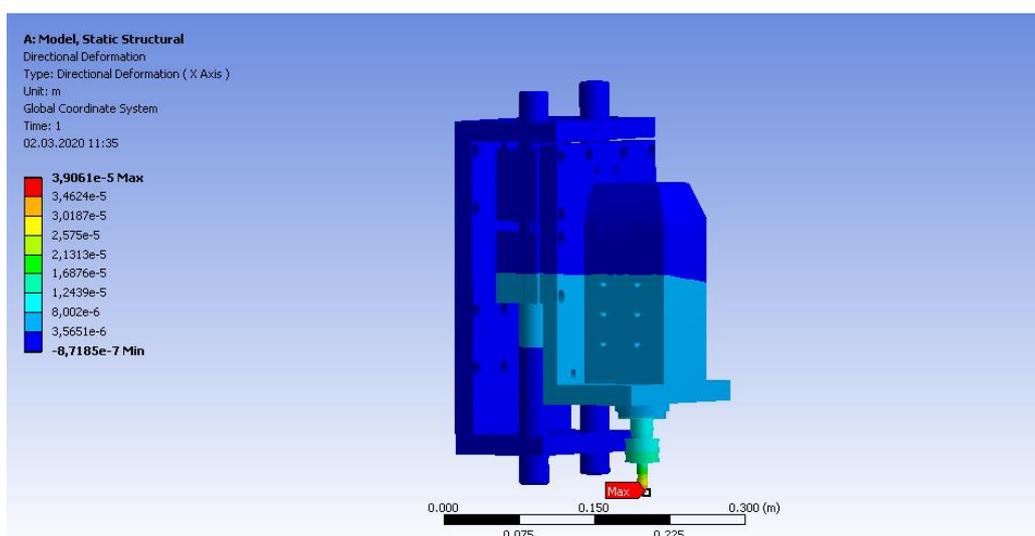


Рисунок 23 – Результат нагружения станка силой фрезерования для верхнего положения каретки

Для исследования динамических параметров данного узла используем подпрограмму модального расчета. Для этого, ту же самую модель каретки со шпинделем загружаем в Workbench.

Особенность расчета данного узла заключается в том, что и статический и динамический расчет производим для двух положений каретки. Это два относительных положения каретки и направляющих: верхнее и нижнее.

После импорта геометрии и разбиения на конечные элементы задаются граничные условия. Они аналогичны статическому расчету. Это жесткая заделка по задней плоскости несущей плиты. После этого производится расчет собственных частот и соответствующих форм колебаний. Результаты расчета выведены для общей деформации, а также координатных смещений в плоскости x-y. Для каждой частоты собственных колебаний определена форма колебаний. Все данные представлены на рисунках 24- 42 и в таблицах 3-5.

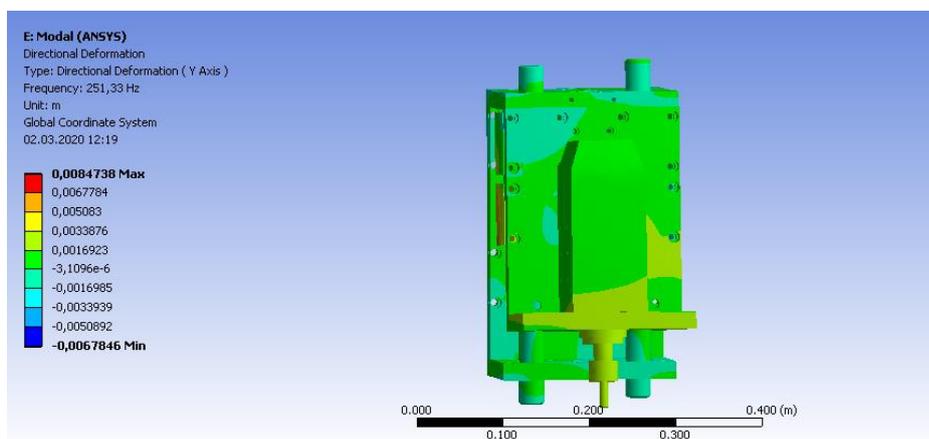


Рисунок 24 – Результат модального анализа станка для верхнего положения каретки по y для первой частоты

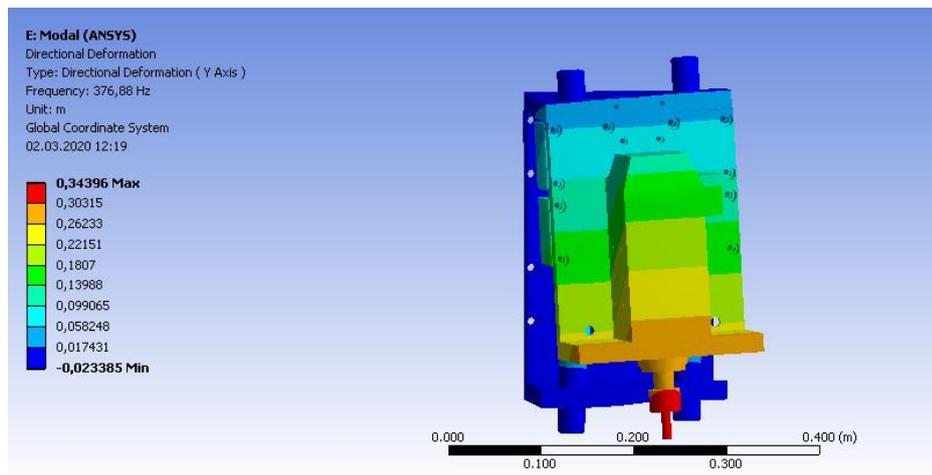


Рисунок 25 – Результат модального анализа станка для верхнего положения каретки по у для второй частоты

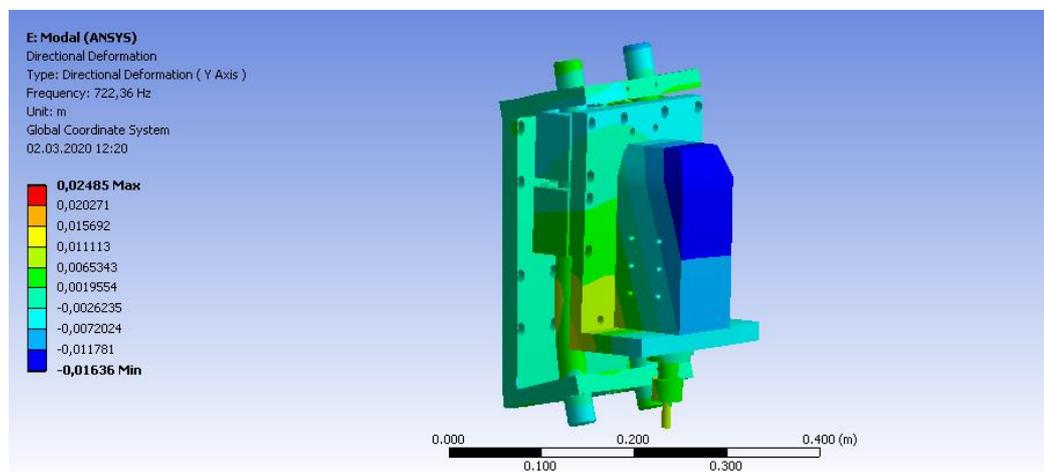


Рисунок 26 – Результат модального анализа станка для верхнего положения каретки по у для третьей частоты

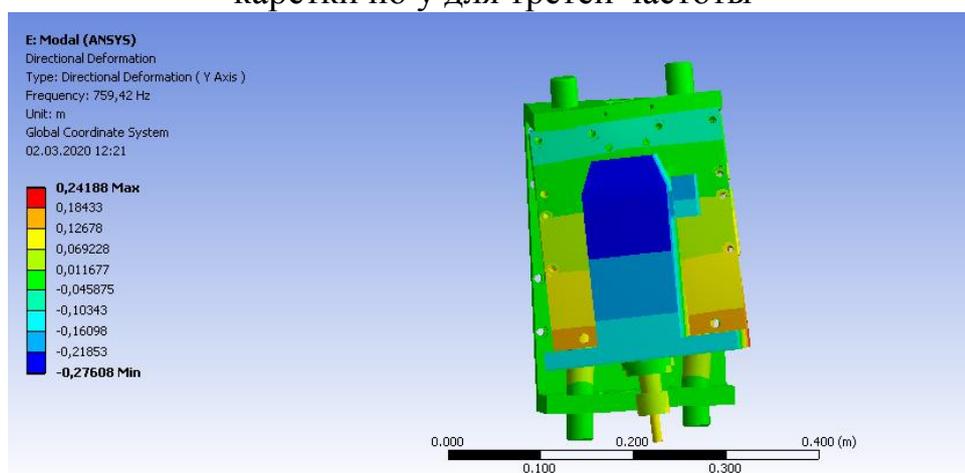


Рисунок 27 – Результат модального анализа станка для верхнего положения каретки по у для четвертой частоты

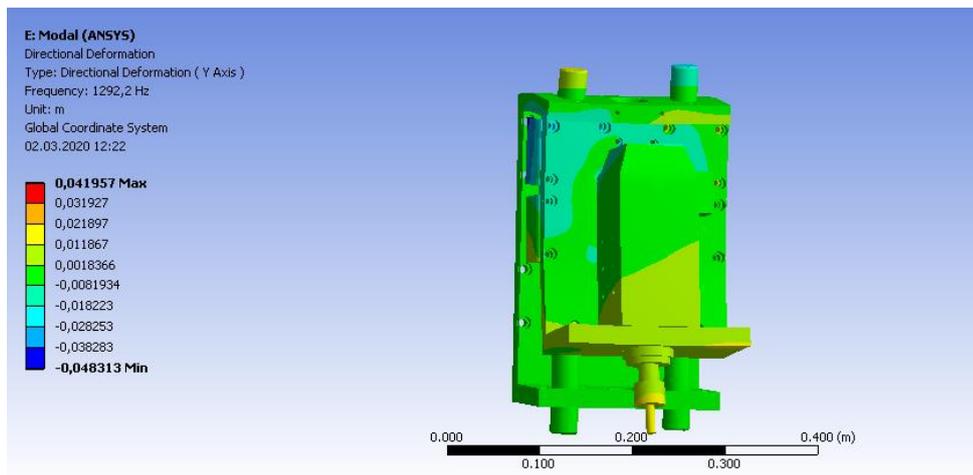


Рисунок 28 – Результат модального анализа станка для верхнего положения каретки по y для пятой частоты

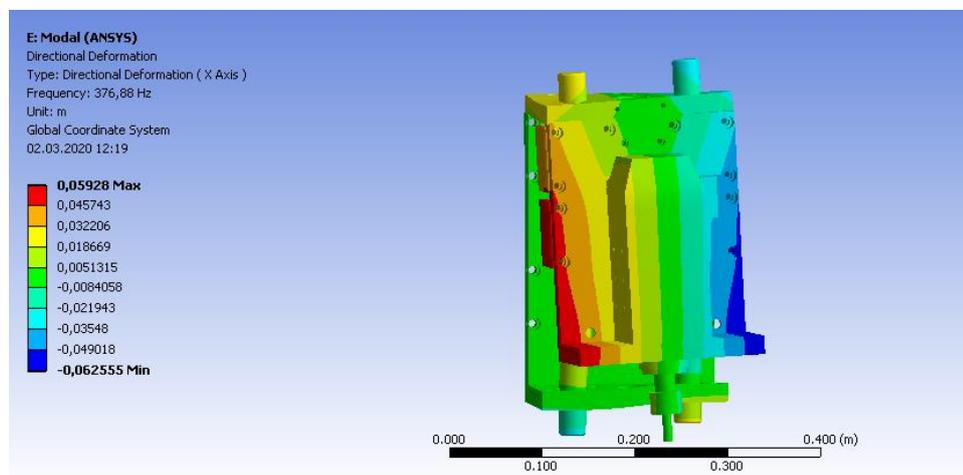


Рисунок 29 – Результат модального анализа станка для верхнего положения каретки по x для первой частоты

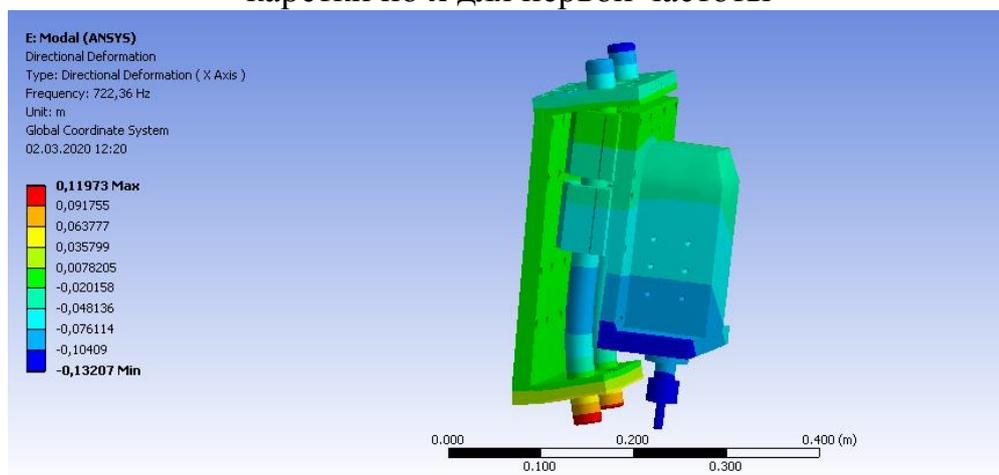


Рисунок 30 – Результат модального анализа станка для верхнего положения каретки по x для второй частоты

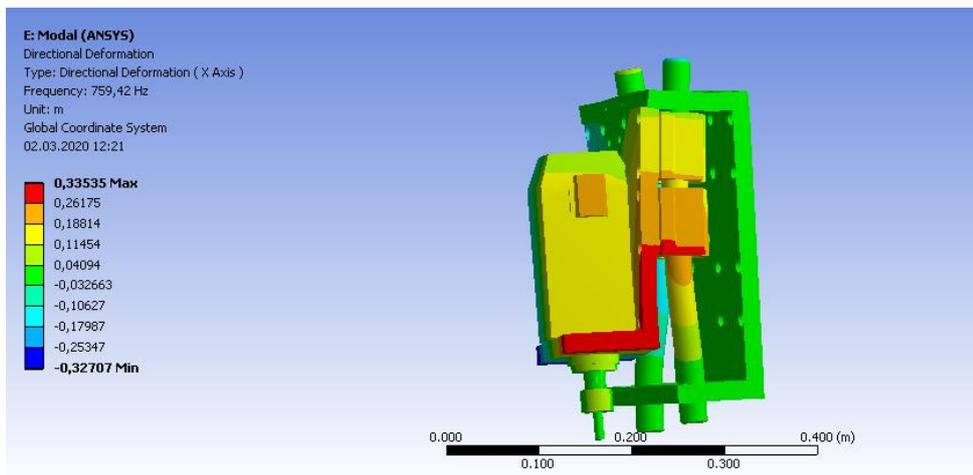


Рисунок 31 – Результат модального анализа станка для верхнего положения каретки по x для третьей частоты

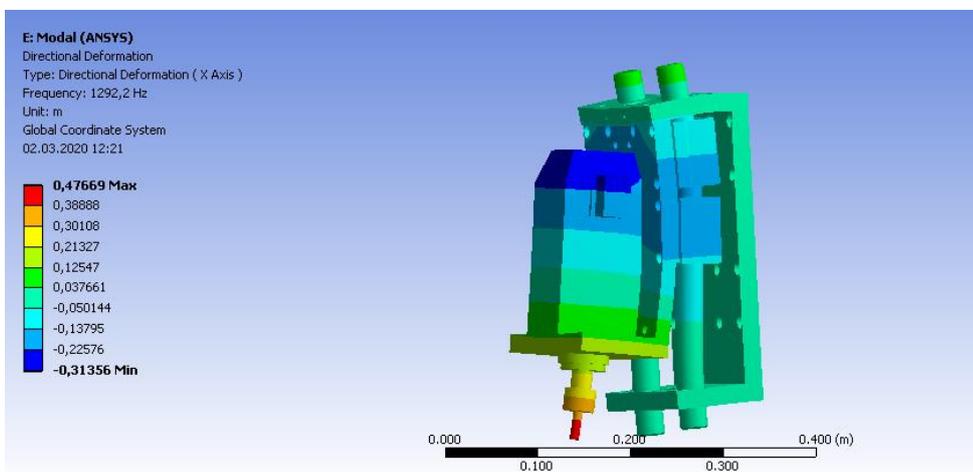


Рисунок 32 – Результат модального анализа станка для верхнего положения каретки по x для четвертой частоты

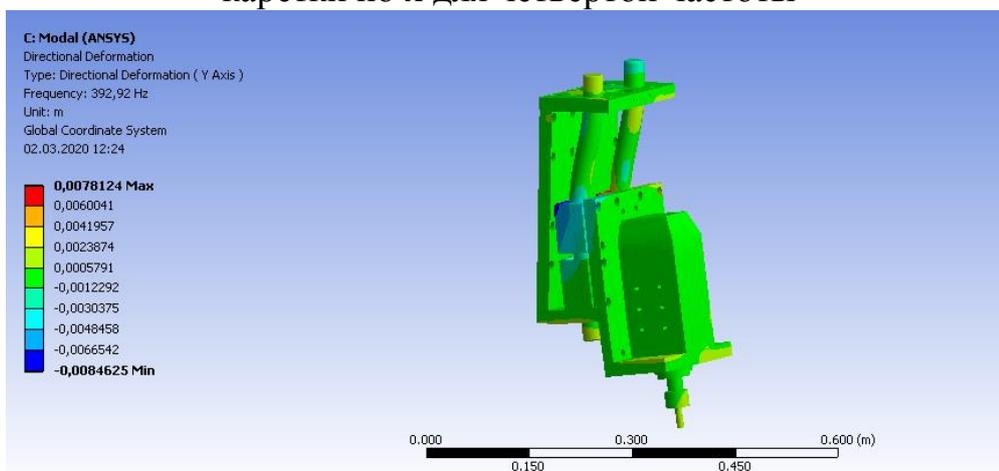


Рисунок 33 – Результат модального анализа станка для нижнего положения каретки по y для первой частоты

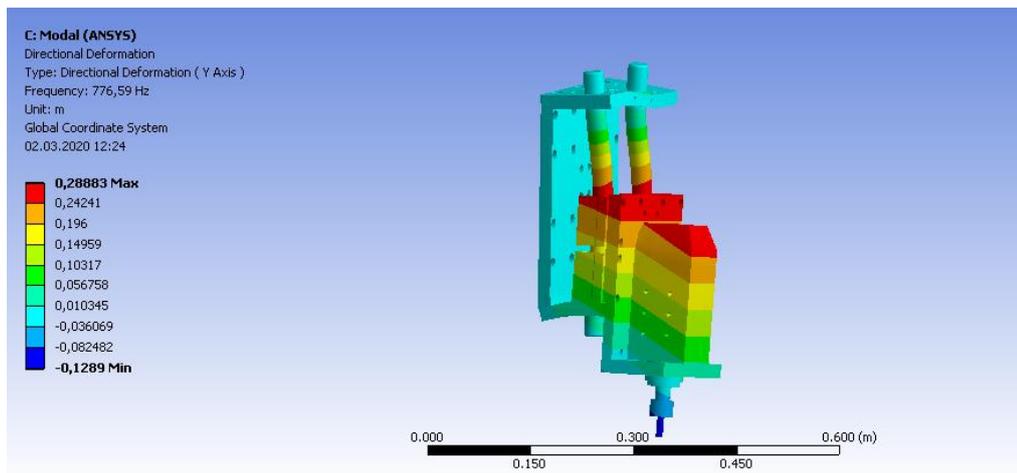


Рисунок 34 – Результат модального анализа станка для нижнего положения каретки по у для второй частоты

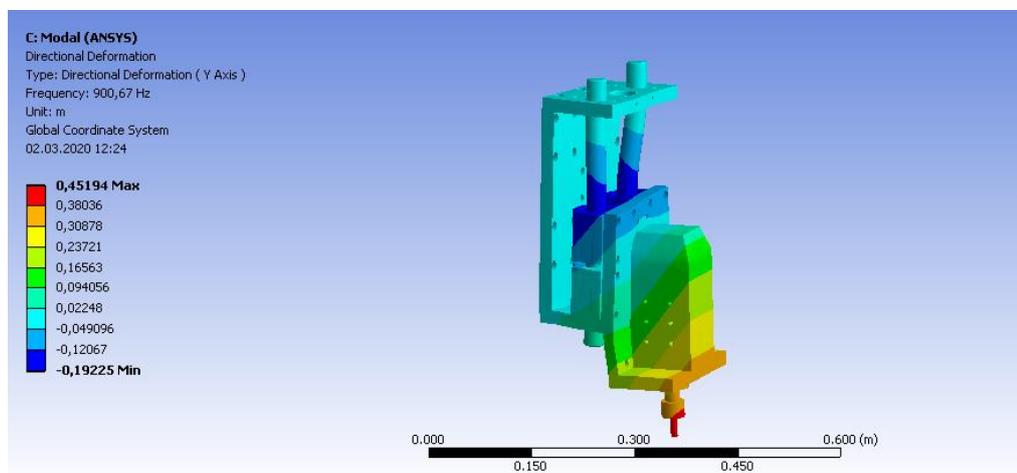


Рисунок 35 – Результат модального анализа станка для нижнего положения каретки по у для третьей частоты

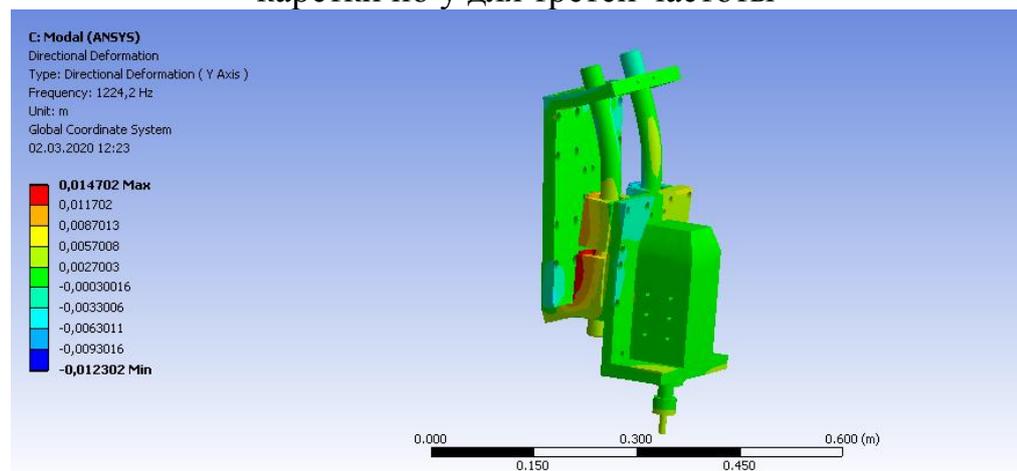


Рисунок 36 – Результат модального анализа станка для нижнего положения каретки по у для четвертой частоты

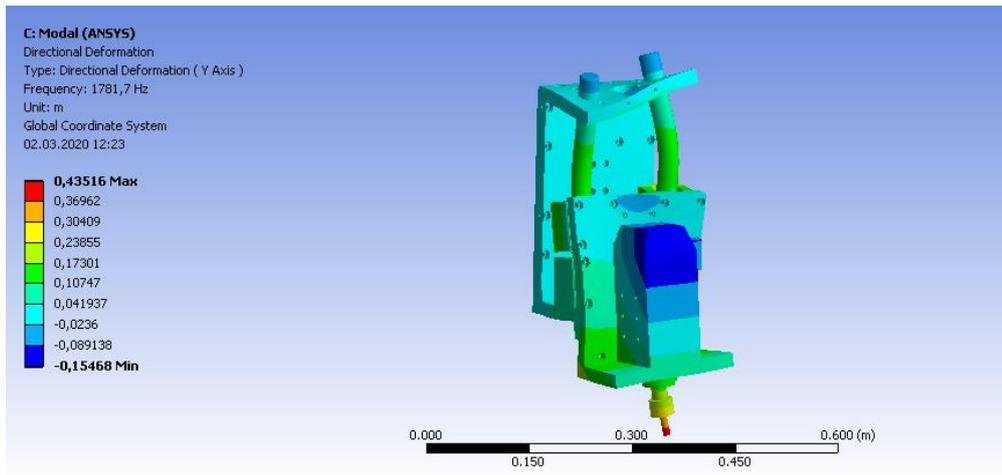


Рисунок 37 – Результат модального анализа станка для нижнего положения каретки по у для пятой частоты

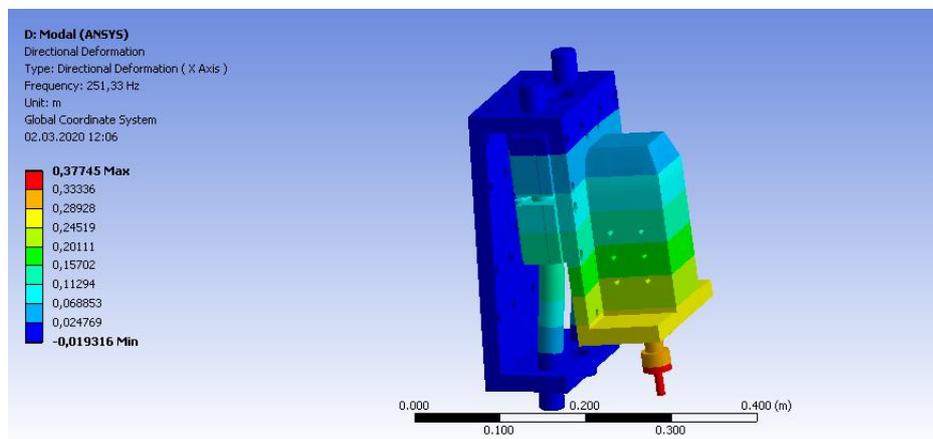


Рисунок 38 – Результат модального анализа станка для верхнего положения каретки по х для первой частоты

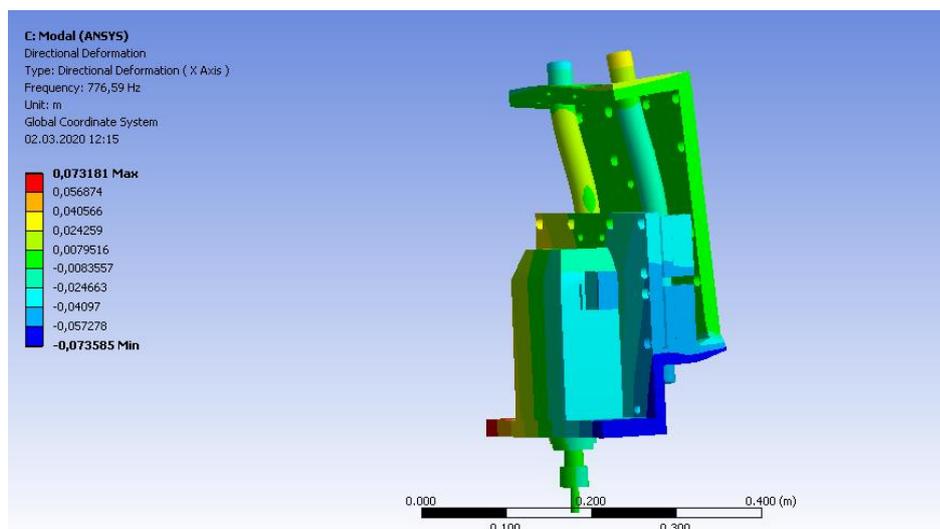


Рисунок 39 – Результат модального анализа станка для верхнего положения каретки по у для второй частоты

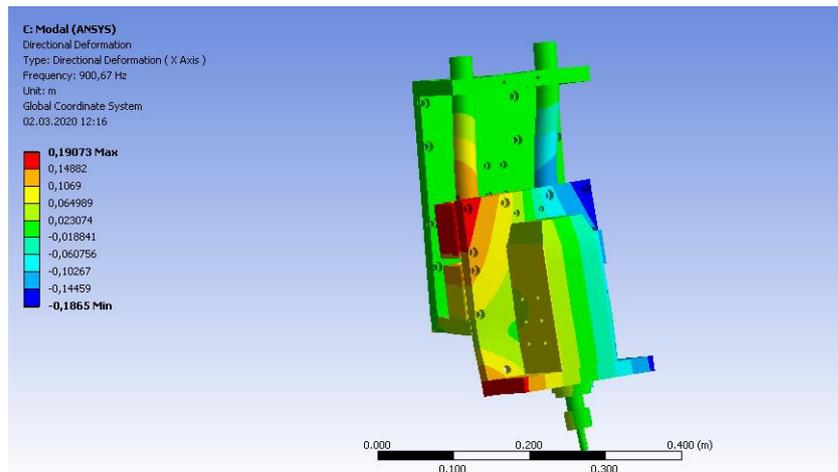


Рисунок 40 – Результат модального анализа станка для нижнего положения каретки по x для второй частоты

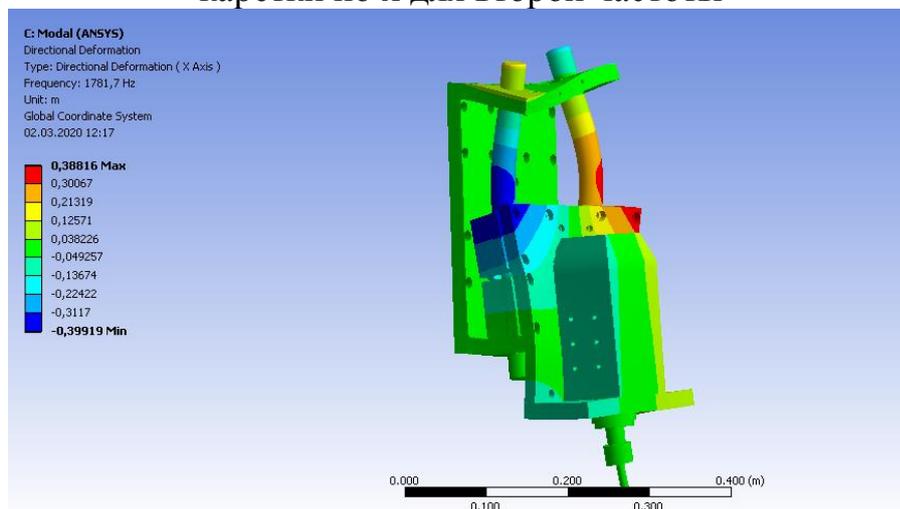


Рисунок 41 – Результат модального анализа станка для нижнего положения каретки по x для третьей частоты

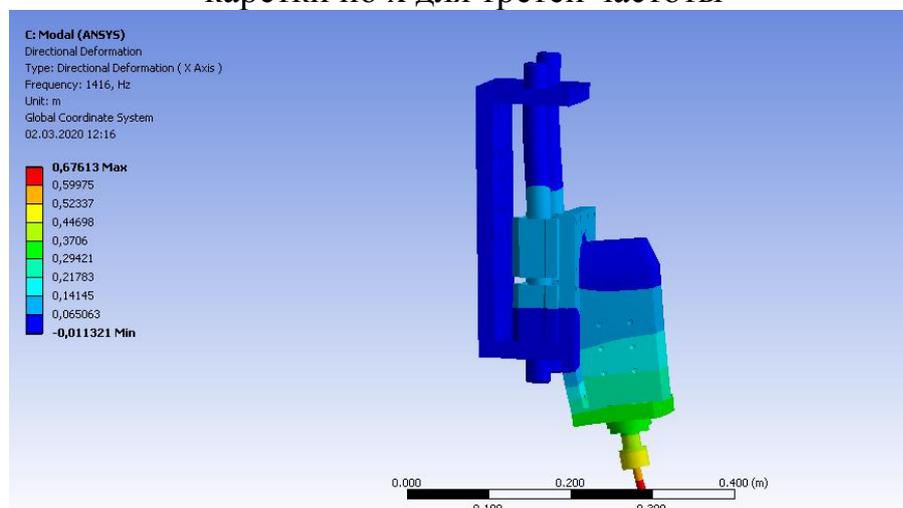


Рисунок 42 – Результат модального анализа станка для нижнего положения каретки по x для четвертой частоты

Таблица 1 – Параметры материала для моделирования

Предел прочности на сжатие	2.5e+008 Па
Плотность	7850 кг м ⁻³
Предел пропорциональности	2.5e+008 Па
Предел текучести	4.6e+008 Па
Коэффициент линейного расширения	1.2e-005 °C ⁻¹
Удельная теплоемкость	434 J kg ⁻¹ °C ⁻¹
Теплопроводность	60.5 W m ⁻¹ °C ⁻¹

Таблица 2 – Параметры нагружения

Ось координат	Параметр, Н
X компонента	200
Y компонента	200
Z компонента	0

Таблица 3 – Результат модального анализа для верхнего положения каретки

Мода колебаний	Частота, Гц
1	392,92
2	776,59
3	900,67
4	1224,2
5	1416
6	1781,7

Таблица 4 – Результат модального анализа для верхнего положения каретки

Мода колебаний	Частота, Гц
1	251,33
2	376,88
3	722,36
4	759,42
5	1292,2
6	1515

Результаты расчета: максимум деформации на шпинделе $0,0000518$ м, по оси x – $0,000039$ м.

Нижнее положение каретки. Результат статического расчета. Результаты расчета: максимум деформации на шпинделе $0,0000453$ м, по оси x – $0,0000324$ м.

Как видно, собственные частоты имеют достаточно высокие значения в герцах. При фрезеровании материалов, с учетом того, что инструменты могут применяться двух, трех и четырехзубые при высокой частоте вращения инструмента, динамическая сила резания по частоте может совпасть с одной из собственных частот данного узла.

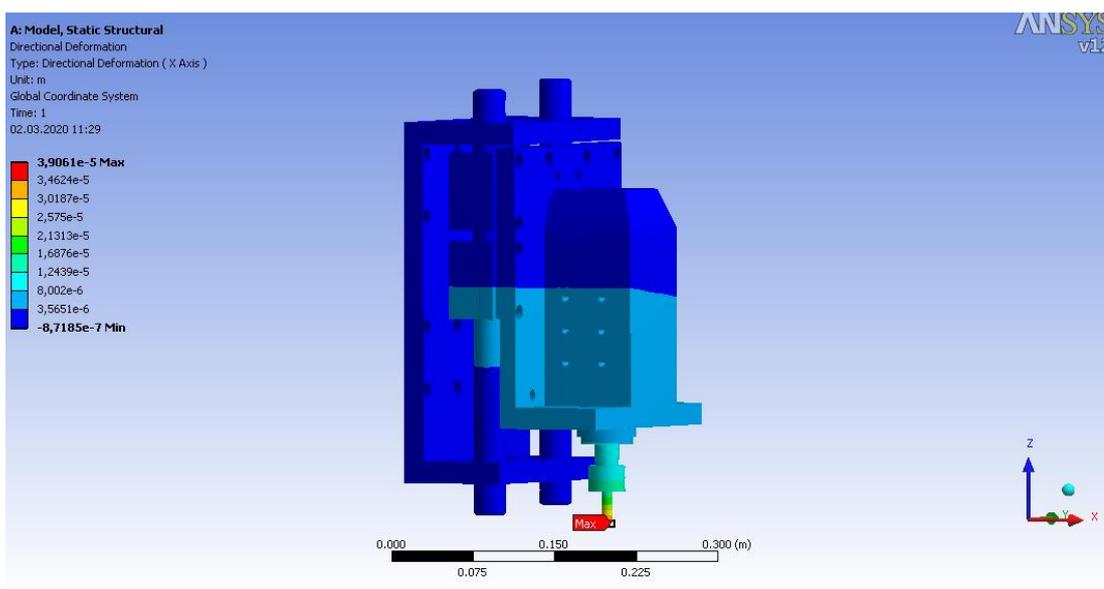


Рисунок 43 – Результат статического нагружения станка для верхнего положения каретки по x

Это приведет к нежелательным эффектам в виде резонанса и будет сопровождаться увеличением амплитуды колебаний рабочей части фрезы. Это ведет к снижению качества обработки, снижению точности, также повышению износа инструмента вплоть до его поломки при превышении динамическими нагрузками критических значений.

Выводы по разделу:

Для определения деформации при обработке в статическом и динамическом состоянии проведено моделирование методом конечных элементов по расчетной программе Ansys. Для этого отобрана только верхняя каретка. Методика отработана и может быть реализована для всего станка при условии достаточных информационных ресурсов.

Верхняя каретка закрепляется по направляющей пластине, которая крепится на нижней каретке. Далее идет разбивка сеткой конечных элементов, задание граничных условий закрепления, как уже было сказано выше, по пластинам, которыми она крепится к нижней каретке. Сила нагружения прикладывалась к шпинделю. Далее производился расчет статической деформации, причем был проведен в нескольких вариантах для различных положений каретки на направляющих (в крайних положениях и в середине). Это позволило определить, что при различных положениях каретки, деформация меняется.

Второй метод расчета - модальный анализ, который позволяет определить собственные частоты выбранных узлов станка. Результат этого анализа позволил определить первые шесть собственных гармоник колебаний, а также построить соответствующие формы колебаний, которые показывают деформации всех узлов на соответствующих частотах. Это дает возможность установить при обработке без вибрационные режимы резания, которые не попадают в соответствующие частотные диапазоны собственных гармоник узлов станка, чтобы не возникло эффекта резонанса. Это позволяет обеспечить повышение виброустойчивости при фрезеровании.

Заключение

В диссертации рассмотрена методика определения эксплуатационных характеристик малогабаритного станка портального типа для фрезерных работ. Для этого проанализированы государственные и международные стандарты по определению различных параметров станков. Данные стандарты группируются по характеристикам, которые они регламентируют. Есть отдельные стандарты для регламентации и определения точности станка, виброустойчивости, шума, точности позиционирования инструмента для автоматизированного оборудования, безопасности эксплуатации станка. С учетом специфических особенностей настольного малогабаритного станка, которые включают в себя малую конструктивную жесткость элементов станка, неопределенность геометрических параметров деталей, сделанных в условиях единичного производства, предложена упрощенная методика определения базовых параметров станка, которая включает в себя параметры по геометрической точности и жесткости станка. Для определения отклонений от параллельности и плоскостности в горизонтальной плоскости стола станка проведен цикл экспериментальных работ по определению отклонения торца инструмента относительно плоскости стола станка. Дополнительно к этому циклу работ выполнен теоретический расчет по размерному анализу сборочных конструкторских цепей. В ходе анализа получены обоснованные допуски на размеры деталей и сопряжения, которые обеспечат заданную геометрическую точность фрезерования. Также выполнен комплекс теоретических исследований методом конечных элементов по определению упругой деформации инструмента и шпиндельного узла. Для этого построена трехмерная сборочная модель. В ходе анализа она разбивалась на сетку конечных элементов, задавались граничные условия и условия нагружения. Для определения параметров жесткости по всей рабочей зоне станка проводилось измерение смещения шпиндельного узла относительно плоскости стола в девяти контрольных

точках. Было произведено нагружение силами в перпендикулярных направлениях. Дополнительно к этому проведен анализ баланса деформаций инструмента и шпинделя в зависимости от геометрических размеров инструмента. Этот анализ дает границу ограничения по диаметру инструмента, выше которой необходимо учитывать жесткость несущей системы станка. Соответственно, ниже этой границы, все деформации приходятся на мелкогабаритный фрезерный инструмент. Представленная методика систематизирована в нескольких пунктах, которые определяют порядок необходимых работ по определению основных геометрических и жесткостных характеристик проектируемого станка. Данная методика требует в будущем дополнений в виде нескольких этапов, которые связаны с определением виброустойчивости, точности позиционирования инструмента в горизонтальной и вертикальной плоскостях с учетом системы управления.

Рассмотрены основные понятия, связанные с нормированием точности и других показателей, характеризующих качество металлообрабатывающего оборудования. Приводится описание базовых методов по определению прямолинейности движения рабочих органов станка. Рассмотрены основные методы контроля процессов обработки, протекающих на станке, включая определение статических и динамических деформаций.

Рассмотрены алгоритмы анализа полученной информации с диагностических сигналов, которые определяются задачами управления.

Сформулированы основные требования к геометрическим измерениям малогабаритного фрезерного станка.

Проанализирован процесс фрезерования. Для данного метода обработки разработана расчетная схема.

Для расчетной схемы составлена математическая модель в виде системы уравнений. Она характеризует деформацию заготовки и инструмента под действием сил резания в различных направлениях, а также включает в себя уравнения, определяющие силы фрезерования (тангенциальную, осевую и радиальную). По предложенной математической

модели данные силы являются переменными характеристиками в зависимости от угла поворота фрезы.

Для расчетной схемы и полученной математической модели составлена структурная схема, которая позволила смоделировать данный процесс в программе matlab. Результаты моделирования показывают, что влияние крутильной жесткости оказывает значительное влияние на поперечные деформации инструмента, что особенно актуально при обработке на малогабаритных станках фрезами мелко размерной серии. Смещение инструмента вносит определяющую долю деформации в баланс смещений технологической системы.

Рассматривается методика определения жесткости станка в статическом положении. Для этого используется нагрузочное динамометрическое устройство и индикатор часового типа, закрепленный в штативе. В процессе измерения производят несколько раз нагружение и разгрузку. Производят построение кривой, которая позволяет определить не только коэффициент жесткости, но и определить параметры гистерезиса. Они связаны с контактной деформацией в стыках, а также люфтами.

Определяющим элементом по деформациям является инструмент. Из-за его небольшого диаметра возникает, как правило, максимальная деформация на конце данного инструмента и он является ограничительным звеном по максимальной нагрузке, которая допустима на предлагаемом станке.

Выполнен размерный анализ по определению обоснованных геометрических отклонений на размеры и отклонения расположения поверхностей на отдельные детали станка, которые позволили бы обеспечить необходимую геометрическую точность по движению инструментального шпинделя по верхней и нижней кареткам станка. Для этого в разных направлениях составлены размерные сборочные конструкторские цепи и для заданных замыкающих размеров произведен расчет допусков на составляющие звенья, где параметрами являются не только допуски на

размеры, но и отклонения по параллельности и перпендикулярности, а также соосности конструктивных элементов отдельных деталей.

Рассматривается методика для определения геометрической точности проектируемого, разработанного станка. Для этого определяется погрешность расположения рабочего органа в виде торца инструментального шпинделя в рабочей зоне станка при перемещении верхней каретки относительно нижней во всем возможном диапазоне значений. После этого идет построение карты погрешностей в рабочей зоне, которая позволяет определить максимальную и минимальную точность. Выбрана методика измерения, необходимые инструментальные средства (индикатор часового типа или, как альтернативный вариант, датчики бесконтактного типа) установленные в инструментальном шпинделе.

Базами являются рабочая поверхность стола станка или поверочная плита, которая устанавливается на этом столе. Для определения деформации при обработке в статическом и динамическом состоянии проведено моделирование методом конечных элементов по расчетной программе Ansys. Для этого отобрана только верхняя каретка. Методика отработана и может быть реализована для всего станка при условии достаточных информационных ресурсов.

Верхняя каретка закрепляется по направляющей пластине, которая крепится на нижней каретке. Далее идет разбивка сеткой конечных элементов, задание граничных условий закрепления, как уже было сказано выше, по пластинам, которыми она крепится к нижней каретке. Сила нагружения прикладывалась к шпинделю. Далее производился расчет статической деформации, причем был проведен в нескольких вариантах для различных положений каретки на направляющих (в крайних положениях и в середине). Это позволило определить, что при различных положениях каретки, деформация меняется.

Второй метод расчета - модальный анализ, которой позволяет определить собственные частоты выбранных узлов станка. Результат этого

анализа позволил определить первые шесть собственных гармоник колебаний, а также построить соответствующие формы колебаний, которые показывают деформации всех узлов на соответствующих частотах. Это дает возможность установить при обработке без вибрационные режимы резания, которые не попадают в соответствующие частотные диапазоны собственных гармоник узлов станка, чтобы не возникло эффекта резонанса. Это позволяет обеспечить повышение виброустойчивости при фрезеровании.

Результат показал зависимость собственной частоты системы от положения рабочей каретки на направляющих. При фрезеровании это приведет к изменению динамических режимов при перемещении каретки с рассеиванием по точности и шероховатости.

Список используемой литературы

1. Автоматизированные динамические испытания станков: Методические рекомендации. - М. : ЭНИМС, 1990. 48 с.
2. Аникеева О.В. Функциональная диагностика металлорежущих станков // Известия Юго-Западного государственного университета. 2011. № 5-1 (38). С. 106а-112.
3. Аникеева О.В., Ивахненко А.Г. Организация функциональной диагностики металлорежущих станков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2011. № 2-3 (286). С. 133-138.
4. Детали и механизмы металлорежущих станков: В 2-х т. Под общ. редакцией Д.Н. Решетова. - Т. 1. -М.: Машиностроение, 1972. 664 с.
5. Диагностика, испытания и ремонт станочного оборудования / Под ред. В.О. Трилисского. - Пенза: Издательство Пензенского государственного университета, 1998. 374 с.
6. Диллан Б., Сингх Ч. Инженерные методы обеспечения надежности систем: Пер. с англ. – М. : Мир, 1984. 318 с.
7. Идрисова Ю.В., / Кудояров Р.Г., Фецак С.И. Диагностика технического состояния приводов металлообрабатывающих станков по параметрам качества обработанных поверхностей // СТИН. 2013. № 5. С. 6-9.
8. Кабалдин Ю.Г., Шпилев А.М. Самоорганизующиеся процессы в технологических системах обработки резанием. - Владивосток: Дальнаука, 1998. 295 с.
9. Ковенский И.М., Некрасов Р.Ю., Путилова У.С. Повышение эффективности использования режущего инструмента при диагностике и оперативном управлении обработкой на станках с ЧПУ // Вестник Ижевского государственного технического университета. 2008. № 1. С. 3-6.
10. Козочкин М.П., Сабиров Ф.С., Боган А.Н. Диагностика подшипников качения при эксплуатации станков на основе анализа вибрационного сигнала // СТИН. 2013. № 1. С. 21-25.

11. Копылов Л.В., Дмитриев Ю.М., Петухов С.Л. Диагностика состояния прецизионных металлорежущих станков на основе применения систем бесконтактных датчиков // Вестник МГТУ Станкин. 2013. № 3 (26). С. 41-44.
12. Левина З.М., Решетов Д.Н. Контактная жёсткость машин. - М.: Машиностроение, 1971. 264 с.
13. Надежность в технике. Программные испытания технологического оборудования. Общие требования. - М. : Издательство ВНИИНМАШ, 1988. 100 с.
14. Никитин Ю.Р. Диагностика станков с ЧПУ // Интеллектуальные системы в производстве. 2008. № 2 (12). С. 89-90.
15. Отруцкий Ю.Н., Косягин А.В., Вечеркин М.В. Физические методы технической диагностики станков с ЧПУ // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2012. Т. 2. № 70. С. 89-91.
16. Проектирование металлорежущих станков и станочных систем/Справочник-учебник в трёх томах. - Т. 2. Расчёт и конструирование узлов и элементов станков/А.С. Проников, Е.И. Борисов, В.В. Бушуев; Под редакцией А.С. Проникова. - М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана. - Машиностроение, 1995. 320 с.
17. Проников А.С. Программный метод испытания металлорежущих станков. - М. : Машиностроение, 1985. 288 с.
18. Рожков С.В., Шадский Г.В., Шадский В.Г. Диагностика опор шпиндельных узлов металлорежущих станков с использованием искусственных нейронных сетей // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2015. № 2 (310). С. 139-143.
19. Тимошин М.И. Анализ эффективности современных методов и средств диагностики технического состояния узлов металлорежущих станков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2011. № 2-2 (286). С. 147-149.

20. Типовые методики и программы испытаний металлорежущих станков: Методические рекомендации. - М. : ЭНИМС, 1984. 172 с.
21. Altintas Y., C. Brecher, M. Weck, S. Witt Virtual machine tools//Ann. CIRP, 54 (2005), pp. 651-674
22. Bediaga I., J. Muñoa, J. Hernández, L.N. López de Lacalle An automatic spindle speed selection strategy to obtain stability in high-speed milling//Int. J. Mach. Tools Manuf., 49 (5) (2009), pp. 384-394
23. Bolar G., A. Das, S.N. Joshi Measurement and analysis of cutting force and product surface quality during end-milling of thin-wall components//Meas.: J. Int. Meas. Confederation, 121 (2018), pp. 190-204
24. Catania G., N. Mancinelli Theoretical-experimental modeling of milling machines for the prediction of chatter vibration//Int. J. Mach. Tools Manuf., 51 (4) (2011), pp. 339-348
25. Ehmann K.F., DeVor R.E., Kapoor S.G., Cao J. (2008) Design and Analysis of Micro/Meso-scale Machine Tools. In: Wang L., Xi J. (eds) Smart Devices and Machines for Advanced Manufacturing. Springer, London
26. Friedrich, C. Hinze, A. Renner, A. Verl, A. Lechler Estimation of stability lobe diagrams in milling with continuous learning algorithms//Rob. Comput. Integr. Manuf., 43 (2017), pp. 124-134
27. Geldart M., Webb P., Larsson H., Backstrom M., Gindy N., Rask K., A direct comparison of the machining performance of a Variax 5 axis parallel kinematic machining centre with conventional 3 and 5 axis machine tools, International Journal of Machine Tools and Manufacture 43 (2003) pp. 1107–1116
28. Hu S., X. Huang, Y. Zhang, C. Lv Reliability analysis of the chatter stability during milling using a neural network//Int. J. Aerosp. Eng. (2016), Article 5259821
29. Ibone Oleaga, Carlos Pardo, Juan J. Zulaika, Andres Bustillo, A machine-learning based solution for chatter prediction in heavy-duty milling machines, Measurement, Volume 128, 2018, pp 34-44

30. Krolczyk G.M., J.B. Krolczyk, R.W. Maruda, S. Legutko, M. Tomaszewski Metrological changes in surface morphology of high-strength steels in manufacturing processes//Meas.: J. Int. Meas. Confederation, 88 (2016), pp. 176-185
31. Kuljanic E., G. Totis, M. Sortino Development of an intelligent multisensor chatter detection system in milling//Mech. Syst. Sig. Process., 23 (5) (2009), pp. 1704-1718
32. Lamraoui M., M. El Badaoui, F. Guillet Chatter detection in CNC milling processes based on wiener-SVM approach and using only motor current signals//Mech. Mach. Sci., 23 (2015), pp. 567-578
33. Merlet J.-P., Parallel Robots, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 2000
34. Nieslony P., G.M. Krolczyk, S. Wojciechowski, R. Chudy, K. Zak, R.W. Maruda Surface quality and topographic inspection of variable compliance part after precise turning//Appl. Surf. Sci., 434 (2018), pp. 91-101
35. Park S.S., R. Rahnema Robust chatter stability in micro-milling operations//CIRP Ann., 59 (1) (2010), pp. 391-394
36. Portman T., V.S. Chapsky, Y. Shneor, E. Ayalon Machine Stiffness Rating: Characterization and Evaluation in Design Stage//Procedia CIRP, Volume 36, 2015, Pages 111-116
37. Portman V.T., Shneor Y, Chapsky V. (2012) Workspace of Parallel Kinematics Machines with Minimum Stiffness Limits: Collinear Stiffness Value Based Approach. Mechanism and Machine Theory, 49: 67-86
38. Resheto D.N. (Ed.), Elements and Mechanisms of Machine Tools, ol. 1, Mashinostroenie, Moscow, 1972
39. Riin E. I., Handbook on Stiffness & Damping in Mechanical Design, ASME Press, New York, NY, 2010
40. Shneor Y., Portman V.T., Stiffness of 5-Axis Machines with Serial, Parallel, and Hybrid Kinematics: Evaluation and Comparison, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 59/1, 2010, pp. 409–412

41. Sofuoglu M.A., S. Orak Prediction of stable cutting depths in turning operation using soft computing methods//Appl. Soft Comput. J., 38 (2016), pp. 907-921
42. Stejskal, T., Melko, J., Rjabušin, A. et al. Specific principles of work area stiffness measurement applied to a modern three-axis milling machine. Int J Adv Manuf Technol 102, 2541–2554 (2019). <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03393-y>
43. Tlustý J., M. Poláček The stability of machine tool against self-excited vibrations in machining//Int. Res. Prod. Eng. (1963), pp. 465-474
44. Uekita M., Y. Takaya Tool condition monitoring technique for deep-hole drilling of large components based on chatter identification in time–frequency domain//Meas.: J. Int. Meas. Confederation, 103 (2017), pp. 199-207
45. Vrtiel Š, Š Hajdu and M Behúlová Analysis of the machine frame stiffness using numerical simulation//IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 266 (2017) 012015 doi:10.1088/1757-899X/266/1/012015
46. Wojciechowski S., R.W. Maruda, G.M. Krolczyk, P. Niesłony Application of signal to noise ratio and grey relational analysis to minimize forces and vibrations during precise ball end milling//Precis. Eng., 51 (2018), pp. 582-596
47. Wojciechowski S., R.W. Maruda, S. Barrans, P. Niesłony, G.M. Krolczyk Optimisation of machining parameters during ball end milling of hardened steel with various surface inclinations//Meas.: J. Int. Meas. Confederation, 111 (2017), pp. 18-28
48. Wojciechowski, K. Mrozek Mechanical and technological aspects of micro ball end milling with various tool inclinations//Int. J. Mech. Sci., 134 (2017), pp. 424-435
49. Xi F., Zhang D., Mechefske C.M., Lang Y.T., Global kinetostatic modeling of tripod-based parallel kinematic machine, Mechanism and Machine Theory 39 (2004), 357–377
50. Yao Z., D. Mei, Z. Chen On-line chatter detection and identification based on wavelet and support vector machine//J. Mater. Process. Technol., 2108 (5) (2010), pp. 713-719

