

На правах рукописи



ФЕДУКОВ Александр Григорьевич

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ МОДУЛЕЙ ЛИНЕЙНОГО
ПЕРЕМЕЩЕНИЯ УЧЕТОМ ПРОСТРАНСТВЕННО-
КОНТАКТНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ**

Специальность: 2.5.5 – Технология и оборудование механической и физико-
технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Брянск 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Брянский государственный технический университет»

Научный руководитель: **Хандожко Александр Владимирович,**
доктор технических наук, доцент, профессор
кафедры «Металлорежущие станки и
инструменты» ФГБОУ ВО «Брянский
государственный технический университет»

Официальные
оппоненты: **Куц Вадим Васильевич,**
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Машиностроительных
технологий и оборудования», ФГБОУ ВО
"Юго-западный государственный университет"
(г. Курск)

Крутов Алексей Валентинович,
кандидат технических наук, доцент кафедры
«Станки», МГТУ «СТАНКИН» (г. Москва)

Ведущая организация ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет» (г.Воронеж)

Защита состоится « 17 » апреля 2024 г. в 15:00 часов на
заседании диссертационного совета 24.2.277.01., по адресу: 241035, г.
Брянск, ул. Харьковская, д. 10-Б, учебный корп. № 4, ауд. Б101.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Брянский
государственный технический университет» и по адресу в сети интернет:
<https://www.tu-bryansk.ru/mainpage/dissertatsii/fedukov-aleksandr-grigorevich>

Отзывы на автореферат высылать по адресу: 241035, г. Брянск, бульвар
50 лет

Октября, д. 7, ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический
университет».

Автореферат разослан « » 202 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета 24.2.277.01
доктор технических наук, доцент

Нагоркин
Максим Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Производство станочного оборудования является важнейшей задачей промышленности государства, обеспечивая его экономическую безопасность. В прошлом веке наша страна была одним из лидеров в станкостроении. Производства и заводы обладали полным циклом изготовления станочного оборудования. В это время были проведены фундаментальные исследования и на их основе разработаны методики проектирования основных типов металлообрабатывающего оборудования. С 1991 года объемы производства станочного оборудования упали, что привело к отставанию страны от ведущих стран в области станкостроения.

На сегодняшний день в мировом станкостроении сложилась тенденция модульного изготовления оборудования. Предприятия по изготовлению станочного оборудования превратились в сборочные производства, а производители отдельных модулей в узконаправленные производства. Выделилась группа предприятий, ориентированных на производство таких деталей, узлов модульных изделий: шарико – винтовых передач (ШВП), рельсовых направляющих, мотор - шпинделей, револьверных головок, систем ЧПУ, программного обеспечения и т.д.

В связи с модульным принципом в конструкциях резко увеличилось число стыков и соединений, в отличие от уже ранее используемых решений. При проектировании и изготовлении станков высокой степени точности необходимо учитывать величину контактных деформаций возникающих в стыках.

Контактной задаче и ранее уделялось много внимания при проектировании технологического оборудования.

Однако, несмотря на большой прогресс теоретических исследований в этом направлении, для технических расчетов чаще применяют эмпирические зависимости. Это связано с высокой трудоемкостью и громоздкостью вычислений, как правило, выполняемых численными методами (метод конечных элементов и др.). При этом из-за большого числа входных параметров, влияющих на жесткость, точность расчетов часто недостаточна для инженерной практики.

Современное станкостроение в нашей стране также активно использует различные модули для изготовления собственного оборудования, в том числе и станков. Из-за большого числа стыков при проектировании возникают сложности, связанные как с расчетом уточненных номинальных размеров, так и назначением допустимых отклонений на эти размеры. Совершенствование методик проектирования таких деталей и узлов является актуальной задачей.

Степень научной разработанности темы. Исследованиями пространственно-контактных деформаций в контактном слое посвящены работы ученых: К.В. Вотинова, И.Г. Горячевой, И.Т. Гусева, Н.Б. Демкина, Ю.Н. Дроздова, И.В. Крагельского, З.М. Левиной, Д.М. Решетова, Э.В. Рыжова, А.П. Соколовского, А.Г. Сулова, Г.Е. Чихладзе, В.В. Шелофаста и др.

Дальнейшее развитие методики расчета получили в работах А.С. Иванова, В.В. Измайлова, М.М. Ермолаева, С.К. Руднева М.Г. Косова. В них сделана попытка решений решать задачу теоретически, учитывая физико-механические свойства контактирующих поверхностей. Решения эти, как правило, ориентированы на небольшие площади контакта, при этом волнистость и макроотклонения в ряде случаев не учитывается или учитывается упрощенно. Для узлов и модулей технологического оборудования характерно наличие большого числа стыков с большой протяженностью.

Объект исследования: модули линейного перемещения на базе рельсовых направляющих и ШВП, используемые в оборудовании, созданные по модульному принципу на примере суппортов (столов) продольного и поперечного перемещения токарного и фрезерного типов оборудования.

Предметом исследования в модулях линейных перемещений являются закономерности возникновения пространственно-контактных деформаций в узлах и их влияния на силовые характеристики изделия на этапе проектирования и сборки.

Цель и задачи исследования. Целью является конструкторско-технологическое обеспечение и повышение точности линейного перемещения оборудования с использованием унифицированных модулей за счет совершенствования методик проектирования, учета пространственно-контактных деформаций контактирующих протяженных деталей.

Для достижения поставленной цели определены следующие задачи:

1) Провести анализ номенклатуры изделий, используемых в модулях линейных перемещений (рельсовые направляющие, каретки, детали ШВП, подшипниковые опоры), их типоразмеров, характеристик точности и нагрузочной способности.

2) Выполнить анализ влияния микро - и макрогеометрии поверхностей деталей на обеспечение точности и силовых характеристик модуля линейных перемещений на базе ШВП и рельсовых направляющих.

3) Выявить влияние пространственно-контактных деформаций возникающие в плоских стыках на исполнительные размеры деталей и сборочных единиц модулей линейных перемещений.

4) Провести экспериментальные исследования пространственно-контактных деформаций плоских стыков модулей линейных перемещений и сравнить со значениями, полученными по существующим зависимостям.

5) Разработать (уточнить) зависимости для расчета пространственно-контактных деформаций для плоского стыка «базовая плита – рельсовая направляющая» длиной от 125 мм до 650 мм.

6) Выявить влияние размеров деталей входящих в модуль линейных перемещений и их допусков, пространственно–контактных деформаций плоских стыков на силовые характеристики модуля линейных перемещений.

7) Разработать рекомендации для инженерных расчетов номинальных значений и допустимых предельных отклонений на размеры, определяющие точность и силовые характеристики модулей линейных перемещений.

Научная новизна работы

1. Получены зависимости для определения величин пространственно-контактных деформаций в плоских стыках модуля линейных перемещений с учетом масштабного фактора для рельсовых направляющих длиной от 125 мм до 650 мм (п. 1, 3 и 4 паспорта научной специальности 2.5.5).

2. Установлена взаимосвязь и вид связи между допуском замыкающего звена модуля линейного перемещения и дополнительным моментом холостого хода возникающего в ШВП и точностью позиционирования (п. 3 паспорта научной специальности 2.5.5).

3. Предложены зависимости для расчета допустимого значения допуска замыкающего звена по требуемым силовым и точностным характеристикам (п. 1,3 и 4 паспорта научной специальности 2.5.5).

Теоретическая значимость работы. Установлено влияние пространственно-контактных деформаций деталей модуля линейных перемещений на базе унифицированных модулей на их точность и силовые характеристики, получены уточненные зависимости для оценки таких деформаций и их влияния на силовые характеристики модулей линейных перемещений. Разработан алгоритм для расчета номинальных значений и предельных отклонений размеров, определяющих точность и силовые характеристики модулей линейных перемещений.

Практическая значимость работы заключается: в разработке уточненных методик проектировании модулей линейных перемещений на базе унифицированных модулей учетом пространственно-контактных деформаций стыков; в определении поправочных коэффициентов для зависимостей расчета пространственно-контактных деформаций, в разработке рекомендаций по обеспечению исполнительных размеров, определяющих качество линейных модулей; в разработке методики оценки силовых характеристик модуля линейных перемещений в т.ч. величины дополнительного крутящего момента холостого хода. Практическую ценность представляет также созданный стенд, для исследования влияния параметров деталей линейного модуля на его точность и силовые характеристики.

Методология и методы исследования. Теоретические исследования проводились на базе научных основ технологии машиностроения, теории размерных цепей, теории контактных взаимодействий твердых тел, методик проектирования металлорежущего оборудования. Экспериментальные исследования проводились с использованием современных измерительных средств и металлорежущего оборудования, а также методик, разработанных автором.

Достоверность результатов обеспечена корректностью постановки задач, обоснованием аналитических зависимостей, математического аппарата, корректной постановкой экспериментов, и обработкой их данных и подтверждается качественным и количественным соответствием теоретических исследований с экспериментальными данными, а также практическим применением результатов исследований.

Лично автором выполнен обзор состояния вопроса, определены цель и задачи работы, проведены экспериментальные исследования, обобщены их результаты; сформулированы выводы, подготовлены совместно с научным руководителем результаты для публикации научных статей и тезисов докладов.

Результаты, выносимые на защиту, созданные соискателем:

- математические зависимости и методика оценки влияния пространственно-контактных деформаций на точность и силовые характеристики модуля линейных перемещений на базе ШВП и рельсовых перемещений,
- методики оценки силовых характеристик модуля линейных перемещений, в т.ч. величины дополнительного крутящего момента холостого хода;
- методика определения пространственно-контактных деформаций для плоских стыков на примере модуля линейных перемещений на базе ШВП и математические зависимости для их расчетов;
- алгоритм расчета номинальных значений и предельных допустимых отклонений размеров, определяющих точность и силовые характеристики модулей линейных перемещений на базе ШВП и рельсовых направляющих.

Реализация работы.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований используются при подготовке бакалавров, специалистов и магистров кафедрами «Металлорежущие станки и инструменты», «Технология машиностроения». Разработанный стенд применяется для выполнения лабораторных работ учебного процесса студентов и аспирантов.

В практической деятельности результаты диссертационной работы использованы при проектировании узлов и деталей специальной установки, создаваемой в интересах Росатома, при выполнении х/д НИиОКТР № 1638 с ООО НПО «ГКМП». Рекомендации, предложения на базе результатов диссертации приняты к внедрению при проектировании и изготовлении уникального высокотехнологичного оборудования.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях, семинарах: Международная научно-техническая конференция «Машиностроение и техносфера XXI века». (Севастополь 2018 - 2022 г.), VI Международная научно-практическая конференция, посвященная 90-летию БГТУ. Новые горизонты. (Брянск 2019 г.), Международная научно-техническая конференция «Обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической техники» (Брянск 2020 г.), научный семинар «Перспективные направления развития финишных и виброволновых технологий», посвященный памяти заслуженного деятеля науки и техники РФ, д.т.н., профессора А.П. Бабичева. (Ростов-на-Дону 2021 г.), Сборник научных трудов «Менеджмент качества производственных, социально – экономических и технических систем: развитие и совершенствование» - Брянск: БГТУ, (2022 г).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 17 печатных работ, в том числе 5 в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК и 1 статья в издании, индексируемая в международной базе данных Scopus и Web of Science, получен 1 патент.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из 5 глав, заключения и библиографического списка, 2 приложений. Работа изложена на 141 странице, содержит 45 таблиц, 82 рисунка и список литературы из 95 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи, методы и средства исследования, научная и практическая значимость работы, изложены научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен анализ практики использования модульного принципа проектирования оборудования. Были выявлены характерные широко используемые конструктивные решения, в первую очередь линейные модули на базе ШВП и рельсовых направляющих, для проектирования которых требуется уточнение существующих и разработка новых методик.

Описаны существующие зависимости по определению контактных сближений, возможности учета в них параметров контактирующих поверхностей. Большинство этих зависимостей описывают контакт поверхностей ограниченного размера. Они не учитывают влияние масштабного фактора реальных деталей, дают большие погрешности и требуют корректировки. При этом рекомендаций, методик, алгоритмов для учета пространственно-контактных деформаций при расчете исполнительных размеров и допусков на них практически нет.

Во второй главе изложены методики теоретических и экспериментальных исследований, использованные в работе.

На рисунке 1 предложен алгоритм решения задачи по обеспечению точности модуля линейных перемещений.

Экспериментальные и теоретические исследования выполнялись для реальных серийно выпускаемых деталей, используемых при создании технологического оборудования, в том числе металлорежущих станков. Для этого был спроектирован и изготовлен специальный стенд с использованием серийных модулей (рельсов, кареток, ШВП) (рисунок 2а). Конструкция стенда является одним из типовых решений, используемых на практике.

Для измерения пространственно-контактных деформаций на стенде в отдельных стыках использовались индикаторы различной точности и динамометрический ключ, поверочные плиты, линейки, мостики.

Для определения пространственно-контактных деформаций по теоретическим зависимостям были определены параметры качества деталей входящие в модуль линейного перемещения.

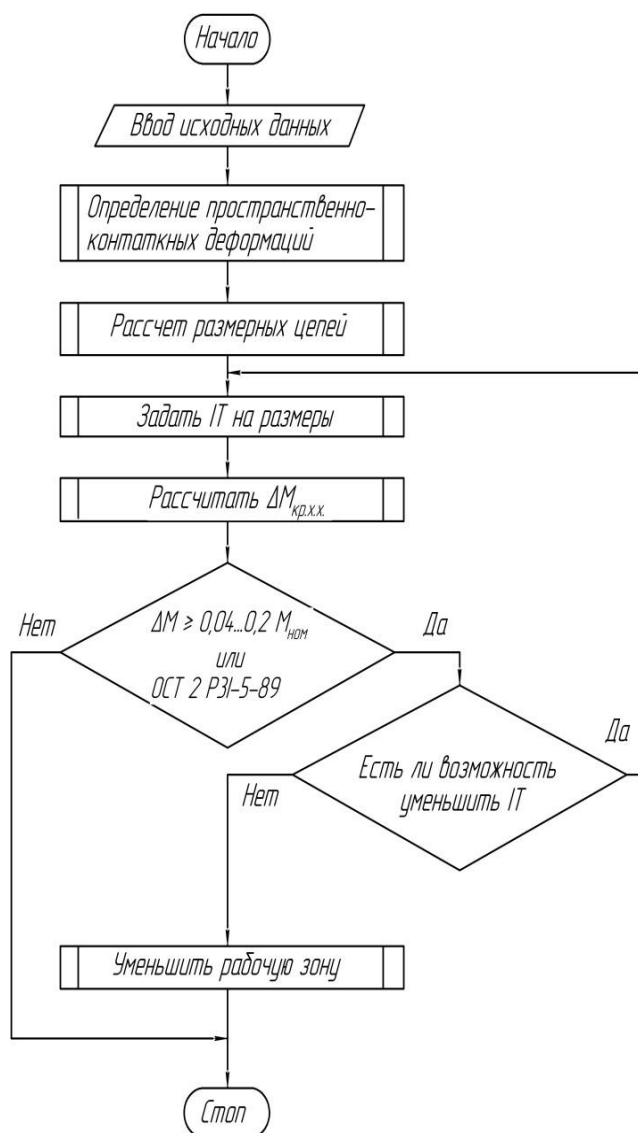


Рисунок 1 – Алгоритм решения задачи по обеспечению точности модуля линейных перемещений

В ходе решения размерных цепей был проведен анализ влияния погрешности замыкающего звена ω на точность и силовые характеристики модуля линейного перемещения, разработаны расчетные схемы, а также получены зависимости для расчета дополнительных усилий трения в гайке ШВП и дополнительного крутящего момента холостого хода.

Наличие погрешности замыкающего звена размерной цепи ω приводит к дополнительным усилиям и, соответственно, к дополнительным потерям на трение. Эти потери возникают из-за радиальных сил, связанных с прогибом винта ШВП. При этом эти силы передаются на гайку ШВП, на подшипниковые опоры.

Для типовой линейной координаты из его размеров, схемы сборки деталей образуется расчетная схема (рисунок 2б), решение которой позволяет определить номинальные размеры деталей, которые определяют точность конструкции ее силовые характеристики.

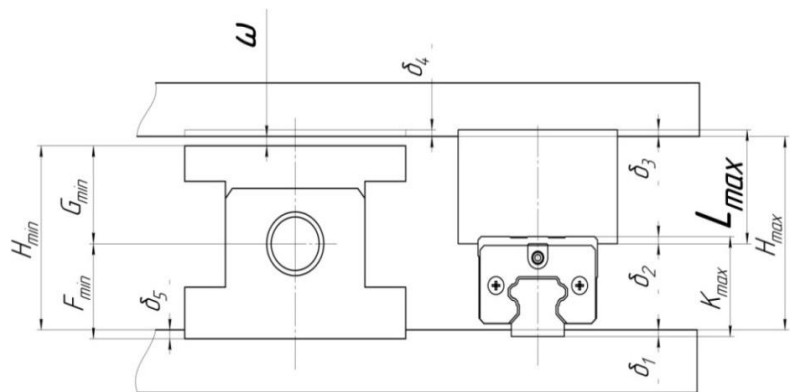
Погрешность сборки, влияющая на точность и силовые характеристики модуля линейных перемещений, возникает из-за наличия допусков на размеры отдельных деталей, а также пространственно-контактных деформаций в стыках.

В результате возникает размерная цепь (рисунок 3) замыкающее звено ω , которое является зазором (натягом) изгибающим винт ШВП.

Размер и допуск изготавливаемой детали L зависит от величин пространственно контактных деформаций. В ходе решение размерной цепи можно задать допуски на необходимые размеры.



а)



б)

Рисунок 2—Стенд для проведения исследований

а) Общий вид модуля линейных перемещений; б) Расчетная схема: G , F , K — номинальные размеры модулей, L - размер изготавливаемой детали; δ_1 , δ_2 , δ_3 , δ_4 , δ_5 — пространственно-контактных деформаций, ω - погрешность замыкающего звена (величина зазора или натяга)

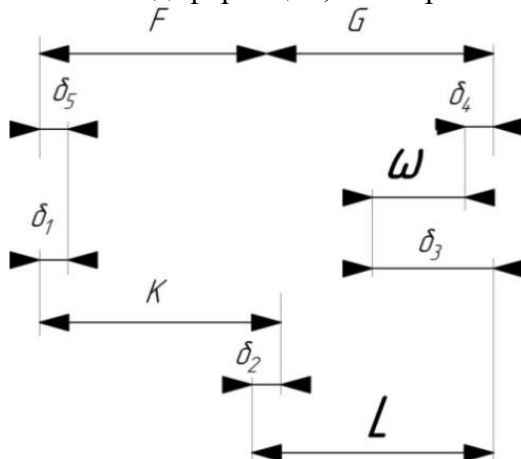
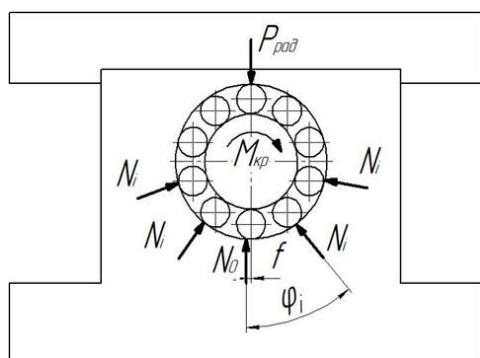


Рисунок 3- Размерная цепь, образованная из стенда модуля линейных перемещений.



Общий дополнительный крутящий момент холостого хода будет равен сумме моментов возникающей в гайке ШВП и подшипниковой опоре.

На стенде производились измерения отдельных составляющих размерной цепи, в том числе: величина прогиба винта ШВП, возникающего из-за погрешностей деталей и сборки, пространственно-контактные деформаций различных контактирующих деталей (рельс - базовая плита, проставка - верхняя плита и др.), параметры, характеризующие макрогеометрию деталей и их волнистость.

Задавшись мощностью двигателя привода, можно определить допустимой для данного привода крутящий момент холостого хода. После рассчитываем допуски на размеры, входящие в размерную цепь. Непосредственный расчет вызывает сложности, поэтому его целесообразно проводить итерационным путем, последовательно вычисляя погрешность замыкающего звена ω , до получения его значения, обеспечивающего выполнение неравенства (3) или значениями описанные в ОСТ 2 Р31 -5 -89.

Для оценки точности перемещения строится линия прогиба для определения возможных деформаций на винте. Графически определяется, какое максимально возможное растяжение на винте происходит на величине в один шаг. Данная величина будет являться погрешностью перемещения на один оборот.

В третьей главе приведены результаты теоретических исследований. Изложены предложенный порядок расчета основных размеров и их допусков.

Теоретические исследования выполнялись на базе положений механики, знаний в области контактного взаимодействия деталей машин, теории и практики расчета размерных цепей, положений технологии машиностроения по обеспечению точности формы, размеров, взаимного расположения поверхностей. При обработке результатов экспериментов использовался аппарат теории вероятностей и математической статистики.

В качестве первого приближения для расчета пространственно-контактных деформаций плоских стыков модуля линейного перемещения были использованы две, наиболее широко используемые зависимости, полученные проф. Решетовым Д.М. (1) и Ивановым А.С. (2).

$$\delta = C\sigma^m \quad (1) \quad \frac{\delta}{Ra} = C_0 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{E}} \quad (2)$$

где: σ – среднее давление в стыке; C - коэффициент, зависящий от типа обработки и косвенно учитывающий качество поверхности, Ra – средние арифметические высоты микронеровностей контактирующих поверхностей деталей, E – приведенный модуль упругости контактирующих поверхностей деталей, C_0 – коэффициент, учитывающий взаимное расположение микронеровностей, $\varepsilon = f(\Delta - W_{\max})$ – коэффициент влияния масштаба, зависящий от допуска плоскостности Δ и размером контактной поверхности, а также наибольшей высотой волны $W_{\max}$.

В работе определены основные зависимости по определению размерных цепей. Номинальное значение высоты компенсирующей проставки L (или

иного размера) размерной цепи определяем с учетом рассчитанных пространственно-контактных деформаций для всех стыков при условии равенства замыкающего звена нулю $\omega=0$.

Допуски на размеры, входящие в размерную цепь назначаются с учетом возможности обеспечения требуемых силовых характеристик привода. В качестве критерия, примем известные требования к соотношению крутящего момента двигателя и момента холостого хода ШВП модуля:

$$M_{кр. х.х.} \leq (10 - 20) \% M_{кр. эд.} \quad (3)$$

Альтернативой служит ОСТ 2 РЗІ – 5 – 89, где описаны максимальные и минимальные значения момента холостого хода ШВП для разных типоразмеров винтов.

Величина крутящего момента холостого хода определяется потерями на трение в модуле. Наличие погрешности замыкающего звена размерной цепи ω приводит к дополнительным усилиям и, соответственно, к дополнительным потерям на трение. Эти потери возникают из-за радиальных сил, связанных с прогибом винта ШВП. При этом эти силы передаются на гайку ШВП, на подшипниковые опоры.

Например, радиальную силу, возникающую в консольной схеме, заменяемой балкой с жесткой заделкой, можно определить по зависимости (4). Дополнительный момент холостого хода для этой схемы, с учетом уравнение равновесия внутреннего кольца гайки ШВП (рисунок 4) нагруженного радиальной силой P определяется по зависимости (5):

где: E – модуль упругости материала, Па; I – момент инерции вала, мм^4 ; l – длина консоли (расстояние от заделки до точки приложения силы), мм; P – радиальная сила, кгс (Н); f – коэффициент трения качения, D_w – диаметр шарика в подшипнике, d_m – диаметр окружности, проходящий по центрам тел качения, z – число рабочих витков гайки ШВП, n – число тел вращения, находящихся в контакте.

При определении силовых характеристик для других схем закрепления, радиальная сила будет зависеть от схемы закрепления, и зависимость по определению дополнительного момента холостого хода, также будет изменяться. При решении по зависимости (5) необходимо не забывать о числе рабочих витков гайки z , которая была введена в зависимость.

Общий дополнительный крутящий момент холостого хода будет определяться по зависимости (6):

$$(6)$$

Таким образом, зная погрешность замыкающего звена ω размерной цепи можно рассчитать соответствующий дополнительный крутящий момент холостого хода на винте ШВП.

Для оценки точности перемещения по существующим зависимостям определяем линию прогиба винта. После строится график изгиба и определяется по схеме погрешность позиционирования стола по зависимости (7):

$$\Delta_{\text{поз}} = l' - l \quad (7)$$

где: l – шаг гайки за один оборот без действия радиальной силы и дополнительного крутящего момента, мм; l' – шаг гайки за один оборот под действием радиальной силы и дополнительного крутящего момента.

В четвертой главе изложены результаты экспериментальных исследований. С использованием созданного стенда были выполнены измерения пространственно-контактных деформаций для всех плоских стыков модулей линейных перемещений. Для каждой детали входящей в плоский стык была выполнена комплексная оценка параметров микро - и макрогеометрии сопрягаемых поверхностей. Были измерены шероховатость, волнистость и макроотклонения поверхностей, а также распределение микротвердости вблизи поверхности.

На рисунке 4 представлены результаты измерения пространственно-контактных деформаций в плоском стыке «базовая плита – направляющий рельс» для направляющей длиной 650 мм, для разных видов обработки плиты. Величины деформаций после фрезерования больше в 1,3 – 2 раза, чем после шлифования и достигают величины половины допуска на размер.

Измерения показали, что имеющиеся изначально отклонения на базовой плите повторяются и на закрепленном рельсе.

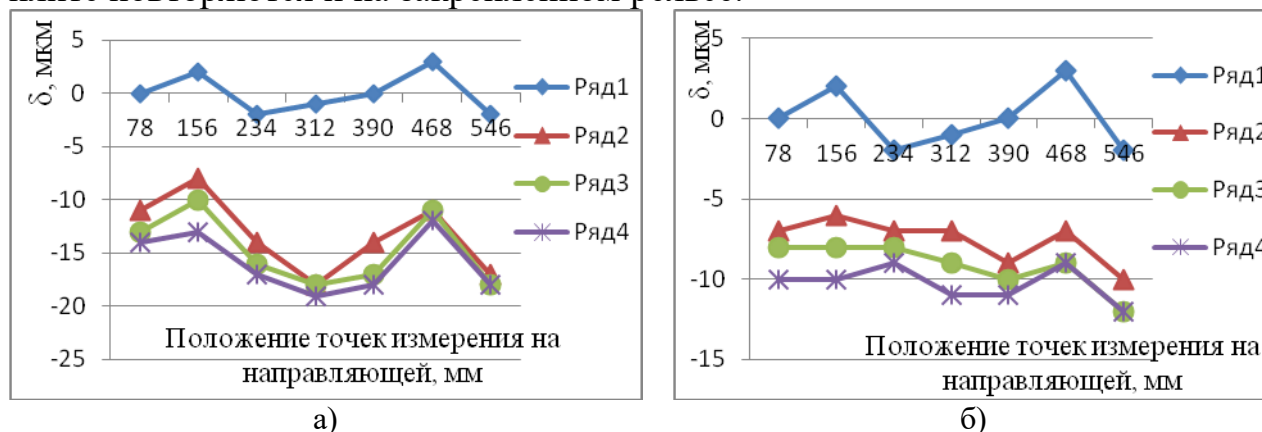


Рисунок 4 – Пространственно-контактные деформации стыка «рельс – базовая плита» при воздействии нагрузки: а) базовая плита после фрезерования; б) базовая плита после шлифования. 1 – форма рельса в измеряемых сечениях без нагрузки; 2 – пространственно-контактные деформации после первого нагружения; 3 – пространственно-контактные деформации после второго нагружения; 4 – пространственно-контактные деформации после третьего нагружения.

Аналогичные измерения пространственно-контактных деформаций были проведены для рельсовых направляющих длиной 125, 250, 315, 400, 470, 650 мм.

Анализ результатов показал, что пространственно-контактные деформации, измеренные на стенде, существенно отличаются от результатов, полученных расчетами по зависимостям (1) и (2). Для использования на практике эти зависимости должны быть уточнены.

В пятой главе приведен анализ сопоставления результатов вычислений контактных деформаций по теоретическим и экспериментальным зависимостям, полученные коэффициенты для корректировки теоретических

расчетов. Также представлены эмпирические зависимости для инженерных расчетов и некоторые примеры практической реализации результатов диссертационного исследования.

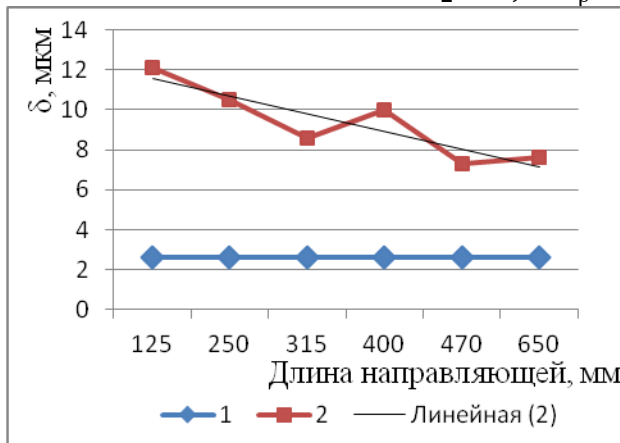
Результаты сравнения пространственно-контактных деформаций, полученные расчетом и в ходе эксперимента, представлены на рисунке 5.

Сравнение показывает, что теоретические зависимости имеют существенную погрешность. При этом зависимость (2) более точно отражает характер измерения деформаций в зависимости от длины направляющей. Сопоставление расчета и экспериментов позволили получить поправочные коэффициенты для использованных зависимостей. Коэффициенты позволяют учесть размеры контактирующих поверхностей.

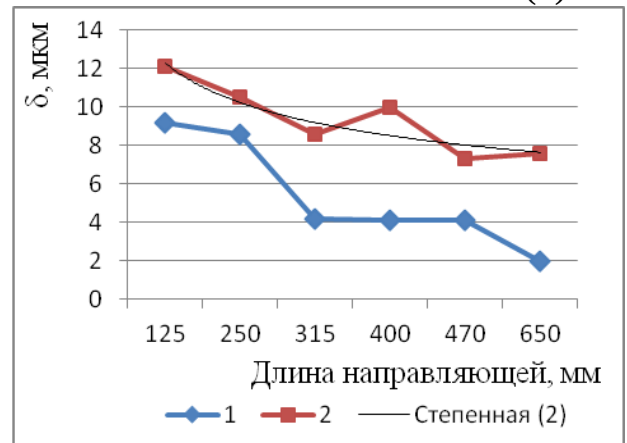
На основе аппроксимации графиков, таблиц были получены зависимости (8) и (9) поправочных коэффициентов для обеих зависимостей (1) и (2):

$$\delta = k_1 C \sigma^m \Rightarrow k_1 = 4,7 l_p^{-0,265} \Rightarrow \delta = 4,7 l_p^{-0,265} C \sigma^m \quad (8)$$

$$\frac{\delta}{Ra} = k_2 \cdot C_0 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{E}} \Rightarrow k_2 = 1,12 l_p^{0,5} \Rightarrow \frac{\delta}{Ra} = 1,12 l_p^{0,5} \cdot C_0 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{E}} \quad (9)$$



а)



б)

Рисунок 5 – Графики пространственно-контактных деформаций полученные:

а) δ – по зависимости (1); 2 – в результате эксперимента;

б) δ – по зависимости (2); 2 – в результате эксперимента

Табулированные результаты экспериментов дополнительно были использованы для получения эмпирических инженерных зависимостей. Обработка была выполнена с помощью таблиц MS Excel. Были использованы два варианта аппроксимации: линейной и степенной зависимостями. Результаты аппроксимации показаны на рисунке 5.

Математическая зависимость, описывающая экспериментальные значения линейным (12) и степенным (13) законом выглядит следующим образом:

$$\delta = -0,008 \cdot l_p + 12,34 \quad (12)$$

$$\delta = 49,7 \cdot l_p^{-0,29} \quad (13)$$

Эмпирические модели в области аппроксимации имеют хорошую точность и могут быть использованы в инженерной практике. Из рисунка 5 видно, что степенная зависимость несколько точнее и ее применение предпочтительнее.

При расчете размерных цепей без учета пространственно-контактных деформаций точность вычислений снижается на 10-15%. Это приемлемо для модулей линейных перемещений невысокой точности (транспортные системы, учебно-макетное оборудование).

Для оценки дополнительного крутящего момента холостого хода были произведены расчеты применительно к типоразмерам изделий экспериментального стенда для консольной схемы установки винта ШВП в подшипниках. Погрешность замыкающего звена ω рассчитана для наиболее неудачного распределения допусков на размеры цепи: минимальные значения размеров F, G, (допуски заданы производителем) и максимальные значения K (допуск задан производителем), L (допуск по 7-му качеству точности). Эта погрешность создает дополнительные усилия на тела качения гайки ШВП и подшипниковых опор, они в свою очередь дают дополнительный крутящий момент.

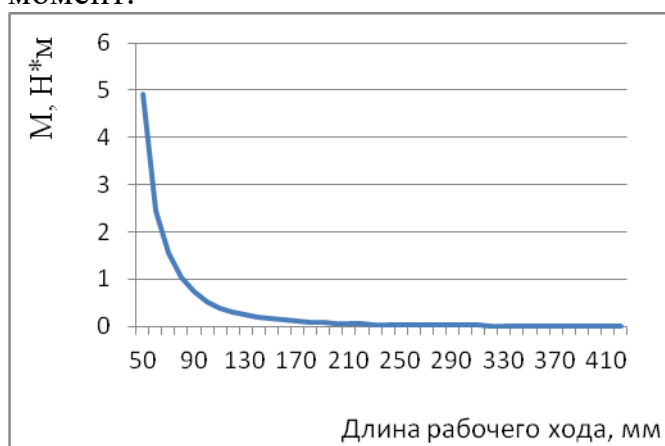


Рисунок 6– График дополнительного момента холостого хода возникающего при консольной схеме подшипниковых опор винта ШВП

График изменения дополнительного крутящего момента холостого хода в зависимости от расположения гайки в пределах рабочей зоны модуля показан на рисунке 6. Из графика видно, что этот крутящий момент резко возрастает при приближении гайки ШВП к подшипниковой опоре. Экспериментальная проверка показала, что точность расчетов по данной методике достаточна для инженерной практики.

Исследования показали, что при неблагоприятном положении рабочего органа крутящий момент холостого хода становится сопоставимым с крутящим моментом двигателя стенда, что требует либо ужесточения допусков на детали, либо на уменьшение величины рабочей зоны установки.

Для полученной погрешности замыкающего звена ω была определена погрешность перемещений гайки на оборот. Графически оценена погрешность перемещения на оборот, построением линии изгиба всего винта. Полученное значение сравнивается с рекомендациями производителей. При несоблюдении требований необходимо уменьшить возникающие силовые характеристики из-за погрешности ω или понизить точность конструкции.

Критерием оценки работоспособности оборудования в описанных методиках является дополнительный момент холостого хода. Производители модульных конструкций не дают рекомендаций по его величине. Его можно определить по отношению (3), если известен уже двигатель, или же задаться допустимыми величинами по ОСТ 2 РЗІ-5-89.

Разработанные алгоритм и зависимости можно использовать в качестве рекомендаций при проектировании продольных и поперечных осей токарных и фрезерных станков высокой точности.

Заключение

Работа содержит комплекс конструкторско-технологических решений, направленных на повышение точности технологического оборудования (модули линейных перемещений) на базе унифицированных модулей.

Получены следующие основные выводы, научные и практические результаты:

1. Проведен анализ номенклатуры изделий, используемых в модулях линейных перемещений (рельсовые направляющие, каретки, детали ШВП, подшипниковые опоры), их типоразмеров, характеристик точности и нагрузочной способности. Установлено, что размеры, параметры микро - и макрогеометрии поверхностей деталей оказывают влияние и должны учитываться при определении пространственно - контактных деформаций.

2. Установлено, что в стыке «базовая плита – рельсовая направляющая» рельс повторяет макроотклонения базовой плиты. Это необходимо учитывать при назначении требований на плоскостность деталей.

3. Определено, что пространственно-контактные деформации в плоских стыках достигают величины, сопоставимой с допуском на размер. При решении размерных цепей для определения размеров и допусков данной величиной нельзя пренебрегать.

4. Сравнение результатов расчетов и экспериментов по исследованию пространственно-контактных деформаций показало, что существующие зависимости могут давать значительную погрешность (в 1,5 ... 4 раза).

5. Разработаны зависимости для определения величин пространственно-контактных деформаций в плоских стыках модуля линейных перемещений для конструкторско-технологического обеспечения точности модуля линейных перемещений для рельсовых направляющих длиной от 125 мм до 650 мм. Также уточнены существующие зависимости по расчету пространственно-контактных деформаций. Определены поправочные коэффициенты для определения этих величин для рельсовых направляющих длиной от 125 мм до 650 мм.

6. Замыкающее звено размерной цепи ω (зазор/натяг) стыка «корпус гайки ШВП – стол» определяет деформации винта ШВП, радиальную силу, дополнительный крутящий момент холостого хода, а также точность позиционирования.

7. Предложены зависимости для расчета допустимого значения допуска замыкающего звена по требуемым силовым и точностным характеристикам.

8. Разработаны и предложены зависимости, алгоритм для инженерных расчетов номинальных значений и допустимых предельных отклонений на них для размеров деталей модулей линейных перемещений, определяющие

точность позиционирования, силовые характеристики которые применимы на практике.

Экономическая эффективность

Результаты диссертационной работы нашли применение и использованы при изготовлении опытно-промышленного образца полноразмерной установки для реализации аддитивно-субтрактивно-упрочняющей технологии, при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторско-технологических работ (НИОКТР), реализованных в интересах следующих заказчиков: Фонд перспективных исследований (ФПИ), период выполнения 2016-2020 г.г., объем свыше 135 млн.руб.; ПАО «Татнефть», х/д НИР №0335/22/44 период выполнения 2021-2022 г.г., объем 2 млн.руб.; ОАО «Совтест», х/д №69/22-ДЗ период выполнения с 2022 г. по настоящее время, объем 1,152 млн.руб.

В практической деятельности результаты диссертационной работы использованы при проектировании узлов и деталей специальной установки, интересах Росатома, при выполнении х/д НИиОКТР № 1638 с ООО НПО «ГКМП» экономический эффект составил свыше 1,5 млн. рублей.

Перспективы продолжения исследований по направлениям диссертационной работы и практического использования её результатов.

На последующих этапах исследования предполагается проведение работ, расширяющих возможности прикладного использования результатов диссертации включающих:

- выполнение более широких исследований для разных конструкций модулей линейных перемещений;
- выполнение исследований для определения пространственно-контактных деформаций, для деталей и узлов длиной свыше 650 мм.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах

Публикации в изданиях перечне ВАК:

1. **Федуков А.Г.** Обеспечение точности станочных узлов на базе унифицированных модулей с учетом контактной жесткости стыков /**Федуков А.Г., Хандожко А.В., Польский Е.А., Щербаков А.Н.**// Вестник Брянского государственного технического университета. – 2019. – № 3 (76). С. 51-59. DOI: 10.30987/article_5c3db11190a975.91435272

2. **Федуков А.Г.** Влияние контактной жесткости на точность шарико-винтовой пары привода на базе унифицированных модулей/ **Федуков А.Г., Хандожко А.В.** // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2020. – Т. 16. № 1. – С. 149-157. DOI: 10.25987/VSTU.2020.16.1.019.

3. **Федуков А.Г.** Конструкторско-технологическое обеспечение качества линейных координат станочного оборудования на базе шарико-винтовой пары и

направляющих качения/ **Федуков А.Г.** // Научные технологии в машиностроении. – 2020. – № 10 (112). – С. 16-21. DOI: 10.30987/2223-4608-2020-10-16-21.

4. **Федуков А.Г.** Метод проектирования модулей линейных перемещений на базе унифицированных модулей/ **Федуков А.Г.** // Транспортное машиностроение. – 2022. – № 12 (12). – С. 26-35. DOI: 10.30987/2782-5957-2022-12-26-35.

5. **Федуков А.Г.** Анализ контактного сближения в плоских стыках специального оборудования при использовании унифицированных модулей/ **Федуков А.Г.** // Транспортное машиностроение. – 2023. – № 1 (13). – С. 4-13. <https://doi.org/10.30987/2782-5957-2023-1-4-13>.

Публикации в изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science:

1. **Fedukov A.G.** Khandozhko A.V. Technological Quality Assurance of Assembling Machine Components Based on Modular Elements, Taking into Account the Contact Stiffness of the Joints/ /International Conference on Aviaemechanical Engineering and Transport (AviaENT 2019) pp. 109-116. <https://doi.org/10.2991/aviaent-19.2019.21>

Публикации в материалах конференций:

1. Федонин О.Н. Факторы, влияющие на обеспечение точности при изготовлении специального оборудования с использованием унифицированных модулей/ Федонин О.Н., Хандожко А.В., Польский Е.А., Щербаков А.Н., Захаров Л.А., **Федуков А.Г.**// В сборнике: Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XXV международной научно-технической конференции. – Севастополь. 2018. С. – 172-176.

2. **Федуков А.Г.** Анализ размерных цепей с учетом контактной жесткости стыков для линейных передач/ **Федуков А.Г.**, Хандожко А.В. // В сборнике: Электрофизические методы обработки в современной промышленности. Материалы II Международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. – Пермь, ПНИПУ, 2019. С. – 114-117.

3. **Федуков А.Г.** Исследование контактной жесткости узлов оборудования на базе унифицированных модулей/ **Федуков А.Г.**, Хандожко А.В. // В сборнике: Новые горизонты. Материалы VI Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию БГТУ. – Брянск. БГТУ, 2019. С. – 126-130.

4. **Федуков А.Г.** Факторы, влияющие на точность шариковинтовой пары привода на базе унифицированных модулей/ **Федуков А.Г.**, Хандожко А.В., Польский Е.А. // В сборнике: Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XXVI международной научно-технической конференции. – Севастополь. ДОННТУ 2019. – С. 406.

5. **Федуков А.Г.** Анализ существующих методов расчета контактной жесткости на примере рельсовых направляющих/ **Федуков А.Г.**// В сборнике: Обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической техники. Материалы Международной научно-технической конференции. Брянский государственный технический университет. – Брянск. БГТУ, 2020. – С. 110-114.

6. **Федуков А.Г.** Влияние момента затяжки винтов на контактное сближение плоского стыка в технологическом оборудовании на базе унифицированных модулей/ **Федуков А.Г.**, Хандожко А.В., Польский Е.А.//В сборнике: Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XXVII международной научно-технической

конференции. Посвящается 100-летию юбилею ДОННТУ. – Донецк, ДОННТУ, 2020. – С. 386-389.

7. **Федуков А.Г.** Метод оценки качества линейной координаты на базе шарико-винтовой пары и линейных направляющих с учетом контактных деформаций /**Федуков А.Г.**// В сборнике: Электрофизические методы обработки в современной промышленности. Материалы IV Международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. – Пермь, ПНИПУ, 2021. С. – 62-67.

8. **Федуков А.Г.** Влияние контактных деформаций в плоских стыках на дополнительные усилия трения в специальном оборудовании на базе шариковинтовой пары/ **Федуков А.Г.**, Хандожко А.В., // В сборнике: Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XXVII международной научно-технической конференции. Посвящается 100-летию юбилею ДОННТУ. – Донецк, ДОННТУ, 2021. – С. 553-556.

9. **Федуков А.Г.** Анализ контактного сближения образующегося в плоских стыках специального оборудования при использовании унифицированных модулей/ **Федуков А.Г.** // Перспективные направления развития финишных и виброволновых технологий: сборник трудов научного семинара технологов-машиностроителей / под ред. В.А. Лебедева; Донской государственный технический университет. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2021. – 531 с.

10. **Федуков А.Г.** Метод решения сложных размерных цепей с учетом контактных деформаций на примере линейных передач/ **Федуков А.Г.**, Хандожко А.В.// В сборнике: Менеджмент качества производственных, социально-экономических и технических систем: развитие и совершенствование. Сборник научных трудов. – Брянск, БГТУ, 2022. – С. 117-120.

11. **Федуков А.Г.** Вопросы конструкторско-технологического обеспечения качества линейных координат технологического оборудования на базе унифицированных модулей / **Федуков А.Г.** // В сборнике: Технологическое обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической отрасли. Сборник научных статей 14-ой международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию Брянской научной школы технологов-машиностроителей. – Брянск, БГТУ, 2022. – С. 71-75.

Патент:

1. Патент №2792593 Российская Федерация, МПК G01B 7/00 Способ расчета снижения радиальной осевой силы в устройстве линейных перемещений на базе шарико-винтовой пары (ШВП): № 2021126347 заявл. от 07.09.2021; опубл. 22.03.2023/ **Федуков А.Г.**; заявитель БГТУ.

Подписано в печать 15.02.2024. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Офсетная
печать. Печ. л. 1. Тираж 120 экз. Заказ № _____. Бесплатно

Брянский государственный технический университет
241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7
Лаборатория оперативной печати БГТУ, ул. Институтская, 16