

На правах рукописи

Л.С.Свистун —

ХВАЩЕВСКАЯ Любовь Фёдоровна

**ПОВЫШЕНИЕ СОБИРАЕМОСТИ ИЗДЕЛИЙ
МАШИНОСТРОЕНИЯ НА ОСНОВЕ КОНФИГУРАЦИОННОЙ
МОДЕЛИ РАЗМЕРНОЙ ЦЕПИ**

Специальность 2.5.6. Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Иркутск - 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном
учреждении высшего образования
«Иркутский национальный исследовательский технический университет»

- Научный руководитель:** **Журавлёв Диомид Алексеевич**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический университет»,
профессор кафедры технологии и оборудования
машиностроительных производств
- Официальные оппоненты:** **Березин Сергей Яковлевич**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный
университет»,
профессор кафедры технических систем
и робототехники (г. Чита)
- Масягин Василий Борисович**
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Омский государственный технический
университет»,
профессор кафедры технологии машиностроения
(г. Омск)
- Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный
авиационный технический университет имени П.А.
Соловьёва» (г. Рыбинск)

Защита состоится «22» декабря 2022 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.307.01 при ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83, корпус «К», конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» и на сайте www.istu.edu.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах (заверенные печатью учреждения) просим присылать по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», учёному секретарю диссертационного совета 24.2.307.01 Вулых Н.В.: e-mail: vulix2011@yandex.ru, тел./факс: (3952) 40-51-17

Автореферат разослан «17» октября 2022 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.307.01,
кандидат технических наук, доцент

Н.В. Вулых

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Машиностроение является ведущей отраслью государства, которая определяет возможность развития других отраслей. Именно машиностроительное производство способствует повышению благосостояния общества, резко увеличивает производительность труда, повышает качество продукции, обеспечивает обороноспособность государства.

Одна из ключевых проблем, стоящих перед современным машиностроением – создание сложных, конкурентоспособных машин в заданные сроки при минимальных расходах и с требуемым качеством.

Стратегии развития промышленности РФ на период до 2025 года предполагают импортозамещение, рост экспорта продукции, а также выведение на международный рынок новой продукции, соответствующей мировому уровню качества.

Показатели качества изделий машиностроения формируются при проектировании и проявляют себя на протяжении всего жизненного цикла изделия (ЖЦИ): в процессе изготовления, сборки и при эксплуатации. Анализ современного состояния проблемы качества в машиностроительном производстве показывает, что 90% от всех отказов изделий происходит по причине их некачественной сборки, а 85% производственных затрат определяется на стадии проектирования. Уровень автоматизации сборки не превышает 8%.

Существующие в настоящее время организация и применяемые методы проектирования и разработки новых изделий не соответствуют требованиям скоростного создания высокотехнологичных конструкций. Современные условия требуют перехода к скоростным высокоэкономичным методам создания изделий и проектированию их технологических характеристик.

Четвёртая индустриальная революция («Индустрия 4.0») ставит перед машиностроительной промышленностью грандиозные задачи, решение которых потребует, прежде всего, автоматизации производства, то есть грядёт значительная трансформация сборочного производства.

Основным направлением технического прогресса современного сборочного производства являются интегрированные производственные комплексы, позволяющие комплексно решать задачи производства, начиная от проектирования изделий, технологии, оборудования и оснастки с использованием соответствующих систем автоматизированного проектирования, управления технологическими процессами сборки через АСУТП и до управления производством в целом посредством автоматизированных систем управления.

Таким образом, повышение научно-технического уровня сборочного производства и качества изделий машиностроения в соответствии с современными новыми требованиями, предъявляемыми к точности и надёжности изделий – важнейшая государственная задача. Необходимым условием повышения эффективности сборки и качества выпускаемых изделий машиностроения является разработка научно-обоснованных технологий, позволяющих совершенствовать существующие и создавать новые методы проектирования и сборки изделий требуемого качества с минимальными затратами труда. Проблема правильного

назначения допусков на основные геометрические характеристики деталей и их элементов становится особенно актуальной. Размерный анализ сборки с учётом пространственных допустимых отклонений элементов деталей, входящих в изделие, а также математические инструменты для его проведения, создающие общую платформу для взаимодействия инженера-конструктора и инженера-технолога, – ключевые элементы в решении проблемы обеспечения собираемости, а, следовательно, качества и конкурентоспособности изделий машиностроения.

Степень разработанности

Проблемам точности и изучению сборочных размерных связей посвящены работы многих исследователей: Дунаева П.Ф., Карепина П.А., Балакшина Б.С., Корсакова В.С., Исаева С.В., Непомелуева В.В., Задориной Н.А., Безъязычного В.Ф., Замятина В.К., Базрова Б.М., Богоцкого М.Е., Губаря В.А., Демина Ф.И., Косова М.Г., Кузьмина В.В., Маврикиди Ф.И., Березина С.Я., Молчанова В.В., Замятина А.В., Масыгина В.Б., Шамина В.Ю., Гусевой Р.И., Шустера В.Г., Ильицкого В.Б., Филькина Д.М., Расторгуева Г.А., Скворцова А.В., Журавлёва Д.А., Шабалина А.Н., Гаера М.А., Яценко О.В., Калашникова А.С., Whitney D.E., Chase K.W., Ghie W., Laperriere L., Desrochers A., Polini W. и многих др.

Анализ многочисленных исследований показал, что на сегодняшний день проблема анализа пространственных размерных связей в изделиях с учётом допусков является недостаточно изученной. Существующие математические инструменты для анализа пространственных размерных связей в сборочных единицах не позволяют учитывать пространственные допустимые отклонения геометрических элементов изделия на ранних стадиях проектирования и управлять точностью ключевых геометрических характеристик компонентов на протяжении всего ЖЦИ.

Можно выделить несколько основных проблем пространственного анализа: математические модели и методы, а также технологии анализа, учитывающие современные требования к проектированию и изготовлению изделий.

Цель работы и задачи исследования: разработка технологии анализа пространственных размерных связей в изделиях машиностроения с учётом допусков на основе конфигурационной модели размерной цепи изделия (КРЦ) для повышения собираемости.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. проанализировать погрешности, возникающие при сборке изделий машиностроения, и установить их взаимосвязь;
2. разработать необходимые (аналитические) условия для обеспечения выполнения следующих технических требований к расположению геометрических элементов изделий в трёхмерном пространстве: перпендикулярность линии (оси) относительно комплекта баз; перпендикулярность линии (оси) относительно базовой плоскости; параллельность плоскости относительно базовой плоскости; точность угла между плоскостями; точность позиции точки относительно комплекта баз; точность позиции линии относительно комплекта баз; соосность оси относительно базовой оси.

3. разработать математическую модель конфигурационной размерной цепи изделия и формулы для её расчёта;

4. разработать интегральную оценку точности расположения критического геометрического элемента изделия на основе КРЦ;

5. разработать технологию анализа пространственных размерных связей в изделиях машиностроения с учётом допусков на основе КРЦ для повышения собираемости;

6. провести практическую реализацию разработанной технологии пространственного анализа размерных связей в сборочных единицах с учётом допусков на основе КРЦ.

Область исследования соответствует специальности 2.5.6.

Объект исследования: сборка изделий машиностроения.

Предмет исследования: пространственные размерные связи в изделиях машиностроения с учётом допусков.

Научная новизна исследования

Разработан подход к анализу точности ключевых геометрических характеристик расположения элементов изделий машиностроения в трехмерном пространстве, основанный на использовании конфигурационной модели размерной цепи и бикватернионов.

Теоретическая значимость работы состоит в следующем:

1. дана классификация погрешностей сборки, установлена их взаимосвязь;

2. разработаны необходимые (аналитические) условия точности расположения геометрических элементов изделий в трёхмерном пространстве с учетом технических требований, что обеспечит возможность учета в анализе взаимосвязей размерных и угловых отклонений геометрического элемента изделия.

3. введены понятия конфигурационной размерной цепи изделия, ключевой контрольной точки изделия и с использованием аппарата бикватернионов построена математическая модель КРЦ, а также получены формулы для её расчёта, интегральная оценка точности расположения критического геометрического элемента изделия на основе КРЦ, что позволяет:

- получить более точную количественную оценку точности расположения критического геометрического элемента изделия с учётом пространственных допустимых отклонений в трёхмерном пространстве;
- решать не только задачу анализа пространственных размерных связей в изделиях с учётом допусков, но и задачу синтеза допусков, а, следовательно, и задачу их оптимизации;
- использовать для достижения точности ключевой геометрической характеристики расположения элемента на основе КРЦ метод полной взаимозаменяемости (метод «наихудшего случая») и метод неполной взаимозаменяемости (вероятностный, статистический);
- управлять точностью пространственного расположения критического геометрического элемента изделия на протяжении ЖЦИ;

4. допуск расположения аналитически определён максимальными значениями двух параметров, описывающих точность расположения конечного звена КРЦ, а геометрически он определён двумя векторами: вектором кумулятивных

допустимых ошибок эйлера поворота конечного звена КРЦ и вектором кумулятивных допустимых ошибок перемещения конечной точки КРЦ;

5. теоретически обоснована целесообразность использования различных способов оценки (нелинейной, линеаризованной) угловых отклонений геометрических элементов изделия;

6. теоретически обоснована необходимость учёта коррелированности выходных точностных параметров изделия при прогнозировании доли бракованных сборок. Установлено, что: а) чем ближе абсолютное значение линейного коэффициента корреляции к единице, тем значительнее становится ошибка прогноза; б) при расширении полей рассеивания выходных точностных параметров влияние корреляции на точность прогнозирования доли бракованных сборок снижается.

Практическая значимость работы

Разработанный подход к анализу пространственных размерных связей в изделиях с учётом допусков позволит повысить собираемость изделий машиностроения за счёт:

- повышения точности расположения в трёхмерном пространстве критических геометрических элементов изделия с учетом допусков расположения компонентов, а также повышения качества сборки, обусловленных комплексным учётом в анализе на основе КРЦ погрешностей сборки и их взаимосвязей;
- улучшения технологичности изделий, обеспеченного возможностью назначения научно-обоснованных допусков на расположение геометрических элементов изделий, а также возможностью достичь требуемой точности расположения ключевых геометрических элементов изделий в трёхмерном пространстве уже на стадии геометрического проектирования;
- повышения качества проектирования на основе возможности для параллельной разработки мероприятий конструкторско-технологической подготовки и сборки изделий, а также возможности для управления точностью пространственного расположения ключевых геометрических элементов изделия с использованием КРЦ и технологии анализа на протяжении всего ЖЦИ.

Разработанные математические инструменты и технология анализа точности расположения критических элементов с учётом допусков расположения для повышения собираемости изделий машиностроения, а также разработанные рекомендации могут быть полезны КБ предприятий, занимающихся проектированием изделий, а также в учебном процессе и при написании НКР.

Методы исследования и достоверность результатов

В исследованиях были использованы: математическое моделирование с использованием аппарата бикватернионов, методы технологии машиностроения, теории машин и механизмов, аналитической механики, теории векторного анализа, аналитической геометрии, теории стандартизации и метрологии.

Теоретические исследования, результаты и предложенные подходы были подтверждены аналитическими расчётами, а также публикациями в рецензируемых изданиях.

Положения, выносимые на защиту

1. Погрешности сборки, их классификация и взаимосвязь.
2. Необходимые (аналитические) условия точности расположения геометрических элементов деталей в трёхмерном пространстве для следующих технических требований: перпендикулярность оси относительно комплекта баз; перпендикулярность оси относительно базовой плоскости; параллельность плоскости относительно базовой плоскости; точность угла между плоскостями; точность позиции точки относительно комплекта баз; точность позиции линии относительно комплекта баз; соосность оси относительно базовой оси.
3. Конфигурационная модель размерной цепи изделия и её расчёт.
4. Интегральная оценка точности расположения критических элементов изделия на основе КРЦ.
5. Технология пространственного размерно-точностного анализа изделий машиностроения на основе КРЦ для повышения собираемости.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы были представлены на международных и российских научно-технических конференциях: международная научно-практическая конференция «Тенденции развития науки и образования» (Тамбов, 31 июля, 2015 г.); 1-ая международной научно-практической конференция «Технология машиностроения и материаловедение» (Новокузнецк, апрель, 2017 г.); X международная научно-техническая конференция «Авиамашиностроение и транспорт Сибири» (Иркутск, 21-26 мая, 2018 г.); XII международная научно-техническая конференция «Авиамашиностроение и транспорт Сибири» (Иркутск, 27 мая, 2019 г.); III Международная научная конференция «MIP: Engineering-III-2021: Модернизация, Инновации, Прогресс: Передовые технологии в материаловедении, машиностроении и автоматизации» (Красноярск, 29-30 апреля, 2021 г.); VIII Международная научная конференция «Проблемы механики современных машин» (Улан-Удэ, 4-9 июля, 2022 г.).

Публикации

Результаты диссертационной работы изложены в 14 научных работах, из них 7 публикаций – статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и степень разработанности выбранной темы исследования, сформулированы цели и задачи, отражена теоретическая и практическая значимость работы, научная новизна.

В первой главе изучено современное состояние проблемы обеспечения собираемости изделий машиностроения, выявлены перспективные направления в решении проблемы.

Вариации присущи любой инженерной системе и управление ими – важнейшая часть инженерной деятельности, которая играет основную роль при проектировании, а допуски являются важной частью процесса проектирования и ключом к изготовлению качественного изделия.

Качество изделия определяется, прежде всего, точностью его геометрических параметров, таких как зазоры (натяги), соосность, углы перегиба собираемых деталей, радиальные и торцовые биения и т.п.

Геометрическая точность сборки закладывается конструктором при разработке изделия, и должна обеспечиваться технологиями получения деталей и сборки. Возможные пространственные положения деталей, достигаемые при сопряжении множества поверхностей, должны быть рассчитаны ещё до сборки, то есть на стадии проектирования.

Основной проблемой обеспечения собираемости изделий в трёхмерном пространстве является понимание причин и последствий размерных и геометрических пространственных вариаций, а также проблема полной и точной реализации функциональных требований в процессе его проектирования и изготовления.

Проведённый анализ современного состояния проблемы обеспечения собираемости изделий машиностроения позволил сделать следующие выводы.

1. Обеспечение собираемости изделия – важнейшее направление в решении задач повышения его качества, конкурентоспособности, снижении затрат и повышении производительности труда при его создании.

2. Собираемость изделия обеспечивается точностью его выходных геометрических характеристик ключевых элементов и прежде всего характеристик расположения.

3. Полноценный пространственный размерный анализ сборок с учетом допусков – ключевое условие для достижения высокого качества проектирования и планирования технологических процессов сборки – основ для обеспечения взаимозаменяемости деталей, собираемости и создания высокотехнологичных конструкций с минимальными затратами материальных и энергетических ресурсов.

4. Проблема пространственного размерного анализа изделий с учётом допусков является сложной, недостаточно изученной: на сегодняшний день достижение точности выходных геометрических характеристик сборки проводится с использованием аппарата матриц и методов, разработанных для них. Расчёт конструкторских и технологических размеров, отклонений расположения выполняется раздельно, без учёта взаимного влияния размерных и угловых отклонений.

5. Разработка и совершенствование математических моделей и методов для проведения полноценного размерного анализа изделий с учётом пространственных допустимых отклонений компонентов, ориентированных на современные требования к нормированию точности, – перспективные направления в решении проблемы обеспечения собираемости изделий машиностроения.

6. Целесообразно назначать расширенное допустимое поле рассеивания размера замыкающего звена размерной цепи: $[-k\sigma; k\sigma]$, где $k = 4;6$, ввиду смещений средних значений размеров составляющих звеньев, обусловленных процессом изготовления.

Эти выводы позволили сформулировать цель и определить задачи исследования.

Во второй главе проанализированы современные стандарты нормирования точности геометрических характеристик изделия; разработаны необходимые (аналитические) условия точности расположения элементов изделий в трехмер-

ном пространстве с учётом технических требований, предъявляемым к ним; получена их геометрическая интерпретация.

Возможность обеспечения качественной сборки зависит от многих факторов, основным из которых является точность относительного расположения точек, линий (осей) или плоскостей деталей, входящих в изделие.

Нормирование геометрических характеристик изделий определено рядом современных стандартов: ГОСТ 31254-2004 «Основные нормы взаимозаменяемости. Геометрические элементы. Общие термины и определения»; ГОСТ Р 53089-2008 «Основные нормы взаимозаменяемости. Характеристики изделий геометрические. Установление позиционных допусков»; ГОСТ Р 53442-2015 «Основные нормы взаимозаменяемости. Характеристики изделий геометрические. Допуски формы, ориентации, месторасположения и биения».

Стандарт ГОСТ Р 53442-2015 распространяется на нормирование геометрических характеристик изделий, устанавливает ограничения на изменение геометрических характеристик с точки зрения их формы, месторасположения и ориентации.

Для описания расположения геометрических элементов в трёхмерном пространстве используем следующие параметры: φ_i – величина угла поворота геометрического элемента вокруг i -ой координатной оси; φ_i^0 – величина линейного смещения геометрического элемента вдоль i -ой координатной оси ($i = \overline{1,3}$).

Так, например, рассматривая в качестве геометрической характеристики параллельность верхней плоской поверхности $PBQC$ относительно базовой (нижней) плоской поверхности $KAFD$ для детали типа «блок», показанной на рисунке 1, имеем два параметра: φ_1 и φ_2 – углы поворота вокруг координатных осей Ox и Oy соответственно. Необходимым условием обеспечения параллельности верхней плоской поверхности блока относительно базовой поверхности является следующее условие:

$$a \cdot |\varphi_1| + b \cdot |\varphi_2| \leq \frac{\Delta}{2},$$

где Δ – допустимое отклонение; a – длина PB ; b – длина BQ .

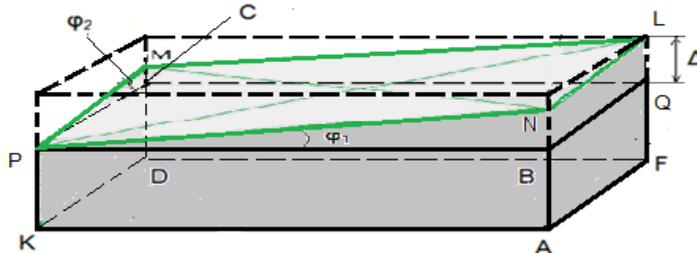


Рисунок 1 – Одно из возможных расположений верхней плоскости детали типа «блок» в зоне допуска параллельности

Рассмотрены девять видов технических требований к расположению геометрических элементов деталей в трёхмерном пространстве для группы ориентации и четыре для группы месторасположения. Для каждого из них определены параметры (точностные), а также получены необходимые (аналитические) условия точности, и дана их геометрическая интерпретация. Для группы ориен-

тации выделено четыре типа параметрических зон: круг, прямоугольник, ромб, отрезок. Для группы месторасположения – три вида зон: сфера, ромб, эллипсоид (табл. 1 и табл. 2).

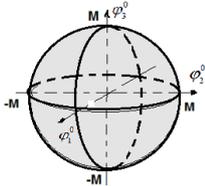
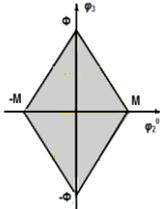
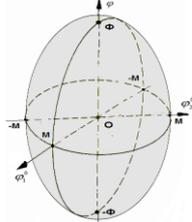
Таблица 1 – Необходимые условия точности ориентации геометрических элементов деталей в трёхмерном пространстве и их геометрическая интерпретация

Название геометрической характеристики	Характер технических требований	Геометрические условия точности	Геометрическая интерпретация
Параллельность, перпендикулярность, наклон	перпендикулярность линии (оси) относительно комплекта баз А и В (А, В – плоскости)	$\begin{cases} \varphi_1 \leq \Phi_1, \\ \varphi_2 \leq \Phi_2, \\ \Phi_i = \frac{\Delta_i}{L} \end{cases}$	
	перпендикулярность линии (оси) относительно базовой плоскости	$\begin{cases} (\varphi_1)^2 + (\varphi_2)^2 \leq \Phi^2, \\ \Phi = \frac{\Delta}{L} \end{cases}$	
	параллельность плоскости относительно базовой плоскости	$a \cdot \varphi_1 + b \cdot \varphi_2 \leq \Delta$	
	точность угла между плоскостями	$\begin{cases} \varphi_1 \leq \Phi, \\ \Phi = \frac{\Delta}{L} \end{cases}$	

В третьей главе дана классификация погрешностей сборки, и установлена их взаимосвязь; введены понятия конфигурационной размерной цепи изделия, ключевой контрольной точки изделия; разработана аналитическая модель КРЦ, а также формулы для её расчёта; разработана интегральная оценка точности ключевой геометрической характеристики расположения критического элемента изделия на основе КРЦ; проведен сравнительный анализ различных способов оценки угловых отклонений; изучено влияние корреляции выходных точностных параметров на прогнозирование доли годных сборок.

Анализ причин получения брака при сборке выявил две основные группы погрешностей: 1) технологические (производственные) погрешности; 2) контактные погрешности.

Таблица 2 – Необходимые условия точности месторасположения геометрических элементов деталей в трёхмерном пространстве и их геометрическая интерпретация

Название геометрической характеристики	Характер технических требований	Необходимые условия точности	Геометрическая интерпретация
Позиция, соосность	точность позиции точки (в диаметральном выражении) относительно комплекта баз А, В, С (А, В, С – плоскости)	$(\varphi_1^0)^2 + (\varphi_2^0)^2 + (\varphi_3^0)^2 \leq M^2,$ $M = \frac{\Delta}{2}$	
	точность позиции линии относительно комплекта баз А, В (А, В – плоскости)	$(\varphi_1^0)^2 + (\varphi_2^0)^2 \leq \left(\frac{\Delta}{2}\right)^2$	
	соосность оси относительно базовой оси	$4 \cdot (\varphi^0)^2 + L^2 \cdot \varphi^2 \leq \Delta^2,$ $\varphi^0 = \sqrt{(\varphi_1^0)^2 + (\varphi_2^0)^2},$ $\alpha \in [0; 2\pi)$	

Анализ причин получения брака при сборке выявил две основные группы погрешностей: 1) технологические (производственные) погрешности; 2) контактные погрешности.

Производственные погрешности связаны с технологическим процессом изготовления деталей и узлов, а также с используемыми при этом материалами. К ним можно отнести износ инструмента, ошибки крепежа, изменение свойств материала, температуры, колебания в условиях обработки и т.д.

Производственные погрешности отдельных деталей, собираемых в узлы и механизмы, являются причинами вариаций размеров: длин, углов, а также геометрических вариаций: вариаций геометрической формы, месторасположения и ориентации геометрических элементов деталей. Эти вариации имеют случайную природу и являются независимыми, допуски позволяют их нормировать.

Контактные погрешности возникают при соединении деталей во время сборки. Эти погрешности приводят к малым смещениям (кинематическим инфинитезимальным) точек сопрягаемых поверхностей из-за отклонений в геометрии и размерах поверхностей, вызванных действием производственных погрешностей. Отклонения в сборке, обусловленные контактными погрешностями, имеют случайную природу, их величина меняется от сборки к сборке, и они не могут быть заранее определены конструктором, а, следовательно, и нормированы.

Геометрические погрешности в сочетании с погрешностями размеров и контактными погрешностями влияют на взаимное расположение элементов деталей при сборке, и, в конечном счёте, влияют на собираемость изделия. Поскольку эти вариации неизбежны в производстве, то они должны тщательно контролироваться.

Размерная цепь сборки, звенья которой отражают геометрические, размерные и контактные отклонения элементов деталей, входящих в изделие, названа конфигурационной размерной цепью.

КРЦ сборки представляет собой совокупность контрольных точек и векторов-звеньев, включая векторы-звенья размеров элементов деталей изделия, векторы (входящие и выходящие) кинематических соединений собираемых деталей, векторы-звенья пространственных отклонений. Конечная точка КРЦ сборки названа ключевой контрольной точкой (рис.2).

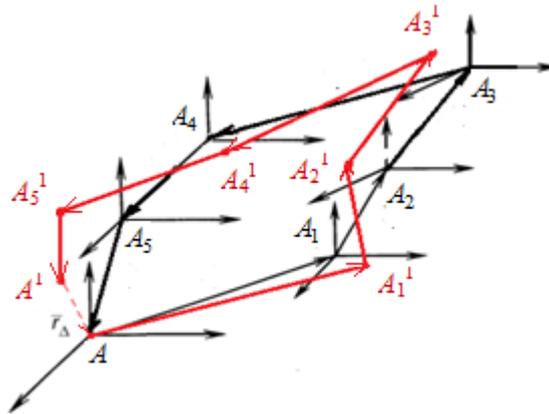


Рисунок 2 – Пространственная конфигурационная размерная цепь

Для формализованного представления звеньев конфигурационной размерной цепи сборки используем бикватернионы перемещений:

$$\mathbf{Q}_i = \mathbf{q}_i + \varepsilon \cdot \mathbf{q}_i^0 = \mathbf{\Lambda}_i \otimes \mathbf{T}_i .$$

Здесь $\mathbf{q} = [q_0 \ q_1 \ q_2 \ q_3]$ – главный кватернион; $\mathbf{q}^0 = [q_0^0 \ q_1^0 \ q_2^0 \ q_3^0]$ – моментный кватернион; ε – единица Клиффорда, $\varepsilon^2 = 0$,

$\mathbf{\Lambda}_i = \cos \frac{\theta_i}{2} + \bar{s}_i \cdot \sin \frac{\theta_i}{2}$ – собственный кватернион поворота на угол θ_i вокруг

эйлеровой оси с единичным вектором \bar{s}_i , а $\mathbf{T}_i = 1 + \varepsilon \cdot \frac{\bar{t}_i}{2}$ – бикватернион поступательного перемещения в направлении вектора \bar{t}_i .

Бикватернионы были введены У. Клиффордом в 1873 году как обобщение кватернионов Гамильтона и использовались для описания геометрии движения. Идеи Клиффорда развил А.П. Котельников в 1895 г., разработав приложения к геометрии и механике.

Аналитическая модель конфигурационной размерной цепи сборки содержит бикватернионы $\mathbf{Q}_j^K = \mathbf{Q}_j^K(\varphi_{1j}^0, \varphi_{2j}^0, \varphi_{3j}^0, \varphi_{1j}, \varphi_{2j}, \varphi_{3j})$ с точностными параметрами $\varphi_{ij}^0, \varphi_{ij}$ звеньев ($j = \overline{1, n}$) и имеет вид:

$$(\mathbf{Q}_{\Sigma}^K) \otimes \mathbf{A}_0 \otimes (\mathbf{Q}_{\Sigma}^K)^* = \mathbf{A}_n^K, \quad (1)$$

где $\mathbf{Q}_{\Sigma}^K = \mathbf{Q}_n^K \otimes \dots \otimes \mathbf{Q}_j^K \otimes \dots \otimes \mathbf{Q}_1^K$ – бикватернион КРЦ; \mathbf{A}_0 – начальная точка КРЦ; \mathbf{A}_n^K – конечная точка КРЦ.

Отметим, что если точностные параметры звеньев КРЦ в (1) считать равными нулю, то получим аналитическую модель размерной цепи номинальной сборки:

$$(\mathbf{Q}_{\Sigma}^N) \otimes \mathbf{A}_0 \otimes (\mathbf{Q}_{\Sigma}^N)^* = \mathbf{A}_n^N.$$

Расположение конечного звена КРЦ с учётом пространственных допустимых отклонений расположения геометрических элементов деталей, входящих в размерную цепь, определяется двумя параметрами: величиной накопленных ошибок перемещения конечной точки КРЦ:

$$\psi_{\Delta\Sigma} = 2 \cdot \left| \text{Vect} \left(\mathbf{q}_{\Delta\Sigma}^0 \otimes (\mathbf{q}_{\Delta\Sigma})^* \right) \right|,$$

и величиной угла накопленных ошибок эйлера поворота конечного звена КРЦ:

$$\phi_{\Delta\Sigma} = 2 \cdot \arg \left(\Lambda_{\Delta\Sigma} \right),$$

где $\mathbf{q}_{\Delta\Sigma}^0$ и $(\mathbf{q}_{\Delta\Sigma})^*$ – компоненты бикватерниона

$\mathbf{Q}_{\Delta\Sigma} = \mathbf{q}_{\Delta\Sigma} + \varepsilon \cdot (\mathbf{q}_{\Delta\Sigma}^0) = \mathbf{Q}_{\Sigma}^K \otimes (\mathbf{Q}_{\Sigma}^N)^*$ кумулятивных (накопленных) оши-

бок в расположении ключевой контрольной точки КРЦ; $\arg \left(\Lambda_{\Delta\Sigma} \right)$ – главное значение аргумента собственного кватерниона $\Lambda_{\Delta\Sigma} = \lambda_{\Delta_1} \otimes \lambda_{\Delta_2} \otimes \dots \otimes \lambda_{\Delta_s}$ накопленных ошибок ориентации (эйлерова поворота) конечного звена КРЦ.

Допустимые пространственные отклонения расположения критического элемента изделия с точки зрения рассматриваемого подхода определяем максимальными значениями параметров $\psi_{\Delta\Sigma}$ и $\phi_{\Delta\Sigma}$.

Геометрически допуск расположения геометрического элемента в трёхмерном пространстве представлен двумя векторами кумулятивных допустимых ошибок расположения $\left[\overline{\Phi}_{\Delta\Sigma}, \overline{\Psi}_{\Delta\Sigma} \right]$ конечного звена КРЦ изделия (рис.3):

- вектором $\overline{\Psi}_{\Delta\Sigma}$ кумулятивной допустимой ошибки расположения конечной точки КРЦ изделия: $\overline{\Psi}_{\Delta\Sigma} = \psi_{\Delta\Sigma} \cdot \bar{e}$, где \bar{e} – орт вектора $\overline{\Psi}_{\Delta\Sigma}$;

- вектором кумулятивной допустимой ошибки ориентации (эйлерова поворота) конечного звена КРЦ: $\bar{\Phi}_{\Delta\Sigma} = \phi_{\Delta\Sigma} \cdot \bar{s}$, где \bar{s} – орт вектора $\bar{\Phi}_{\Delta\Sigma}$.

Номинальной сборке соответствуют нулевые векторы кумулятивных допустимых ошибок, то есть: $\bar{\Psi}_{\Delta\Sigma} = \bar{0}$, $\bar{\Phi}_{\Delta\Sigma} = \bar{0}$.

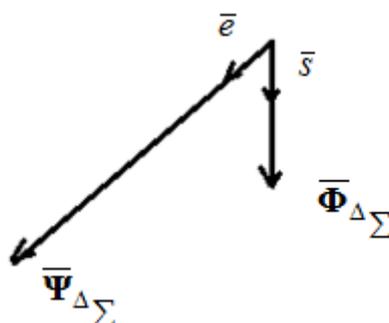


Рисунок 3 - Геометрическая интерпретация оценки точности расположения конечного звена КРЦ

Аналитические условия для оценки точности расположения критического геометрического элемента изделия на основе КРЦ в трёхмерном пространстве имеют вид:

$$T_{\Delta\phi\Sigma}^{\text{расчет}} \leq T_{\Delta\phi\Sigma}^{\text{проект}},$$

$$T_{\Delta\psi\Sigma}^{\text{расчет}} \leq T_{\Delta\psi\Sigma}^{\text{проект}}.$$

Здесь $T_{\Delta\phi\Sigma}$ - допустимое отклонение ориентации конечного звена КРЦ;

$T_{\Delta\psi\Sigma}$ – допустимое отклонение расположения конечной точки КРЦ.

Кроме этого необходимо проверить сонаправленность ортов расчётной и проектной эйлеровых осей допустимых ошибок поворотов конечного звена КРЦ, а также сонаправленность ортов (проектного и расчётного) осей допустимых перемещений конечной точки КРЦ.

Также в этой главе проведён сравнительный анализ двух способов оценки угловых отклонений геометрических элементов деталей: 1) нелинейная оценка угловых отклонений по формуле $\Delta_1 = a \cdot \sin \varphi$ (a – линейный размер; φ – угол; Δ – отклонение); 2) линеаризованная оценка по формуле $\Delta_2 = a \cdot \text{tg} \varphi$.

Установлено, что существенные различия в результатах при разных способах оценки угловых отклонений элементов деталей появляются при значени-

$$\text{ях } \frac{\Delta_1}{a} > \frac{1}{100}.$$

На рисунке 4 приведен график абсолютных ошибок при оценке углового отклонения геометрического элемента способом 1 и способом 2.

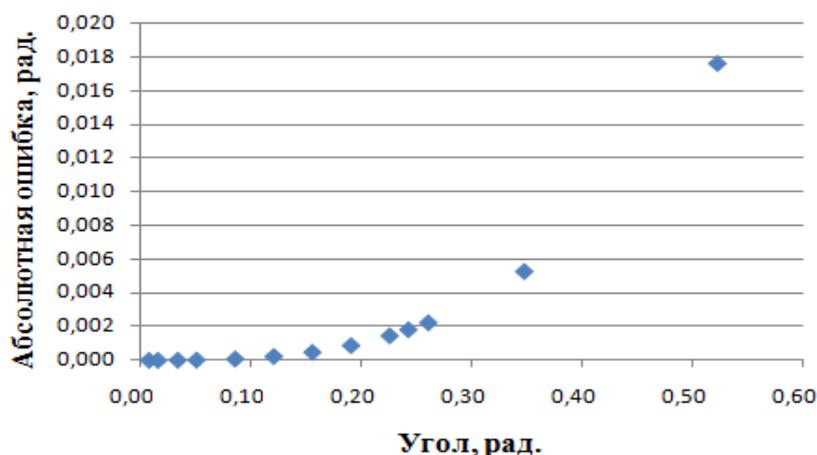


Рисунок 4 – График абсолютных ошибок при различных подходах к оценке отклонений ориентации

Оценка влияния коррелированности выходных точностных параметров на прогнозирование доли брака при сборке проводилась в предположении, что эти параметры распределены по нормальному закону.

Процент бракованных сборок рассчитываем, используя формулу:

$$Q_{\Sigma}^{\text{брак}} = (1 - \hat{P}_{\Sigma}) \cdot 100\% .$$

Здесь \hat{P}_{Σ} - доля «успешных» сборок, определяемая путём n -кратного интегрирования функции распределения вероятностей по области значений выходных точностных переменных.

Анализ влияния коррелированности на точность прогнозирования доли бракованных сборок при заданных диапазонах изменения точностных параметров в диапазонах $[-k\sigma_i; k\sigma_i]$, где $k = 3; 4$, показал, что:

1) при увеличении абсолютного значения линейного коэффициента корреляции наблюдается рост относительной ошибки при прогнозировании доли бракованных сборок без учёта коррелированности точностных параметров, причём, чем ближе абсолютное значение коэффициента корреляции к единице, тем значительнее становится ошибка (рис. 5);

2) если абсолютное значение коэффициента корреляции близко к нулю и пределы интегрирования независимые, то влияние коррелированности незначительное;

3) при увеличении коэффициента k , влияние корреляции на точность прогнозирования доли брака снижается.

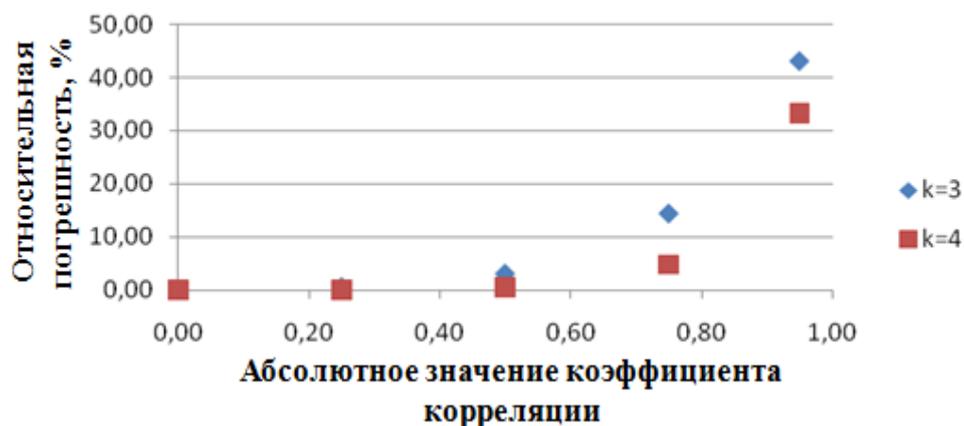


Рисунок 5 – Относительная ошибка при прогнозировании доли «неуспешных» сборок (двумерное нормальное распределение) без учёта корреляции

В четвертой главе разработана технология анализа пространственных размерных связей изделий с учётом допусков расположения на основе КРЦ для оценки собираемости изделий машиностроения; проведена практическая реализация разработанной технологии анализа.

Технология анализа пространственных размерных связей с учётом допусков расположения на основе КРЦ для повышения собираемости:

- 1) в соответствии с функциональным назначением изделия сформулировать технические требования к изделию и его компонентам, выявить ключевую геометрическую характеристику изделия, задать допуски.
- 2) построить граф взаимосвязей компонентов сборки (конструкторско-технологический граф), отражающий производственные связи компонентов сборки (граф строится на основе графа сборки);
- 3) указать базовые контрольные точки деталей, контрольные точки геометрических элементов деталей, а также ключевую контрольную точку;
- 4) выявить составляющие звенья, построить схему размерной цепи номинального изделия;
- 5) получить аналитическую модель размерной цепи номинальной сборки, произвести её расчёт и верификацию;
- 6) идентифицировать точностные параметры отклонений в составляющих звеньях с учётом назначенных допусков и сформулировать необходимые (аналитические) условия точности в соответствии с техническими требованиями к точности расположения для каждого звена;
- 7) получить аналитическую модель КРЦ и произвести её расчёт;
- 8) получить расчётные значения параметров $\psi_{\Delta\Sigma}$ и $\phi_{\Delta\Sigma}$, характеризующих точность расположения конечного звена КРЦ;
- 9) провести интегральную оценку точности ключевой геометрической характеристики изделия;
- 10) в предположении нормального закона распределения точностных параметров основной геометрической характеристики сборки спрогнозировать долю бракованных сборок;

11) сделать выводы.

Практическая реализация разработанной технологии анализа проведена на примере сборочной единицы «вал-втулка» детали «Каретка» (рис. 6) при назначенных допусках на элементы соединяемых деталей, а также на примере изделия, состоящего из шести однотипных прямоугольных пластин, на верхние поверхности которых назначены допуски параллельности.

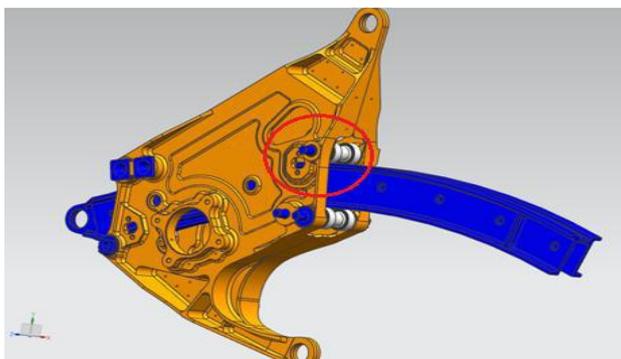


Рисунок 6 – Узел «вал-втулка» в детали «Каретка»

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целях повышения собираемости изделий машиностроения разработан подход к анализу точности ключевых геометрических характеристик расположения элементов изделий машиностроения в трехмерном пространстве, основанный на использовании конфигурационной модели размерной цепи и бикватернионов.

1. Проведенный анализ состояния проблемы обеспечения собираемости изделий машиностроения показал актуальность разработки технологии анализа пространственных размерных связей в сборках с учетом допусков расположения.
2. Выделено две основные группы погрешностей сборки: 1) технологические (производственные); 2) контактные. Установлено, что контактные погрешности являются следствием производственных погрешностей и приводят к небольшим смещениям соединяемых при сборке деталей.
3. Теоретически обосновано, что для полноценного пространственного анализа изделия в трёхмерном пространстве необходимо комплексно учитывать пространственные взаимосвязи размерных и угловых отклонений геометрических элементов, входящих в сборочную единицу, а также кумулятивный эффект этих отклонений в ключевых геометрических характеристиках расположения критических элементов изделия.
4. Получены необходимые (аналитические) условия точности для следующих технических требований к расположению геометрических элементов изделия в трёхмерном пространстве: перпендикулярность линии относительно комплекта баз; перпендикулярность линии относительно базовой плоскости; параллельность плоскости относительно базовой плоскости; точность угла между плоскостями; точность позиции точки относительно комплекта баз; точность по-

зиции линии относительно комплекта баз; соосность оси относительно базовой оси.

5. Для комплексного учёта погрешностей сборки и пространственных допустимых отклонений расположения критических геометрических элементов изделия введены понятия конфигурационной модели размерной цепи, ключевой контрольной точки изделия, а также получено аналитическое уравнение КРЦ и её расчётные формулы с использованием бикватернионов.

6. Для оценки точности расположения критического геометрического элемента изделия с учетом допусков расположения на основе КРЦ предложено использовать два параметра: величину кумулятивной допустимой ошибки перемещения конечной точки КРЦ и величину кумулятивной допустимой ошибки эйлерова поворота конечного звена КРЦ.

7. Геометрически допуск расположения геометрического элемента определен двумя векторами: вектором допустимой кумулятивной ошибки перемещения конечной точки КРЦ и вектором допустимой кумулятивной ошибки эйлерова поворота конечного звена.

8. Дана геометрическая интерпретация необходимых условий точности расположения геометрических элементов изделий, указанных в п.7. Для группы ориентации получено четыре вида областей: 1) прямоугольник; 2) круг; 3) ромб; 4) отрезок. Для группы месторасположения – 3 вида областей: 1) сфера; 2) эллипсоид; 3) круг.

9. Разработана интегральная оценка точности расположения критического элемента изделия в трёхмерном пространстве на основе КРЦ, позволяющая дать общую оценку влияния пространственных отклонений компонентов изделия на расположение ключевого геометрического элемента изделия.

10. Исследовано влияние коррелированности выходных точностных параметров расположения на прогнозирование доли брака при сборке в предположении, что параметры имеют нормальный закон распределения. Установлено, что при увеличении абсолютного значения коэффициента корреляции наблюдается рост ошибки прогноза. Влияние корреляции на ошибку прогноза снижается при расширении практических полей рассеивания выходных точностных параметров.

11. Установлено, что для обеспечения точности расположения конечного звена КРЦ целесообразно использовать нелинейные оценки угловых отклонений составляющих звеньев, когда отношение углового отклонения к линейному размеру превышает 0,01, а пространственные вариации в расположении конечного звена КРЦ в значительной степени обусловлены отклонениями ориентации компонентов, то есть сборка является «сильно нелинейной».

12. Разработана технология пространственного анализа сборок с учётом допусков расположения в трёхмерном пространстве на основе КРЦ.

Рекомендации и перспективные направления развития темы исследования

1. Для обеспечения высокого качества проектирования изделия машиностроения и планирования технологического процесса сборки рекомендовано уже на стадии геометрического проектирования изделия учитывать пространствен-

ные допустимые отклонения расположения геометрических элементов деталей и их взаимовлияние, используя необходимые (аналитические) условия точности геометрических характеристик расположения, КРЦ сборки, интегральную оценку точности, и технологию анализа на основе КРЦ.

2. Для получения более точных результатов анализа на основе КРЦ для сборок с достаточно большим количеством угловых отклонений геометрических элементов деталей предпочтительнее использовать нелинейную оценку угловых отклонений в случае, если отношение абсолютной величины углового отклонения к линейному размеру превышает 0,01.

3. В целях получения более точных результатов при прогнозировании доли брака при сборке необходимо учитывать коррелированность выходных точностных параметров.

4. Для достижения эффективности расчётов и геометрической наглядности результатов пространственного размерного анализа изделий машиностроения с учётом допусков расположения на основе КРЦ следует использовать аппарат бикватернионов, геометрическую интерпретацию оценки точности расположения критического геометрического элемента изделия.

5. Перспективными направлениями развития темы исследования являются: решение задачи синтеза допусков на основе КРЦ; разработка методов оптимизации допусков на основе конфигурационной размерной цепи; разработка статистического метода анализа на основе КРЦ; совершенствование методов пространственного анализа сборок на основе КРЦ; решение задач пространственного анализа точности ключевых геометрических характеристик критических элементов изделий с маложёсткими компонентами и т.д.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. **Хващевская, Л.Ф.** Анализ точности изделий машиностроения для случая параллельно связанных линейных размерных цепей / **Л.Ф. Хващевская, Д.А. Журавлёв** // Системы. Методы. Технологии. – 2022. – №1(53). – С.48-57.

2. **Хващевская, Л.Ф.** Моделирование пространственных допустимых отклонений сборочных единиц с помощью бикватернионов / **Л.Ф. Хващевская, Д.А. Журавлёв** // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – №11(22). – С.71-88.

3. Гаер, М.А. Конфигурационная геометрическая модель позиционирования базовых точек элементов сборки с учётом их пространственных допустимых отклонений / М.А. Гаер, Д.А. Журавлёв, **Л.Ф. Хващевская** // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2016. – №4. – С.10-18.

4. **Хващевская, Л.Ф.** Статистический анализ точности сборки с учётом пространственных допустимых отклонений расположения / **Л.Ф. Хващевская** // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. – №11. – С.40-44.

5. **Хващевская, Л.Ф.** Статистический анализ точности замыкающего звена плоскостной размерной цепи / **Л.Ф. Хващевская, Д.А. Журавлёв** // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. – №9. – С.49-55.

6. **Хващевская, Л.Ф.** К проблеме обеспечения точности в изделиях машиностроения / **Л.Ф. Хващевская, А.В. Шабалин** // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2014. – №1. – С.25-29.

7. Гаер, М.А. Дифференциально-геометрический подход для анализа трёхмерных размерных цепей / М.А. Гаер, **Л.Ф. Хвощевская** // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2014. – №10. – С.32-38.

В других изданиях

8. **Хвощевская, Л.Ф.** Конфигурационная модель размерной цепи в обеспечении собираемости изделий машиностроения/ **Л.Ф. Хвощевская**, Д.А. Журавлёв // Материалы VIII Международной конференции «Проблемы механики современных машин» (Улан-Удэ, 4-9 июля, 2022 г.). – Улан-Удэ: ВСГУТУ. – 2022. – С.563-569.

9. **Хвощевская, Л.Ф.** Анализ и прогнозирование точности расположения геометрических элементов изделий с использованием аппарата винтового исчисления / **Л.Ф. Хвощевская** // Фундаментальные основы механики. – Санкт-Петербург: НИЦ МС. – 2022. – №9. – С. 24-29.

10. Zhuravlev, D. Ensuring the collection of mechanical engineering products, taking into account the tolerances for computer-aided design in GePARD.3D/ D Zhuravlev, **L Khvoshchevskaya**, A Shabalin and M Gaer// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Volume 1155. III International Scientific Conference: Modernization, Innovations, Progress: Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering (MIP – III 2021) 29th-30th April 2021. Krasnoyarsk.

11. **Хвощевская, Л.Ф.** Изучение влияния корреляции конфигурационных параметров на точность прогнозирования при оценке доли успешных сборок / **Л.Ф. Хвощевская**// Материалы XII Международной научно-технической конференции «Авиамашиностроение и транспорт Сибири» (Иркутск, 27 мая -01 июня, 2019 г.). – Иркутск: ИРНТУ. – 2019. – С.188-195.

12. **Хвощевская, Л.Ф.** О проблемах пространственного размерного анализа на современном этапе развития машиностроения / **Л.Ф. Хвощевская** // Материалы X Международной научно-технической конференции «Авиамашиностроение и транспорт Сибири» (Иркутск, 21-26 мая, 2018 г.). – Иркутск: ИРНТУ. – С. 241-247.

13. **Хвощевская, Л.Ф.** О методах размерного анализа на основе конфигурационной модели сборки /**Л.Ф. Хвощевская**, Д.А. Журавлёв, А.В. Шабалин // Материалы 1-ой международной научно-практической конференции “Технология машиностроения и материаловедение” (Новокузнецк, 10-12 апреля, 2017 г.). – Новокузнецк. – С. 68-70.

14. **Хвощевская, Л.Ф.** Анализ точности 2D-сборки на основе модели векторного контура /**Л.Ф. Хвощевская** // Материалы международной научно-практической конференции «Тенденции развития науки и образования» (Тамбов, 31 июля, 2015 г.). – Тамбов. – Т.3. – С.149-153.

Подписано в печать 30.09.2022. Формат 60 x 90 / 16.

Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 1,25.

Тираж 100 экз. Зак. 123. Поз. Плана 2н.

Отпечатано в типографии Издательства
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический университет»
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83