



**УТВЕРЖДАЮ**  
Ректор ФГБОУ ВО «Иркутский  
национальный исследовательский  
технический университет»,  
доктор технических наук

М.В. Корняков

« 19 » \_\_\_\_\_ 2022 г.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Иркутский национальный исследовательский  
технический университет»**

Диссертация «Повышение собираемости изделий машиностроения на основе конфигурационной модели размерной цепи» выполнена на кафедре «Технологии и оборудование машиностроительных производств».

В 2015 году Хвощевская Любовь Фёдоровна окончила магистратуру в ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» по направлению 15.04.05 - Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств.

В период подготовки диссертации соискатель Хвощевская Любовь Фёдоровна работала в должности программиста на кафедре технологии и оборудование машиностроительных производств ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет». Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов по истории философии и иностранному языку выдано в 2015 году, справка о сдаче кандидатского экзамена по специальности – в 2016 году.

Научный руководитель – Журавлёв Диомид Алексеевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии и оборудование машиностроительных производств» ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет».

### **На заседании присутствовали:**

Кафедра «Технологии и оборудование машиностроительных производств»:

1. Пашков Андрей Евгеньевич – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой;
2. Пономарев Борис Борисович – д.т.н., профессор;
3. Журавлев Диомид Алексеевич – д.т.н., профессор;
4. Свинин Валерий Михайлович – д.т.н., профессор;

5. Кольцов Владимир Петрович – д.т.н., профессор;
6. Солер Яков Иосифович – к.т.н., профессор;
7. Беломестных Александр Сергеевич – к.т.н., доцент;
8. Майзель Игорь Геннадьевич – к.т.н., доцент;
9. Стрелков Алексей Борисович – к.т.н., доцент;
10. Казимиров Денис Юрьевич – к.т.н., доцент;
11. Савилов Андрей Владиславович – к.т.н., доцент;
12. Викулова Светлана Владимировна – к.т.н., доцент;
13. Балла Олег Михайлович – к.т.н., доцент;
14. Зарак Татьяна Владимировна – к.т.н., доцент;
15. Пярых Алексей Сергеевич – к.т.н., доцент;
16. Стародубцева Дарья Александровна – к.т.н., доцент;
17. Пашков Александр Андреевич – к.т.н., доцент;
18. Ле Че Винь – к.т.н., доцент;
19. Иванов Юрий Николаевич – к.т.н., доцент;
20. Исаченко Алексей Сергеевич – к.т.н., доцент;
21. Москвитин Виктор Николаевич – к.т.н., доцент;
22. Родыгина Альбина Евгеньевна – к.т.н., доцент.

Кафедра «Материаловедение, сварочные и аддитивные технологии»:

23. Зайдес Семен Азикович – д.т.н., профессор.

С сообщением о результатах исследования, изложенного в диссертации на тему «Повышение собираемости изделий машиностроения на основе конфигурационной модели размерной цепи», выступила Л.Ф. Хващевская.

**Вопросы задали:**

1. **Д. т. н., профессор Д.А. Журавлев**

Почему для обеспечения точности ключевых геометрических характеристик элементов изделий были выбраны бикватернионы? В чём заключаются их преимущества?

2. **Д. т. н., профессор С.А. Зайдес**

Может ли разработанная Вами технология обеспечения точности геометрических характеристик изделий в трёхмерном пространстве использоваться в аддитивном производстве? Почему конфигурационную модель размерной цепи можно использовать на протяжении ЖЦИ?

3. **К. т. н., доцент А.В. Савилов**

Какой метод достижения точности конечного звена конфигурационной модели размерной цепи используете?

4. **Д. т. н., профессор Б.Б. Пономарев**

В каких научных конференциях участвовали? Сколько публикаций, рекомендованных ВАК, по теме диссертации имеете?

5. **К. т. н., доцент Д.Ю. Казимиров**

Как учитываются посадки с натягом при этом подходе?

6. **К. т. н., профессор Я.И. Солер**



Какие посадки используете при рассмотрении узла «вал-втулка» детали «Каретка»?

7. **Д. т. н., профессор В.М. Свинин**

Перечислите и обоснуйте достоинства разработанного подхода, а также предлагаемых параметров для обеспечения точности геометрических характеристик расположения.

8. **Д. т. н., профессор В.П. Кольцов**

Как учитывается в анализе взаимосвязь размерных и угловых отклонений?

На все вопросы соискателем были даны убедительные ответы.

**А.Е. Пашков:** Если больше вопросов нет, то приступаем к обсуждению.

1. **Д. т. н., профессор. А.Е. Пашков**

Считаю, что соискатель Л.Ф. Хващевская достаточно подробно ответила на все вопросы.

2. **Д. т. н., профессор С.А. Зайдес**

В заключении к диссертации необходимо указать области применения разработанной технологии.

3. **Д. т. н., проф. Б.Б. Пономарев**

Отметил, что работа удовлетворяет требованиям, предъявляемым ВАК к диссертациям. Рекомендовал расширить географию публикаций.

4. **Д. т. н., профессор Д.А. Журавлёв**

Проблема назначения допусков и обеспечения точности изделий в трёхмерном пространстве на современном этапе развития машиностроительного производства в России и мире актуальна, а также сложна в решении, поскольку охватывает целый комплекс областей научного знания. Разработанный подход является новым, автор заслуживает похвалы.

В качестве ведущей организации рекомендовал ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П.А. Соловьёва» (г. Рыбинск).

5. **Д.т.н., профессор В.М. Свинин**

Необходимо проработать выводы и заключение: они должны отчётливо характеризовать полученные результаты.

6. **К. т. н., доцент А.В. Савилов**

Проблема обеспечения точности изделий в трёхмерном пространстве, является чрезвычайно актуальной в современных условиях. Автором проведена большая исследовательская работа на высоком научном и методическом уровне.

**А.Е. Пашков:** Поскольку все желающие выступить высказали своё мнение, замечания и пожелания, то полагаю, мы можем на основании доклада Л.Ф. Хващевской, а также, обсудив результаты представленного диссертационного исследования, **принять следующее заключение:**



Диссертация соискателя Хвацевской Любови Фёдоровны представляет собой самостоятельное исследование, является завершённым научным трудом, выполненным на актуальную тему и на высоком научно-методическом уровне по специальности 2.5.6. Технология машиностроения.

#### **Актуальность темы диссертационного исследования**

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.

Качество стало одним из наиболее популярных лозунгов двадцать первого века. Международные стандарты серии ISO 9000 приняты более чем в 90 странах мира.

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

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.

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

Показатели качества изделий формируются при проектировании и проявляют себя на протяжении всего жизненного цикла изделия: 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. Процессы сборки занимают 25-40% в общей структуре трудоёмкости производства машин.

Основным направлением технического прогресса современного сборочного производства являются интегрированные производственные комплексы, позволяющие решать задачи производства, начиная от проектирования изделий, технологии, оборудования и оснастки, управления технологическими процессами сборки до управления производством в целом посредством АСУ.

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 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.

### **Основные научные результаты**

Для повышения собираемости изделий машиностроения разработана технология анализа размерных связей в изделиях машиностроения с учётом пространственных допустимых отклонений геометрических элементов деталей, входящих сборку.

В результате проведенных исследований получены следующие результаты и выводы.

1. Проанализировано современное состояние проблемы обеспечения собираемости. Получены следующие выводы:

а) собираемость изделия обеспечивается точностью его выходных геометрических характеристик и прежде всего характеристик расположения;

б) полноценный анализ пространственных размерных связей в сборочных единицах, комплексно учитывающий допустимые отклонения компонентов, является ключевым условием по обеспечению высокого качества проектирования и планирования технологических процессов сборки, а также основой для обеспечения взаимозаменяемости деталей и создания высокотехнологичных конструкций с минимальными затратами материальных и энергетических ресурсов;

с) на сегодняшний день достижение точности выходных геометрических характеристик сборки проводится с использованием линейных размерных цепей, аппарата матриц, дифференциального исчисления и методов, разработанных для них; расчёт конструкторских и технологических размеров, отклонений расположения выполняется раздельно, без учёта взаимного влияния размерных и геометрических отклонений.

2. Выделено две основные группы погрешностей сборки: 1) технологические (производственные); 2) контактные. Установлено, что производственные погрешности связаны с технологическим процессом изготовления деталей и узлов, а также с используемыми при этом материалами. 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 геометрических характеристиках сборки, 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.



3. Теоретически обосновано, что для получения высокоточных результатов размерно-точностного анализа сборки в трёхмерном пространстве необходимо комплексно учитывать пространственную взаимосвязь размерных и угловых отклонений геометрических элементов, входящих в сборочную единицу, а также кумулятивный эффект этих отклонений в ключевых геометрических характеристиках элементов изделия.
4. Для анализа точности ключевых геометрических характеристик расположения элементов изделий в трёхмерном пространстве введены понятия ключевых контрольных точек изделия, конфигурационной размерной цепи (коротко КРЦ), получены её аналитические уравнения и расчётные формулы с использованием бикватернионов.
5. Для оценки точности расположения ключевого геометрического элемента изделия в трёхмерном пространстве на основе КРЦ предложено использовать два параметра: величину кумулятивной допустимой ошибки эйлера (конечного) перемещения конечной точки КРЦ и величину кумулятивной допустимой ошибки эйлера (конечного) поворота конечного звена.
6. Допуск расположения геометрического элемента аналитически определен максимальными значениями величины кумулятивной ошибки эйлера (конечного) перемещения конечной точки КРЦ (ключевой контрольной точки цепи) и величины кумулятивной ошибки эйлера (конечного) поворота конечного звена КРЦ, а геометрически – двумя векторами: вектором ошибки эйлера (конечного поворота) элемента и вектором ошибки эйлера (конечного) перемещения.
7. Разработаны необходимые (аналитические) условия для обеспечения точности расположения геометрических элементов изделий в трёхмерном пространстве с учётом технических требований, предъявляемых к ним: 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 позиции линии относительно комплекта баз; соосность оси относительно базовой оси.
8. Разработана интегральная оценка точности расположения ключевого геометрического элемента сборки в трёхмерном пространстве, позволяющая дать общую оценку влияния производственных погрешностей компонентов изделия на основе КРЦ. Дана её геометрическая интерпретация.
9. Исследовано влияние коррелированности выходных параметров расположения элемента изделия на прогнозирование доли успешныхборок. Установлено, что при увеличении абсолютного значения коэффициента корреляции наблюдается рост ошибки прогноза.
10. Теоретически и практически обоснована целесообразность использования различных подходов к оценке (нелинейная, линеаризованная) отклонений ориентации для получения высокоточных результатов. Сравнительный анализ двух подходов к оценке углового отклонения показал, что для достижения высокой точности оценки необходимо использовать нелинейную



оценку. Линеаризованную оценку целесообразно использовать в случае, когда отношение величины углового отклонения к нормируемому размеру не превышает 0,01.

11. Разработана методика анализа точности геометрических характеристик расположения элементов изделия на основе КРЦ.

12. Практическая реализация предложенного подхода к анализу собираемости с учётом пространственных допустимых отклонений компонентов сборки рассмотрена на двух примерах: сборочная единица, состоящая из шести однотипных прямоугольных пластин; узел «вал-втулка» детали «Каретка».

13. Результаты диссертационного исследования могут быть использованы в КБ предприятий, занимающихся проектированием изделий машиностроения, приборостроения, авиастроения и т.д, а также в учебном процессе и при написании ВКР, НКР.

#### **Конкретное личное участие автора в получении результатов научных исследований, изложенных в диссертации**

Все результаты получены автором самостоятельно: для повышения собираемости изделий машиностроения разработаны математические инструменты для изучения пространственных размерных связей в сборочных единицах с учётом допусков, а также технология анализа. Автором введены новые понятия: конфигурационная модель размерной цепи, ключевые контрольные точки изделия, кумулятивные ошибки эйлера (конечного) поворота конечного звена КРЦ (ключевого геометрического элемента) изделия, кумулятивные ошибки эйлера (конечного) перемещения ключевой контрольной точки изделия.

#### **Степень достоверности исследований**

В исследованиях были использованы: математическое 3D - моделирование с использованием аппарата бикватернионов, методы технологии машиностроения, теории машин и механизмов, теоретической и аналитической механики, теории векторного анализа, аналитической геометрии, метрологии и стандартизации.

Представленные в диссертационной работе результаты и сделанные на их основе выводы следует оценить как достоверные.

#### **Научная новизна исследования**

Разработан новый подход к пространственному анализу и прогнозированию точности расположения ключевых геометрических элементов изделий с учётом пространственных отклонений компонентов на основе КРЦ для повышения собираемости изделий машиностроения.

#### **Теоретическая значимость работы**

Разработаны теоретические основы для анализа пространственных размерных связей сборочных единиц с учётом допусков расположения их геометрических элементов с целью повышения собираемости:

1. дана классификация погрешностей сборки, установлена их взаимосвязь;



2. введены новые понятия: конфигурационная размерная цепь, ключевые контрольные точки изделия, интегральная оценка точности расположения геометрических элементов изделия.
3. предложен способ и получены аналитические условия для формализации общих технических требований к расположению (ориентации, месторасположения) геометрических элементов изделия в трёхмерном пространстве;
4. проведена оценка влияния корреляции выходных параметров на точность прогнозирования на основе КРЦ;
5. построены математические модели и разработаны инструменты, которые учитывают общие технические требования к точности расположения элементов деталей в трёхмерном пространстве, а также позволяют:
  - получить оценку точности расположения ключевых геометрических элементов изделий с учётом допусков 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 геометрических элементов изделия на протяжении ЖЦИ.

Использование аппарата бикватернионов в анализе даёт возможность комплексного учёта источников погрешностей при сборке изделия, а также возможность оцифровки технологии анализа и геометрическую наглядность.

#### **Практическая значимость работы**

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

- повышения качества изделий, обусловленного комплексным учётом в анализе источников погрешностей и общих технических требований, предъявляемых к пространственному расположению геометрических элементов сборочных единиц в процессе их изготовления и сборки;
- улучшения технологичности изделий на основе назначения научно-обоснованных допусков расположения, а также достижения требуемой точности расположения ключевых геометрических элементов в изделиях 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 на протяжении всего ЖЦИ.



## Полнота изложенных результатов диссертации в работах, опубликованных автором

Основное содержание диссертационной работы и ее результатов полностью отражено в научных работах автора.

### В рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК

1. **Хващевская, Л.Ф.** Анализ точности изделий машиностроения для случая параллельно связанных линейных размерных цепей / Л.Ф. Хващевская // 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. Хващевская** // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2014. – №10. – С.32-38.

### В других изданиях

8. Zhuravlev, D. Ensuring the collection of mechanical engineering products, taking into account the tolerances for computer-aided design in "GERARD.3D"/ D Zhuravlev, **L Khvashevskaya**, A Shabalin, 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) 29<sup>th</sup>-30<sup>th</sup> April 2021. Krasnoyarsk. Russian Federation.



9. **Хващевская, Л.Ф.** Изучение влияния корреляции конфигурационных параметров на точность прогнозирования при оценке доли успешных сборок / Л.Ф. Хващевская // Материалы XII Международной научно-технической конференции «Авиамашиностроение и транспорт Сибири», Иркутск 27 мая -01 июня 2019. – С.188-195.
10. **Хващевская, Л.Ф.** О проблемах пространственного размерного анализа на современном этапе развития машиностроения /Л.Ф. Хващевская // Материалы X Международной научно-технической конференции «Авиамашиностроение и транспорт Сибири», Иркутск 21-26 мая 2018. – С. 241-247.
11. **Хващевская, Л.Ф.** О методах размерного анализа на основе конфигурационной модели сборки / Л.Ф. Хващевская, Д.А. Журавлев, А.В. Шабалин // Материалы 1-ой международной научно-практической конференции “Технология машиностроения и материаловедение”, Новокузнецк, апрель 2017. – С. 68-70.
12. **Хващевская, Л.Ф.** Анализ точности 2D-сборки на основе модели векторного контура /Л.Ф. Хващевская // Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции «Тенденции развития науки и образования», Тамбов, 31 июля 2015. – Т.3. – С. 149-153.

### **Выводы**

Диссертационное исследование Хващевской Любови Фёдоровны «Повышение собираемости изделий машиностроения на основе конфигурационной модели размерной цепи» является законченным научным исследованием. Выполнено на высоком научном и методическом уровне, обладает существенной актуальностью. Диссертация обобщает самостоятельные исследования автора. Выдвинутые ею положения представляют собой научно обоснованные теоретические разработки, обеспечивающие решение важных прикладных задач в области обеспечения геометрической точности изделий и обеспечения собираемости. При выполнении диссертационной работы Хващевская Любовь Фёдоровна проявила себя зрелым научным работником.

**Расширенное заседание кафедры «Технологии и оборудование машиностроительных производств» принимает следующие решения:**

1. Признать, что по актуальности изученной проблемы, научной новизне, теоретической и практической полезности полученных результатов работа «Повышение собираемости изделий машиностроения на основе конфигурационной модели размерной цепи» удовлетворяет всем требованиям, предъявленным к кандидатским диссертациям.

2. Рекомендовать к защите диссертационную работу Хващевской Любови Фёдоровны «Повышение собираемости изделий машиностроения на основе конфигурационной модели размерной цепи» в диссертационном совете 24.2.307.01 при ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальностям 2.5.6. Технология машиностроения.



