

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «РОССИЙСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ –
МСХА имени К.А. ТИМИРЯЗЕВА»

УДК 621.71:631.3.004.67

На правах рукописи

ГРИНЧЕНКО ЛАВРЕНТИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА СБОРКИ СОЕДИНЕНИЙ
ПРИ РЕМОНТЕ МАШИН МЕТОДАМИ
ЦИФРОВИЗАЦИИ И РАЗМЕРНОГО АНАЛИЗА**

**Специальность 4.3.1 – Технологии, машины и оборудование
для агропромышленного комплекса**

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Шкаруба Нина Жоровна

Москва 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	12
1.1 Общая методика исследования способов обеспечения качества сборки соединений при ремонте машин методами цифровизации и размерного анализа	12
1.2 Анализ инструментов цифрового моделирования процессов ремонтного производства.....	16
1.3 Роль и место размерного анализа в обеспечении качества сборки соединений.....	19
1.4 Анализ влияния погрешности измерений на качество комплектации и сборки при ремонте машин	24
1.5 Анализ влияния параметров и факторов, влияющих на надёжность соединений «вал-уплотнение».....	28
1.5.1 Классификация соединений «вал-уплотнение», применяемых в сельскохозяйственной технике	28
1.5.2 Показатели качества резиновой армированной манжеты	31
1.5.3 Анализ факторов, влияющих на надёжность соединений «вал-уплотнение»	36
1.6 Выводы по первой главе.....	44
2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА СБОРКИ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ РЕМОНТЕ МАШИН МЕТОДАМИ ЦИФРОВИЗАЦИИ И РАЗМЕРНОГО АНАЛИЗА	46
2.1. Теоретические основы цифровизации процессов при ремонте машин	46
2.1.1 Разработка цифровой модели процесса комплектации и сборки для ремонтного производства.....	46
2.1.2 Мониторинг процесса сборки.....	52

2.2 Теоретические основы расчета размерных цепей для определения суммарного отклонения от соосности и радиального биения.....	54
2.3 Методика составления размерной цепи для выявления суммарного отклонения от соосности и радиального биения в соединении вала с манжетой	60
2.4 Методика расчета и выбора размеров компенсаторов с помощью размерного анализа	63
2.5 Выводы	66
3 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	67
3.1 Выбор средств измерений для контроля размеров деталей соединения «вал-уплотнение»	67
3.2 Методика определения закона распределения рассеяния размеров деталей соединений «вал-уплотнение».....	69
3.3 Нормирование допускаемой погрешности и выбор средств измерений при контроле отклонения формы и расположения поверхностей	71
3.4 Разработка компьютерной программы для расчета допуска звена размерной цепи в виде зазора	73
3.5 Выводы	74
4 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ.....	76
4.1 Исследование параметров рассеяния натягов в соединении выходного конца вала (фланца) КПП ЯМЗ с манжетой.....	76
4.2 Расчет суммарного отклонения от соосности выходного вала КПП ЯМЗ относительно манжеты	82
4.3 Исследование параметров размерной цепи выходного конца вала КПП ЯМЗ-239 относительно манжеты при использовании размеров, допустимых без ремонта.....	89
4.4 Обеспечение точности расположения осей валов редукторов методом компенсации	91

4.5 Нормирование шероховатости поверхностей валов в соединениях с резиновыми армированными манжетами	96
4.6 Использование метода групповой взаимозаменяемости для повышения качества сборки валов с манжетами в ремонтном производстве.....	103
4.7 Выводы	104
5 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ	107
ИССЛЕДОВАНИЙ.....	107
5.1 Расчёт экономического эффекта от применения цифровых средств	107
измерений при контроле фланца КПП.....	107
5.2 Оценка экономического эффекта от внедрения технологического процесса восстановления валов установкой ремонтной втулки для коробки передач силовых агрегатов ЯМЗ.....	113
5.3 Выводы	118
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	119
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	122
ПРИЛОЖЕНИЕ	142

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Диссертационное исследование направлено на решение проблемы обеспечения качества сборки соединений при ремонте машин и оборудования методами функциональной взаимозаменяемости и применением инструментов цифровизации. Выбранные направления улучшения процесса сборки обусловлены началом четвертой промышленной революции «Индустрия 4.0», которая предполагает новый подход к производству, основанный на массовом внедрении информационных технологий в промышленность, масштабной автоматизации бизнес-процессов и распространении искусственного интеллекта. В связи с этим, актуальным направлением в проектировании технологических процессов ремонтного производства является создание цифровых двойников [162]. Вместе с этим применение размерного анализа для обеспечения качества сборки в ремонтном производстве позволяет оценить влияние и определить точность сборки узлов аналитически еще на этапе проектирования технологического процесса.

Рациональная точность деталей, входящих в размерные цепи, где в качестве замыкающего звена выступают параметры, обеспечивающие заданную долговечность, должна предусматриваться еще в процессе проектирования и конструирования детали, узла и машины в целом, но может также корректироваться в процессе ремонта. Основным критерием в оценке применяемых норм взаимозаменяемости являются эксплуатационные показатели. Естественным, что все функциональные параметры должны иметь определенные пределы. В процессе конструирования или модернизации необходимо добиваться, чтобы все функциональные параметры деталей, узлов и агрегатов машин находились в пределах заданных допусков с учетом дальнейшего износа.

Применение расчетных методик и моделирование заданных параметров позволяет создать на этапе проектирования сборочные единицы и агрегаты, с такими параметрами точности входящих в них деталей, которые будут удовлетворять требованиям технологичности и обеспечивать гарантированную

надежность и долговечность. Такой подход позволяет значительно сократить затраты на испытания и доработку конструкции.

Актуальность и масштабность данной проблемы определяется тем, что взаимозаменяемость предполагает не только обеспечение физико-механических свойств материалов деталей и их поверхностного слоя, не только расчет кинематики, динамики и прочности деталей и сборочных единиц, но и норм точности по геометрическим параметрам (точность размеров, формы, взаимного расположения поверхностей).

Комплексный подход заключается в применении положений теории точности, функциональной взаимозаменяемости, теоретико-вероятностных методов расчета размерных цепей. Комплексный подход, обозначенный в диссертации, позволит создать полномасштабную модель расчета замыкающих звеньев в виде суммарного отклонения от соосности и суммарного радиального биения поверхности вала относительно манжеты, которая будет использована при конструировании и модернизации редукторов и коробок передач различной техники.

Степень разработанности. Исследования современных отечественных ученых базируются на научном фундаменте, заложенном в 50-70х годах прошлого века советскими учеными. Итогом многолетнего труда является справочник, составленный учеными А.И Голубевым и Л.А Кондаковым [112], где изложены теоретические и практические знания, а также накопленный опыт по вопросам изучения теории герметичности, теория уплотнительной техники и предложены критерии оценки качества уплотнений, в том числе методы распространения результатов частных исследований на типовые зависимости для разных видов уплотнений.

В настоящее время современные исследования, направленные на решение проблемы повышения надежности и долговечности уплотнительных узлов можно условно разделить несколько направлений:

- начиная с 50-х годов прошлого века, когда была создана маслобензостойкая резина на базе синтетических каучуков (эластомеров) и до

сегодняшнего момента, актуальными являются исследования, направленные на создание новых материалов манжет, а также выявление закономерности физических химических процессов, происходящих в элементах уплотнений [150, 31, 36, 42, 140, 60, 132, 130, 90];

- в процессе интенсивных работ по созданию теории уплотнительной техники разрабатываются новые типы и конструкции различных уплотнений, а также модернизация существующих геометрических форм и типов манжет [14, 29, 101, 59];

- выработка научно-обоснованных правил эксплуатации, включая исследования комплексных вопросов теории уплотнительной техники, выявление закономерности физических и химических процессов, происходящих в элементах уплотнений [58, 12, 81, 164, 174, 47, 100, 101];

- оценка влияния макро- и микрогеометрии поверхности сопрягаемых с манжетой валов, способов их обработки на износостойкость и долговечность соединения [10, 49, 135, 13, 35, 1]. Также в этом направлении проводятся исследования, связанные с расчетами натягов, допусков, размеров и допусков посадки в соединении уплотнительного узла [90, 134].

При этом следует отметить, что в большинстве работ для прогнозирования влияния различных факторов на величину утечек в уплотнительных узлах используется анализ вычислительной гидродинамики (CFD-анализ): сравнительных анализ по типу уплотнений [33]; критические условия работы уплотнительного узла [39, 41].

Как видно из представленного анализа, в заявленной области исследования ведутся во всем мире, однако исследований, воспроизводящих предлагаемый проект, на данный момент в научной литературе не описано. Хотя в научных исследованиях широко применяется размерный анализ для формирования таких норм точности, которые позволяют обеспечить заданную долговечность сборочных единиц [139, 142, 157], но применительно к уплотнительным узлам метод размерного анализа ранее не применялся.

Наибольший вклад в развитие теории точности машин и расчета размерных цепей внесли ученые из Санкт-Петербургского Института проблем машиноведения РАН (В.П. Булатов (директор инсититута), И.Г. Фридлендер, А.П. Баталов и др.). Но, к большому сожалению, все они ушли из жизни, а последняя 6-я сессия Международной научной школы «Фундаментальные и прикладные проблемы теории точности процессов, машин, приборов и систем» (Фридлендеровские чтения), которая, по сути, была посвящена памяти этих ученых, состоялась в 2005 г. Нет больше и лаборатории точности в этом НИИ. Существенный вклад в теорию и практику взаимозаменяемости деталей машин внесли профессора: А.И. Якушев, И.В. Дунин-Барковский (работавшие на оборонный комплекс СССР) и А.И. Иванов (в 1926 г. во время начала эксплуатации первых отечественных тракторов открыл классическую кривую изнашивания – изменение зазора в соединении), которые при развитии машиностроения России в 1970...1980-х годах прошлого века имели свои научные школы в этом направлении.

Цель исследования. Обеспечение качества сборки соединений при ремонте машин методами цифровизации и размерного анализа.

Задачи исследования. Для обеспечения качества сборки соединений при ремонте машин методами цифровизации и размерного анализа необходимо решить следующие задачи:

1. Определить основные характеристики процесса комплектации и сборки при ремонте КПП. Разработать цифровые модели процесса комплектации и сборки КПП в нотациях IDEF0 и BPMN.

2. Усовершенствовать методики размерного анализа для случаев составления и расчета: размерной цепи для соединения «вал- уплотнение»; размеров компенсаторов для приведения отклонения от соосности соединяемых с помощью муфты валов редукторов.

3. Провести апробацию теоретических исследований по составлению размерной цепи для соединения выходного вала КПП с манжетой и сформировать

рекомендации по возможным вариантам увеличения ресурса данного соединения с позиции норм точности.

4. Провести апробацию теоретических исследований по расчету и выбору компенсаторов отклонения от соосности валов для редукторов Н.094.44.000-323 и Н.090.20.000-121 картофелеуборочного комбайна КПК-2-01.

5. Рассмотреть возможности использования метода неполной взаимозаменяемости с целью обеспечения качества сборки соединений валов с манжетами при ремонте КПП.

6. Оценить экономическую эффективность применения цифровых средств измерений для контроля размеров фланца КПП после восстановления. Рассчитать экономический эффект от внедрения технологического процесса восстановления валов установкой ремонтной втулки коробки передач силовых агрегатов ЯМЗ.

Объектами исследования являются КПП и редукторы сельскохозяйственной техники с позиций обеспечения норм соосности выходных валов.

Предметом исследования являются методы функциональной взаимозаменяемости и инструменты цифровизации, применительно к процессу сборки КПП и редукторов сельскохозяйственной техники.

Научная новизна. Построена размерная цепь для замыкающего звена в виде отклонения от соосности манжеты относительно вала КПП ЯМЗ-239. Разработана методика расчёта размерной цепи, в которой отдельно выделены такие звенья как отклонения от соосности и радиальные биения.

Построена размерная цепь для замыкающего в виде отклонения от соосности валов редукторов картофелеуборочного комбайна КПК-2-01, соединяемых муфтой. Разработана методика расчёта количества и размеров компенсаторов для приведения отклонения от соосности к нормируемой величине.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость заключается в разработке методик расчета размерных цепей, где исходным замыкающим звеном является отклонение от соосности. Прикладная

значимость заключается в возможности уменьшения влияющих величин, т.е. повышения точности звеньев, входящих в размерную цепь, что оказывает существенное влияние на ресурс соединения.

Разработанная цифровая модель сборки позволит автоматизировать создание стандартов и инструкций, проводить мониторинг процесса и улучшать его параметры.

Результаты научного исследования могут быть использованы на ремонтных предприятиях, осуществляющих техническое обслуживание и ремонт отечественных машин и оборудования.

Методология и методы исследования. В исследованиях использованы положения теории точности, теории вероятности и математической статистики. Использовалась современная методика выбора средств измерений линейных размеров. Для создания цифровой модели процесса комплектации и сборки использованы методы: IDEF0, относящихся к классу методов IDEF, основанных на методологии SADT; BPMN – нотация, которая моделирует шаги запланированного процесса от начала до завершения.

Для оценки погрешности измерений отклонений формы и расположения поверхностей деталей при ремонте двигателя, а также для определения критериев выбора средств измерений использованы элементы теории вероятностей и математической статистики, теории точности и взаимозаменяемости. Результаты косвенных измерений и погрешность измерения (отклонение формы и расположения поверхностей деталей) рассматривалась как случайные величины, связанные с измеряемыми значениями (диаметры детали) функциональной зависимостью.

Основные положения, выносимые на защиту:

- цифровая модель процесса комплектации и сборки при ремонте КПП в нотациях IDEF0 и BPMN;
- методика составления размерных цепей, где в качестве замыкающего звена выступает отклонение от соосности и радиальное биение вала, относительно манжеты;

– методика расчёта количества и размеров компенсаторов для приведения отклонения от соосности к нормируемой величине.

Степень достоверности и апробация результатов работы. Положения диссертационной работы доложены на международных конференциях:

По материалам диссертации опубликовано 13 научных работ, в том числе 6 статей в изданиях, рекомендованных ВАК, 1 статья в изданиях, индексируемых в международных цитатно-аналитических базах данных.

Структура и объём работы. Диссертация включает введение, пять глав, заключение, список используемых источников информации из 174 наименования, и приложений на 1 страницах. Объем диссертации – 142 страницы, поясняется 37 таблицами и 27 рисунками.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Общая методика исследования способов обеспечения качества сборки соединений при ремонте машин методами цифровизации и размерного анализа

Методики проведения научного исследования необходима для обеспечения надежности, валидности и воспроизводимости результатов исследований. Формирование методики исследования направлено на определение приемов, способов исследования, порядка их применения и интерпретации полученных результатов. Общая методика исследования обеспечения качества сборки соединений при ремонте машин методами цифровизации и размерного анализа (рисунок 1.1) предусматривает изучение современного состояния проблемы, постановку цели и задач исследования, разработку теоретической модели и экспериментальные исследования, оценку экономического эффекта от проектных предложений.

Для изучения современного состояния вопросов, связанных с обеспечением качества сборки соединений при ремонте машин методами цифровизации и размерного анализа необходимо провести следующие исследовательский мероприятия:

1. проанализировать существующие инструменты цифрового моделирования процессов ремонтного производства, выявить их преимущества и недостатки, определить, какие нотации являются наиболее подходящими для моделирования технологических процессов ремонтного производства;
2. провести анализ процессов комплектации и сборки, определить роль и место размерного анализа в обеспечении качества сборки соединений;
3. оценить влияние погрешности измерений на качество комплектации и сборки при ремонте машин, определить направление для совершенствования метрологического обеспечения комплектации и сборки;

4. оценить применяемость соединений типа «вал-уплотнение» в сельскохозяйственной технике. Провести анализ параметров и факторов, влияющих на надёжность данного типа соединений. Определить необходимость применения размерного анализа с целью повышения качества сборки соединений типа «вал-уплотнение».

Теоретическое исследование направленно на совершенствование и разработку средств и методов обеспечения качества сборки при ремонте машин методами цифровизации и размерного анализа, а именно:

- разработку цифровой модели процесса комплектации и сборки КПП в нотациях IDEF0 и BPMN;
- усовершенствование методики составления размерной цепи для выявления суммарного отклонения от соосности и радиального биения в соединении вала с манжетой;
- усовершенствование методики расчета и выбора размеров компенсаторов с помощью размерного анализа.

Для проведения экспериментальных исследований необходимо:

- разработать методику нормирования допускаемой погрешности и выбор средств измерений при контроле отклонения формы и расположения поверхностей на этапе комплектации деталей;
- выбрать средства измерений, для контроля размеров деталей соединения «вал-уплотнение»;
- составить методику для оценки закона распределения рассеяния размеров деталей соединений «вал-уплотнение»;
- разработать компьютерную программу для расчета допуска звена размерной цепи в виде зазора.

Апробация теоретических исследований по обеспечению качества сборки при ремонте машин включает в себя:

- экспериментальное обоснование целесообразности применения размерного анализа для повышения качества соединений выходного конца вала

(фланца) КПП ЯМЗ с манжетой, для этого необходимо провести исследование параметров рассеяния натягов в данном соединении;

- апробацию методики составления и расчета размерной цепи для выявления суммарного отклонения от соосности и радиального биения на соединении выходного вала КПП ЯМЗ с манжетой;

- апробацию методики обеспечения точности расположения осей валов редукторов методом компенсации на примере редукторов Н.094.44.000-323 и Н.090.20.000-121 картофелеуборочного комбайна КПК-2-01;

- проведение нормирования шероховатости поверхностей валов в соединениях с резиновыми армированными манжетами с целью обеспечения качества соединения;

- апробацию метода групповой взаимозаменяемости для повышения качества сборки валов с манжетами в ремонтном производстве.

Оценка экономического эффекта осуществляется согласно принятым стандартным методикам, а также с помощью методов, разработанных в данной исследовательской работе.

Завершающим этапом диссертационной работы является разработка научно обоснованных рекомендаций по обеспечению надежности посадки в цилиндрических поверхностях приводов со шпонками.

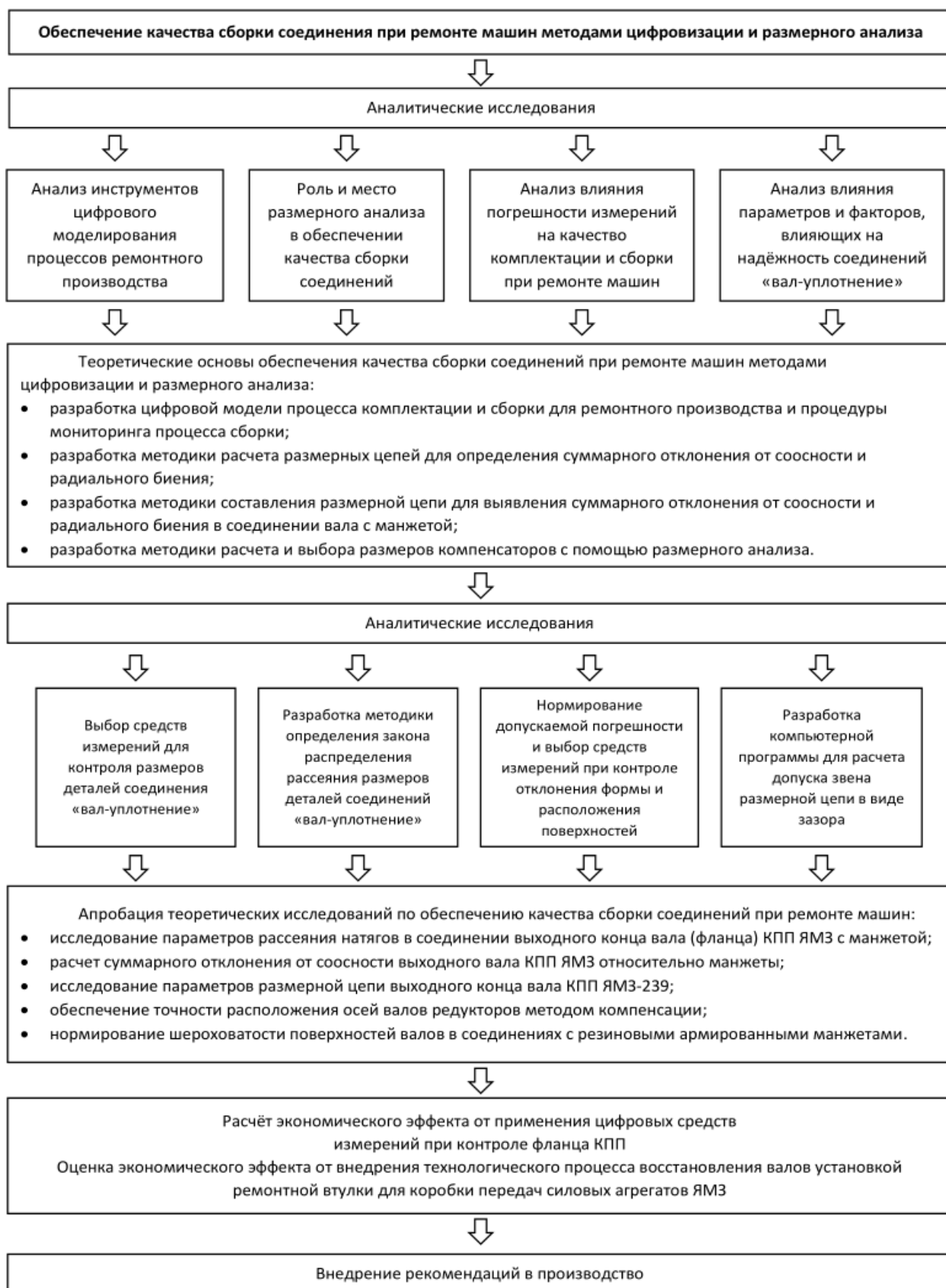


Рисунок 1.1 – Структурная схема исследований

1.2 Анализ инструментов цифрового моделирования процессов ремонтного производства

В настоящее время, в условиях цифровизации и автоматизации производства, в рамках концепции «Индустрии 4.0» традиционное представление технологического процесса в виде комплекта технологических документов, как правило, в бумажном виде, представляется устаревающим. В связи с этим, актуальным направлением в проектировании технологических процессов является создание цифровых двойников [162].

Цифровое моделирование деятельности предприятий или организаций чаще всего основывается на управлении бизнес-процессами. Бизнес-процессом называют совокупность действий, реализуемых в рамках деятельности организации, направленных на достижение предварительной заданной цели [40]. При работе с бизнес-процессами, их чаще всего разбивают на следующие элементы: вход – некоторый ресурс или их совокупность необходимые для начала процесса, выход – результат деятельности проводимой в рамках бизнес-процесса, процесс – совокупность действий, направленных на преобразование входы в выход и участник процесса – сотрудники, службы или другие системные единицы, реализующие процесс. В зависимости от среды и условий моделирования элементы могут изменяться и дополняться. При моделировании бизнес-процессов создается модель, в которой текстовым или графическим, образом отображаются элементы бизнес-процесса и взаимодействие между ними. Подобное визуальное представление деятельности предприятия или организации, позволяет систематизировать необходимую информацию для её лучшего понимания и помогает определить части и составляющие процесса, которым требуются изменения [18, 126].

Существуют различные методологии для представления, описания и моделирования бизнес-процессов, одной из первых и при этом широко используемой в настоящее время является IDEF0. IDEF0 (Integration Definition for Function Modeling) – нотация графического моделирования, широко

применяемая для описания бизнес-процессов во всех странах мира. Данная нотация создана в 1981 г. совместно со специально для неё разработанной системой BPwin в США, и там же была принята в качестве федерального стандарта для обработки информации в 1993 г. [170]. В Российской Федерации данная методология не имеет статуса стандарта, а правила по её применению приведены в Руководящем документе «Методология функционального моделирования IDEF0» [145].

Несмотря на то, что изначально для моделирования в данной нотации предполагалась система BPWin, сегодня существует широкий спектр программного обеспечения, поддерживающий методологию IDEF0, при этом дополняя некоторые её функции и предоставляя возможность комбинировать её с другими методологиями и нотациями.

Нотация IDEF0 применяется для построения диаграмм двух видов – это контекстная диаграмма и диаграмма декомпозиции. Контекстная диаграмма служит для отображения моделируемого процесса в целом, а также его связи с внешней средой, она представляет собой самый верхний уровень модели. Контекстная диаграмма состоит из одного блока, отображающего объект моделирования, а также из стрелок, идущих в него и из него. Поскольку контекстная диаграмма является основой всей модели, в качестве идентифицирующего номера блока служит – 0.

Диаграмма декомпозиции является следующим уровнем модели, разделяющим функции на подфункции, отражая их связи и последовательность реализации. Данный вид диаграммы состоит из нескольких блоков (согласно [145] от 3 до 6) и стрелок, блоки располагаются, начиная с верхнего левого угла по диагонали в правый нижний с последовательным присвоением номеров. Блоки связаны между собой стрелками, для наглядного изображения этапов преобразования объектов «входа» в объекты «выхода». На основе любого из блоков может быть построена своя диаграмма декомпозиции, до достижения необходимого уровня детализации процесса [66].

Графическое описание процесса, в виде модели построенной в нотации IDEF0, способно значительно облегчить восприятие всего процесса в целом, показывая взаимодействие всех элементов участвующих процессов, с гибко настраиваемым уровнем детализации [23]. Однако данная нотация была создана в конце 20-го века и её возможностей не всегда достаточно для условий современных организаций [171], поэтому передовые предприятия часто используют цифровые модели своей деятельности построенные с применением различных нотаций. Одной из таких является нотация BPMN.

BPMN (Business Process Model and Notation) – нотация моделирования бизнес-процессов, предназначенная для построения графической схемы алгоритма выполнения процесса. Чаще всего применяется для описания процессов нижнего уровня [57].

В нотации BPMN, как правило, используется большее количество графических элементов, чем в IDEF0. Они разделены на пять категорий: элементы потока, данные, соединяющие элементы, зоны ответственности и артефакты [15].

Еще одна широко применяемая нотация моделирования EPC (Event-driven Process Chain). EPC предназначена для описания порядка выполнения процесса в виде последовательности действий, управляемых событиями и выполняемых исполнителями. Нотация разработана в 1990-х годах как нотация для работы с системой SAPR. Как правило, нотация ориентирована на описание высокоуровневых процессов. Одним из главных правил построения модели процесса в нотации EPC – это чередование любого действия и события. Это увеличивает количество элементов схемы и делает её более громоздкой по сравнению с BPMN. С другой стороны, нотация EPC более понятна, так как в ней мало элементов и даже человек не знакомый с нотацией сможет легко прочесть и разобраться в EPC-диаграмме.

В целом для описания процессов в общем виде одинаково подходят обе нотации, но нотация BPMN имеет большое количество элементов, связанных с автоматизацией процессов (триггеры, сообщения, потоки

данных и так далее). Кроме того, в нотации есть возможность отображения участников процесса в виде отдельных дорожек, что позволяет наглядно показать разделение ответственности между ними. Таким образом, использование BPMN нотаций позволяет решать задачи по моделированию процессов и по автоматизации деятельности предприятия.

1.3 Роль и место размерного анализа в обеспечении качества сборки соединений

Сборка является неотъемлемой операцией технологического процесса изготовления и ремонта машин и оборудования. В процессе сборки осуществляется последовательное соединение и фиксация деталей, составляющих сборочную единицу.

Сборка может осуществляться простым соединением деталей, их запрессовкой, свинчиванием, сваркой, пайкой, клепкой и т.д. По своему объему сборка подразделяется на:

- общую сборку, объектом которой является изделие в целом;
- узловую сборку, объектом которой является составная часть изделия, т.е. сборочная единица или узел (рисунок 1.2).

На первом этапе сборки осуществляют проверку комплектности деталей и сборочных единиц, поступивших на сборку. При комплектовании могут быть использованы различные методы:

- метод групповой взаимозаменяемости – метод, при котором требуемая точность сборки достигается путем соединения деталей, относящихся к одной из размерных групп, на которые они уже рассортированы. Этот метод используют при селективной сборке, когда необходимо обеспечить высокую точность. Недостатком данного метода является то, что детали при сортировке по размерным группам распределяются неравномерно в следствии чего, возникает

«незавершенное производство», когда часть деталей невозможно использовать, так как для них нет соответствующей парной детали.

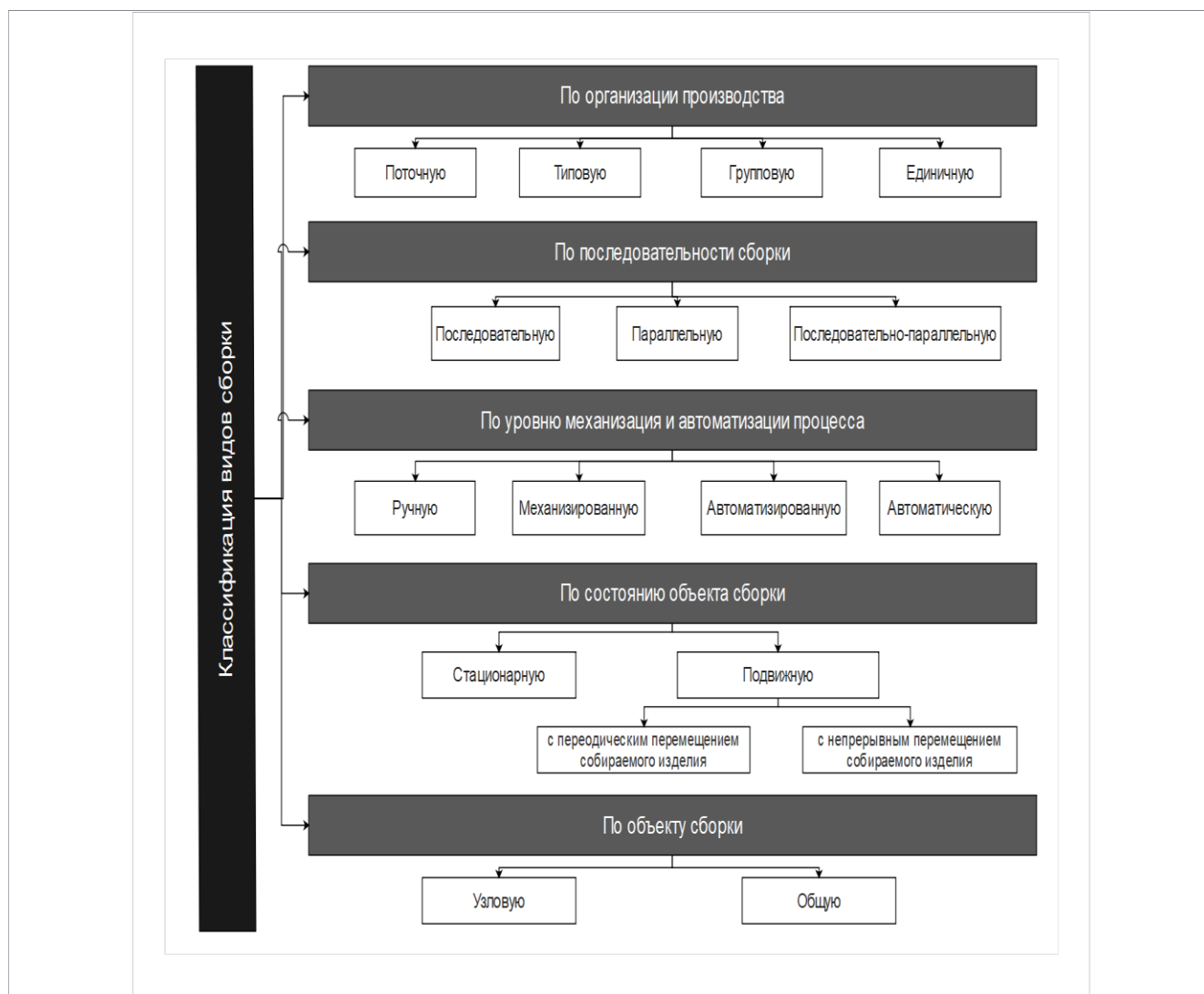


Рисунок 1.2 – Классификация видов сборки

– метод регулирования – при данном методе требуемая точность сборки получается путем модификации размера одной из деталей (или группы деталей) соединения, называемой компенсатором, без снятия слоя материала;

– метод пригонки – метод, при котором требуемая точность сборки достигается путем изменения размера компенсатора со снятием слоя материала.

Важнейшей характеристикой качества сборки является точность. Точность сборки характеризует степень близости действительных значений параметров

собираемого изделия значениям, заданным в технической документации. Точность сборки зависит от множества факторов. Рассмотрим основные из них:

- параметры микрогеометрии деталей, поступающих на сборку после комплектования, таких как точность размеров и формы;
- параметры микрогеометрии сопрягаемых деталей, таких шероховатость;
- взаимного положения деталей при сборке;
- технического состояния средств технологического оснащения,
- деформации системы «оборудование – приспособление – инструмент – изделие» в момент выполнения сборки и т.п.

Контроль сборки выполняется с использованием средств измерений, которые выбирают с учетом метрологических (диапазон измерений, диапазон показаний, точность, погрешность, цена деления и т.д.) и экономических (стоимость, затраты на поверку, потери от погрешности измерений и т.д.) характеристик [168159].

Основной риск снижение точности сборочной операции – получение некачественной посадки в соединении, в которой будут нарушены функциональные зазоры и натяги, а также требования к точности взаимного расположения деталей. Несмотря на то, что посадка – это соединение двух деталей, на качество посадки будут влиять точность размеров и формы не только этих деталей, но и параметры размеров и формы других взаимоувязанных деталей, обеспечивающих в комплексе нормальную работу узла, механизма или машины в целом. Исходя из этого, допуски на изготовления и износ деталей должны определяться с учетом их взаимосвязи. Расчетное обоснование этих допусков проводят на базе теории размерных цепей, которая рассматривает относительное положение различных объектов, сборочных единиц, деталей и поверхностей деталей с позиций получения точности определенных параметров узла, механизма или машины в целом [88]. Применение размерного анализа

позволяет оценить влияние определить точность сборки узлов аналитически на этапе проектирования.

Первые теоретические работы по размерному анализу были опубликованы в 1933 г. Б.С. Балакшиным [44, 45], дальнейшее развитие теории размерного анализа получило в научных трудах Н.А. Бородочева [54, 55], который теоретически обосновал необходимость использования в размерном анализе теории вероятности и математической статистики. Установление рациональных допусков на размеры, определяющие взаимное расположение осей и поверхностей, не только обеспечивает взаимозаменяемость, но и облегчает процесс сборки, а также создает условия для длительной эксплуатации машин [104].

Размерная цепь представляет собой замкнутый контур взаимосвязанных размеров, определяющих их численные значения и допуски. Всякий размер, входящий в размерную цепь, называют звеном размерной цепи. Как правило, каждая размерная цепь состоит из нескольких составляющих звеньев и одного исходного (замыкающего) звена. Кроме этого, в отдельных случаях, в размерную цепь могут быть включены другие виды звеньев, например, компенсирующее звено.

В зависимости от расположения размеров размерные цепи подразделяются на:

- линейные, состоящие из взаимно параллельных линейных размеров, обозначаемых прописными буквами русского алфавита;
- угловые, звеньями которых являются угловые размеры, обозначаемые строчными буквами греческого алфавита (кроме α , δ , ξ , λ и ω);
- плоские, звенья которых расположены в одной или нескольких параллельных плоскостях;
- пространственные, звенья которых расположены в непараллельных плоскостях.

В теории размерных цепей существуют две задачи:

– прямая задача (проектная), заключается в определении допуска и предельных значений отклонений всех составляющих звеньев размерной цепи при заданном допуске и заданных значениях предельных отклонениях замыкающего (исходного) звена;

– обратная задача (проверочная) – нахождение интервала возможных значений замыкающего звена по установленным в чертежах предельным отклонениям составляющих звеньев.

Нормирование точности отдельных сборочных единиц и соединений является достаточно сложной задачей и требует индивидуального подхода в каждом случае [20, 34]. Многие функциональные параметры можно определить только после сборки с помощью методов расчета размерных цепей [147, 62, 163]. В ряде случаев размерный анализ применяется для определения эксплуатационных характеристик изделий [62, 50]. Характеристики норм точности звеньев размерной цепи назначаются по требованиям единой системы допусков и посадок, при этом при производстве используют технологии допускового контроля с целью обеспечения качества сборки.

В зависимости от того, учитывается или не учитывается при расчете распределение размеров звеньев цепи в границе поля допуска, различают два метода расчета: максимум-минимум и теоретико-вероятностный.

При методе расчета на максимум-минимум предполагается, что даже, если все увеличивающие звенья цепи будут наибольшего размера, а уменьшающие – наименьшего, или наоборот, то и в наихудшем сочетании звеньев размер замыкающего звена не выйдет за установленные пределы. При вероятностном методе расчета размерных цепей учитывается характер рассеяния действительных размеров звеньев случайный характер сочетания этих размеров деталей при сборке.

Задача расчета размерных цепей решена во многих CAD системах, например, в системе КОМПАС. Используя эту библиотеку можно рассчитать размерную цепь, но проблема состоит в том, что размерную цепь необходимо предварительно составить.

Составление размерной цепи не менее важно, чем ее правильный расчет, но оно намного сложнее, поскольку требования по точности, определяющие работоспособность конкретной сборочной единицы, как правило, индивидуальны. Индивидуальна и конфигурация (состав входящих в размерную цепь звеньев) конкретной размерной цепи, в то время как, формулы для расчета размерных цепей одинаковы и зависят только от выбранного метода достижения точности и характера составляющих звеньев. При этом неправильно составленная размерная цепь однозначно приведет к неверному результату расчета и соответственно к неверной оценке работоспособности узла или механизма.

1.4 Анализ влияния погрешности измерений на качество комплектации и сборки при ремонте машин

Одним из важных факторов, влияющих на качество процесса комплектации и сборки, является уровень метрологического обеспечения [121, 166]. В современных условиях, на ремонтных предприятиях регулярно возникают ситуации, когда на комплектацию и сборку поступают запчасти и комплектующие из разных и независимых друг от друга источников. Такая ситуация оказывает значительное влияние на качество комплектации и сборки и, как следствие, в целом на качество ремонтного процесса. Поэтому важным является создание на ремонтном предприятии эффективной системы верификации запасных частей и комплектующих [116]. Кроме этого, отличительной особенностью ремонтного процесса является наличие на сборочной операции изношенных и восстановленных деталей. С этой стороны необходимо особое внимание уделять не только качеству процесса комплектации, но и качеству и уровню метрологического обеспечения процесса дефектации изношенных деталей [165, 53]. Совокупность мероприятий по повышению качества дефектации и верификации запасных частей, комплектации и сборки оказывает положительное влияние на уровень качества ремонта в целом, что в конечном итоге снижает потери от внутреннего и внешнего брака на ремонтном предприятии [95, 51, 56].

Главными целями ремонта машин является восстановление прочности, долговечности и точности деталей. Методы расчета норм точности при ремонте машин постоянно совершенствуются [21, 4], также применяются методы неполной взаимозаменяемости [5, 97]. Повышение точности измерений отклонений размеров и формы, как влияющих звеньев размерной цепи, увеличивает срок службы уплотнений в редукторах и других узлах машин и агрегатов [9, 94].

Отклонения формы и расположения элементов поверхностей ответственных деталей, которые подлежат обязательной дефектовке при ремонте, значительно влияют на эксплуатационные свойства соединений. В неподвижных соединениях большие значения этих отклонений приводят к неравномерности натягов в соединениях, из-за чего снижается прочность соединения, герметичность и точность центрирования, в подвижных соединениях – к увеличению износа сопрягаемых поверхностей и снижению долговечности.

По данным академика Черноиванова В.А. [161], уменьшение конусообразности, седлообразности и овальности шеек коленчатого вала с 0,01 до 0,006 мм позволяет в 2,5...4 раза увеличить ресурс вкладышей, эти же положения относятся и к унифицированным соединениям в технике [122]. В диссертации [149] доказано, что отклонения от соосности коренных опор коленчатого вала оказывает значительное влияние на эксплуатационные показатели двигателя (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Влияние отклонения от соосности коренных опор коленчатого вала на эксплуатационные показатели двигателя ЗИЛ-130

Показатель	Значение показателей отклонения от соосности коренных опор коленчатого вала, мм			
	0,02	0,05	0,1	0,2
Мощность двигателя, кВт	106,1	105,8	105,4	104,0
Удельный расход топлива, мкг/Дж	98,9	99	101,0	103,0
Коэффициент неравномерности работы	0,95	0,95	0,94	0,93

Несоблюдение норм отклонений формы и расположения поверхностей может привести к росту трудоемкости и снижению точности сборки, увеличению объема операций по подгонке и снижению показателей долговечности работы двигателей. С точки зрения теории машин и механизмов, из-за погрешностей кинематических связей, вызываемых данными отклонениями, в отдельных деталях и соединениях могут возникнуть дополнительные статические и динамические нагрузки, что приведет к быстрому износу и усталостному разрушению деталей.

В технических требованиях на капитальный ремонт и справочниках по ремонту двигателей для контроля отклонения формы и расположения поверхностей, как правило, рекомендуют использовать те же средства измерений, что и для контроля линейных размеров [84] (таблица 1.2).

Из данных таблицы 1.2 видно, что при выборе средств измерений для контроля отклонений формы и расположения поверхностей не учитывается допускаемая погрешность контролируемого параметра и вид измерения. Величины контролируемых параметров, рассмотренных в таблице 1.2, определяют через формулы расчета результатов косвенных измерений. Поэтому при выборе средств измерений необходимо учитывать формулу расчета контролируемого параметра.

Отсутствие научно обоснованного, единого подхода к выбору средств измерений для контроля отклонений формы и расположения поверхностей при ремонте двигателей, делает актуальной работу по созданию рекомендации по совершенствованию метрологического обеспечения контроля таких важных параметров, как отклонения формы и расположения поверхностей ответственных деталей. Это особенно важно при дефектации, так как в результате анализа изношенной поверхности делается заключение о годности для ее дальнейшего использования при соединении с новой или изношенной деталью.

Таблица 1.2 – Рекомендуемые контрольно-измерительные приборы для контроля отклонений формы и расположения поверхностей

Контролируемый параметр	Контрольно-измерительные приспособления и приборы				Область применения (марка двигателя)
	Наименование	Диапазон измерения, мм	Цена деления, мм	Погрешность измерения, мкм	
Овальность и конусообразность шеек коленчатого вала	Микрометры: МК-75-1;	50-70	0,01	±10	Все марки
	МК-100-1;	75-100	0,01		
	МК-125-1;	100-125	0,01		
	МК-200-2.	175-200	0,01		
Овальность и конусообразность отверстия гильз цилиндров	Нутромер индикаторный НИ-160	100-160	0,01	±25	Все марки
Овальность посадочных поясков гильз цилиндров	Микрометры: МК-150-1,	125-150	0,01	±10	Все марки
	МК-175-1	150-175	0,01		
Биение относительно общей оси: коренных шеек; поверхности под шестерню	Приспособление индикаторное для контроля в центрах	0-2	0,01	±10	ЯМЗ-238; ЯМЗ-240
Биение относительно оси крайних коренных опор: средних коренных шеек; поверхности под шкив	Приспособление индикаторное для комплексного контроля на призмах	0-2	0,002	±6	СМД-60; СМД-14
	Приспособление индикаторное на призмах	0-2	0,01	±10	ЯМЗ-238; ЯМЗ-240
Овальность и конусообразность поршневого пальца	Скоба рычажная СР-50	25-50	0,002	±5	Все марки
Овальность отверстия нижней головки шатуна	Нутромер индикаторный НИ 154	50-100	0,002	±5	Все марки

Таким образом, для обеспечения качества сборки необходимо разработать рекомендации по совершенствованию метрологического обеспечения контроля отклонений формы и расположения поверхностей деталей при ремонте машин.

Для достижения поставленной цели необходимо определить критерии выбора средств измерений для контроля отклонений формы и расположения поверхностей деталей с учетом формулы их расчета, как результата не прямого, а косвенного измерения.

1.5 Анализ влияния параметров и факторов, влияющих на надёжность соединений «вал-уплотнение»

1.5.1 Классификация соединений «вал-уплотнение», применяемых в сельскохозяйственной технике

Широкое разнообразие уплотнительных устройств делает их классификацию затруднительной, поэтому единой иерархической системы или общего классификатора уплотнителей на данный момент не создано. Группировать существующие уплотнители можно по двум принципам: по назначению и по виду контакта. Схематично классификация уплотнителей представлена на рисунке 1.3.

По назначению уплотнительные устройства подразделяются в зависимости от степени подвижности уплотняемого соединения [112]. Уплотнение, входящее в одну категории может быть использовано в другой, примером являются уплотнительные кольца, которые можно применить в практических любых разъемных соединениях. Данное разделение в большей степени предназначено для потребителя, позволяя ему выбрать уплотнения нужных типов, в зависимости от того к каким условиям будет проходить эксплуатация кинематической пары.

Уплотнительные устройства, классифицируемые по виду контакта, являются подвижными. В существующих научных исследованиях их подразделяют на:

- контактные (уплотнительный эффект достигается за счет прижатия уплотнителя к подвижным частям);

– бесконтактные (уплотнительный эффект достигается за счет гидравлических сопротивлений в зазорах), комбинированные (уплотнительных эффект может достигаться контактным или бесконтактным способами) [71, 85, 109, 113, 114].

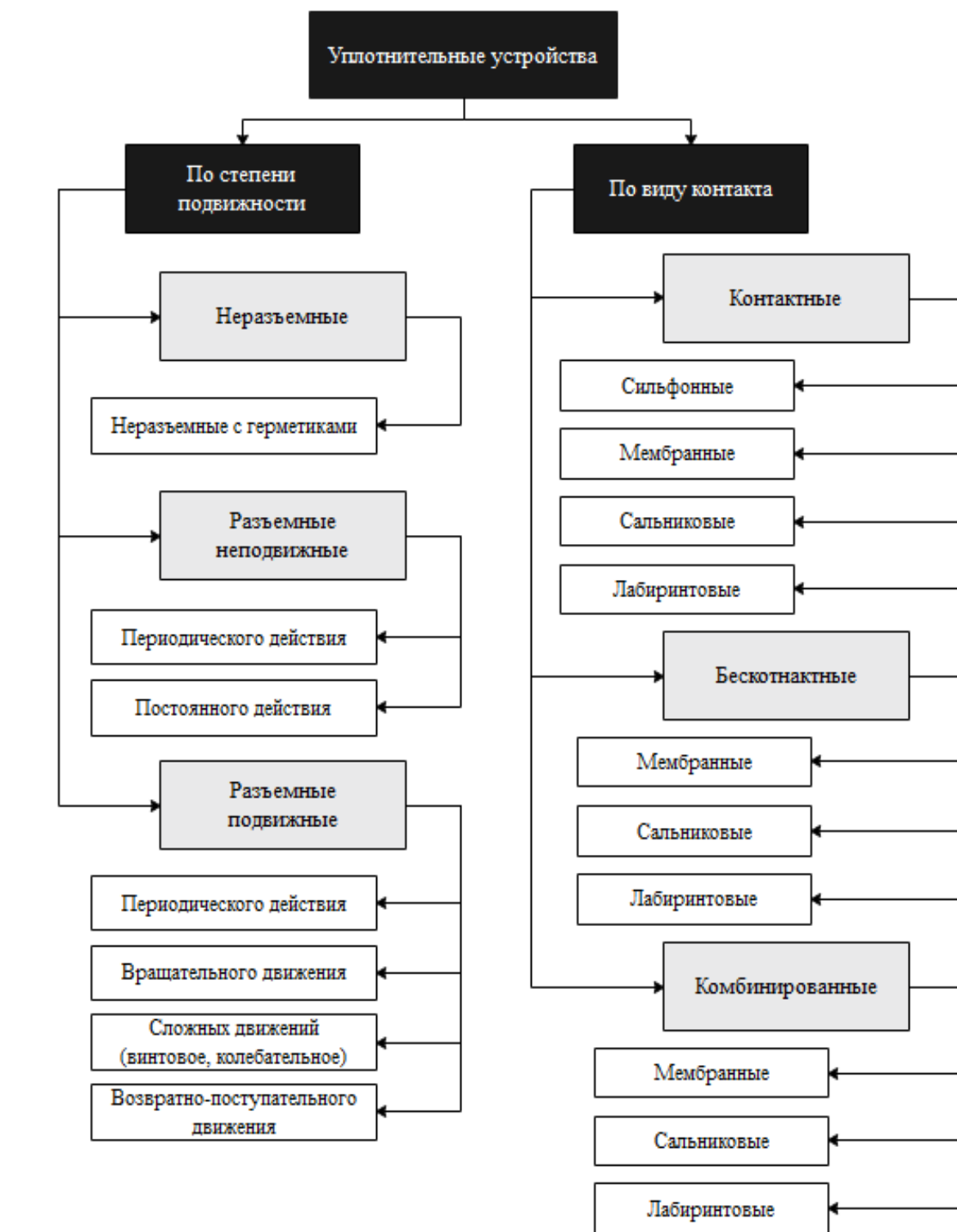


Рисунок 1.3 – Классификация уплотнительных устройств

В связи со спецификой работы сельскохозяйственных машин, использующиеся в них уплотнительные устройства, подвержены быстрому износу и требуют частой замены. Наиболее простыми при эксплуатации и ремонты, и при этом дешевыми являются уплотнительные устройства контактного вида, из-за чего именно они используются в сельскохозяйственной технике [68, 99, 146, 158], особенно распространены армированные манжеты (рисунок 1.8 а).

Армированная манжета является радиальным уплотнителем, имеющим кольцевую форму, укрепленную металлической пружиной или каркасом, обеспечивающей дополнительное прижатие. Данные манжеты могут иметь различную конструкцию, если необходима защита от проникновения пыли манжеты изготавливаются с пыльником, для работы в среде со значительным загрязнением применяют манжеты с двумя гребешками. Армированные манжеты могут иметь канавки, волнистые – для дополнительной защиты от протеканий в осевом направлении или винтовые – для предотвращения утечек при больших радиальных биениях и вибрациях. Классификация армированных манжет представлена на рисунке 1.4.



Рисунок 1.4 – Классификация резиновых армированных манжет

Несмотря на свое разнообразии все манжеты разделяют некоторые недостатки. В связи с контактом манжеты с вращающимся валом возникает трение, приводящее к потерям энергии, а также изнашиванию вала в контактной зоне.

Общие преимущества применения армированных манжет любых конструкций заключаются в скорости их установки и снятия при ремонте, низкая цена и плотный контакт с поверхностью за счет пружины или каркаса.

1.5.2 Показатели качества резиновой армированной манжеты

Несмотря на большое количество факторов, влияющих на качество уплотнительного узла, ключевым из них является качество резиновой армированной манжеты, это обусловлено необходимостью замены установленной

на валу манжеты во время ремонта двигателя, при том что вал поддается ремонту в 10...80 % случаях [118].

Несмотря на то, что резиновая армированная манжета является простым и легким в применении уплотнителем, качество её работы зависит от множества факторов. Для систематизации показателей качества армированной резиновой манжеты использована древовидная диаграмма, представленная на рисунке 1.5.



Рисунок 1.5 – Дерево свойств «Качество резиновой уплотнительной манжеты»

На построенной древовидной диаграмме представлены основные параметры, влияющие на качество манжеты. Для дальнейшего раскрытия ключевых требований проведен анализ, в котором рассмотрим характеристики каждого выделенного фактора и метод его контроля. Результаты анализа представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Анализ ключевых факторов качества резиновой уплотнительной манжеты

Фактор	Показатель	Метод контроля	Значения
Физико-механические показатели			Для групп резин:
Условная прочность, МПа, не менее	Определяет способность манжеты сопротивляться внутренним напряжениям возникающим в процессе работы	Показатель определяется расчётное, на основе данных полученных при разрушающем контроле образца и з того же материала. Зависит от силы вызвавшей необходимой для разрыва образца	1 гр.: 9,8 2 гр.: 9,8 3 гр.: 9,8 4 гр.: 19,6 5 гр.: 11,8 6 гр.: 6,4
Относительное удлинение, %, не менее	Характеризует изменение длинны манжеты под воздействием рабочих нагрузок	Показатель определяется расчётное, на основе данных полученных при разрушающем контроле образца и з того же материала. Зависит от расстояния между наплывами у образца до и после испытаний	1 гр.: 200 2 гр.: 200 3 гр.: 120 4 гр.: 90 5 гр.: 65 6 гр.: 220
Твердость, в пределах: по Шору А в усл. ед.; в международных ед.,	Определяет механическую прочность и пластичность манжеты	Определяется с помощью твердомера, в зависимости от глубины погружения прибора в испытуемый образец, в течении определенного времени.	1 гр.: 65...85; 70...85; 2 гр.: 75...85; 70...85; 3 гр.: 70...85; 70...85; 4 гр.: 76...86; 75...90; 5 гр.: 70...90 72...86; 6 гр.: 66...78; -

Фактор	Показатель	Метод контроля	Значения
Физико-механические показатели			Для групп резин:
Морозостойкость	Отражает способность выдерживать замерзания, с сохранением формы, и отсутствием поверхностных деформаций	Манжета охлаждается в специальном приспособлении, после чего проводится обкатка, при обнаружении трещин манжета бракуется	Недопустимо наличие трещин и вырывов резины на поверхности
Геометрические показатели			Для размеров:
Разностенность, мм	Характеризует несовпадение толщины внутренней поверхности по длине внутренней поверхности манжеты	Измеряется с помощью индикатора часового типа, при вращении манжеты установленной в специальном устройстве	10...14 мм.: 0,2 14...71 мм.: 0,3 71...125 мм.: 0,4 125...250 мм.: 0,6 250...500 мм.: 0,9
Отклонение наружного диаметра, мм	Разность измеренного значения наружного диаметра манжеты с номинальным значением	Измеряется средствами измерений для наружных размеров требуемой точности, в трех диаметральных сечениях распределенных по окружности	0...30 мм.: +0,35 +0,15 30...80 мм.: +0,40 +0,20 80...150 мм.: +0,50 +0,30 150...240 мм.: +0,60 +0,30 240...290 мм.: +0,60 +0,30 290...440 мм.: +0,70 +0,40 440...550 мм.: +0,70 +0,40
Отклонения внутреннего диаметра, мм	Разность измеренного значения внутреннего диаметра манжеты с номинальным значением	Измеряется средствами измерений для внутренних размеров соответствующей точности, до комплектации пружинами	Изменение внутреннего диаметра не больше 70%, при наличии Знака гос. качества 60%

Фактор	Показатель	Метод контроля	Значения
Физико-механические показатели			Для групп резин:
Овальность, мм	Характеризует различие между минимальным и максимальным диаметрами (внутреннем и наружным) в поперечном сечении	Манжета устанавливается на специальное устройство, между тремя роликами, после чего проводится визуальный, оптический или контактный контроль	0...30 мм.: 0,25 30...80 мм.: 0,35 80...150 мм.: 0,50 150...240 мм.: 0,65 240...290 мм.: 0,80 290...440 мм.: 1,00 440...550 мм.: 1,00
Состояние поверхности			
Нарушения внешнего вида	К нарушениям внешнего вида относятся матовость, разнотонность, муаровый рисунок, потертость глянца	Визуальный осмотр, сравнение с контрольным образцом	Наличии незначительных изменений окраса допускается
Поверхностные деформации	К поверхностным деформациям относятся: наличие возвышений и углублений на рабочей поверхности; наличие ступеньки на развилках манжеты; трещины, пористости, расслоения, пузыри	Визуальный осмотр, сравнение с контрольным образцом	При обнаружении деформаций поверхностей манжета бракуется

Представленные в таблице 1.3 показатели качества позволяют количественно оценить уровень качества армированной манжеты. Физико-механические показатели дают возможность оценить способность манжеты сохранять работоспособность в условиях эксплуатации [80]. Выбор манжеты происходит на основе геометрических показателей, характеризующих точность её изготовления. Если в уплотняемом соединении размеры вала и манжеты не соответствуют друг другу, то в соединении будет нарушена герметичность [117]. По состоянию поверхности можно определить значительную часть дефектов и определить необходимость их замены. К поверхностным деформациям относятся наличие возвышений и углублений на рабочей поверхности; наличие ступеньки на развилках манжеты; трещины, пористости, расслоения, пузыри. Манжеты, имеющие поверхностные дефекты обладают меньшим ресурсом, что приводит к

преждевременным нарушения герметичности и, как следствие, утечкам [103]. Наличие поверхностных дефектов свидетельствует о необходимости срочной замены манжеты.

Анализ частоты возникновения дефектов, приводящих к выходу из строя подшипникового узла, представленного в таблице 1.4, показал, что самой частой причиной нарушения работы подшипника является зазор, превышающих предельные размеры, между валом и уплотняющим его манжетой.

Таблица 1.4 – Распределение выбракованных подшипников качения по видам повреждений [91]

Вид повреждения	Частота возникновения, %
Чрезмерный зазор между валом и манжетой	68
Недостаточная плотность посадки	18
Микродефекты рабочих поверхностей подшипника	9
Поломка деталей подшипников	5

Нарушения оптимального зазора, приводят к попаданию абразива и смазочных материалов в область подшипника и ускоренному износу составляющих деталей подшипника. Нарушение режима подачи свежей смазки в свою очередь могут привести к выворачиванию манжеты под давлением смазки, сбрасыванию пружинного кольца и потере герметичности уплотнения [134].

1.5.3 Анализ факторов, влияющих на надёжность соединений

«вал-уплотнение»

Соединения «вал-уплотнение», в качестве которого чаще всего используются резиновые манжеты различных конструкций, находится под постоянным воздействием множества факторов, взаимодействующих друг с другом [76, 143].

Источники данных воздействий разнообразны, но чаще всего носят конструкторско-технологический или эксплуатационный характер [111], также на

надежность уплотнителя значительное влияние оказывают ремонтные взаимодействия [48].

Надежность соединения «вал-уплотнение» зависит не только от характеристик составляющих его уплотнителя и вала, но и от совокупных параметров, зависящих от условий эксплуатации, действующих нагрузок и особенностей среды в которой работает соединение. В результате влияния всех этих факторов происходит износ вала и манжеты (рисунки 1.7 и 1.8).

Классификация факторов, влияющих на надёжность и работоспособность соединения «вал-уплотнение», представлена на рисунке 1.6.

Ключевой характеристикой, позволяющей оценить работоспособность уплотнительных устройств, является герметичность уплотнительного соединения и объем утечек. Расчеты, позволяющие оценить надежность уплотнения, строятся на следующих научных теориях: гидродинамическая и эластогидродинамическая теория смазки, теория граничного и сухого трения [113, 86, 160].

Основные положения теории герметичности контактных уплотнительных устройств базируются на гидродинамической и эластогидродинамической теории смазки, теории сухого и граничного трения [67, 112].

Классической теории герметичности манжет еще не существует, поэтому зависимость утечек от толщины масляной пленки выглядит так [68]

$$Q \sim \delta^s, \quad (1.1)$$

где s – показатель степени (обычно $s = 3$).

Оптимальным считается режим трения, когда происходит снижение коэффициента трения, величины утечки, износа манжеты, что соответствует определенному значению эквивалентного зазора. При сухом и граничном трении наблюдается повышенный износ манжеты и как следствие – утечки. При гидродинамической смазке утечки растут из-за увеличения эквивалентного зазора h и уменьшении давления P_k .

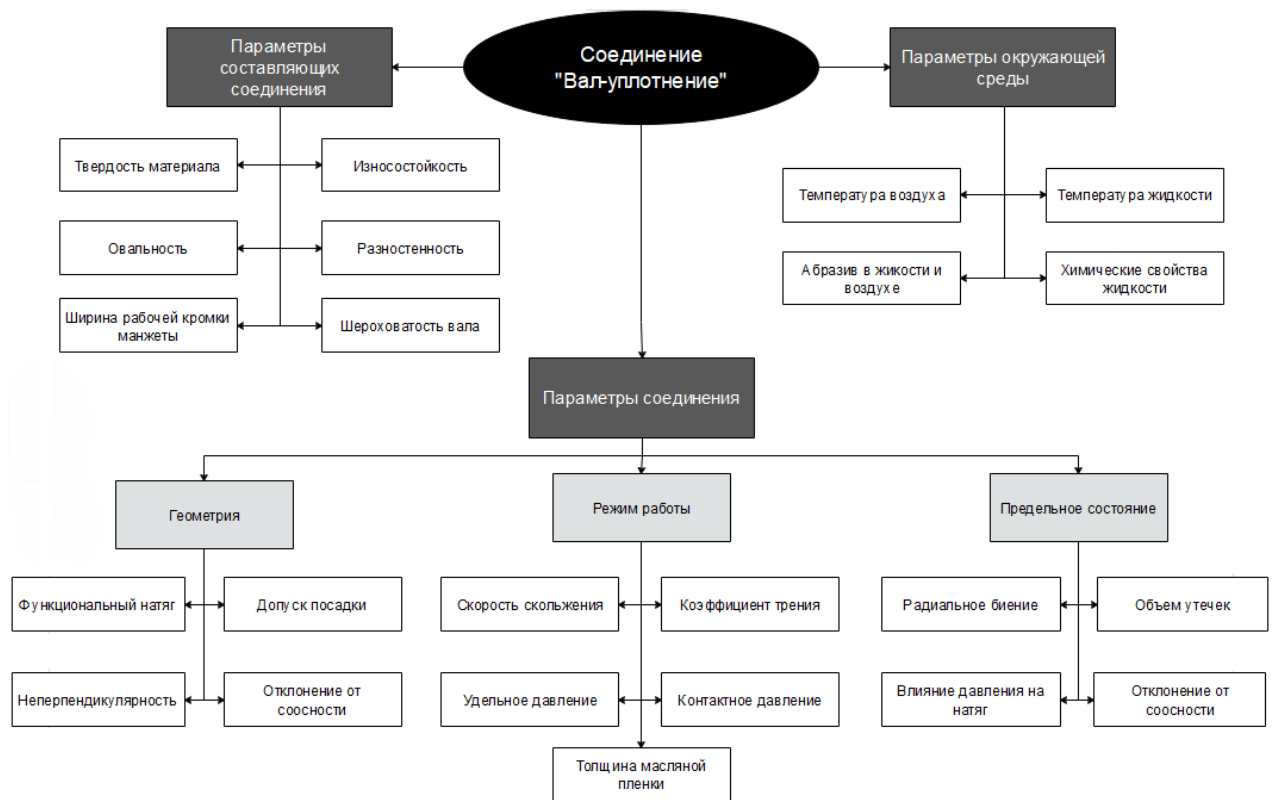


Рисунок 1.6 – Факторы влияющие на надежность соединения «вал-манжета»

Установлено, что с увеличением частоты вращения вала манжета не успевает «следить» за валом: происходит раскрытие стыка и возрастают утечки. В работе [67] сформулировано правило: скорость восстановления формы кромкой манжеты v_b должна быть больше скорости скольжения v :

$$v_b \geq v = \frac{d}{2} \cdot \omega, \quad (1.2)$$

где ω – частота колебаний, с^{-1} .

В работе [110] приведена зависимость для определения критической частоты вращения из условия (1.2) для идеально упругого контакта

$$n_{kp} = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{1}{K_1 \cdot M} \left(\frac{P_{c \min}}{0,5 \cdot r} - K_2 \cdot E \right)}, \quad (1.3)$$

где M – масса деформируемого участка манжеты; $P_{c \min}$ – минимальное статистическое давление; E – динамический модуль упругости материала манжеты; K_1 и K_2 – коэффициенты, характеризующие конструктивные параметры манжеты.

В ряде работ [68, 112] выявлено, что нормальная температура в зоне контакта 50...70 °С и изнашивание манжет резко возрастает при достижении 70...100 °С – начинается тепловой износ, схватывание второго рода. Повышение температуры приводит к увеличению твердости и хрупкости, трещинам и разбуханию манжеты, ускорению изнашивания вала. Установлено, что наибольшее влияние на контактную температуру в соединении оказывают натяг, давление, частота вращения и наличие масляной пленки между контактируемыми поверхностями.

На механический износ материалов манжеты и вала оказывает влияние шероховатость поверхности вала и наличие абразива в зоне трения – главные причины схватывания первого рода. Так, в работе [67] говорится, что малая шероховатость поверхности в пределах $R_a = 0,04...0,08$ мкм не благоприятствует удержанию масляной пленки в неровностях и затрудняет создание микро-гидродинамической пленки, а большая шероховатость поверхности в виде $R_a > 1,25$ мкм вызывает увеличение износа и коэффициента трения. Оптимальной является $R_a = 0,16...0,63$ мкм.

В работах [110, 108] исследован микрорельеф поверхности после различных видов обработки для создания $R_a \approx 0,32$ мкм и сделан вывод о том, что шлифование кругом, пастой, шкуркой, электрохимическое шлифование дают практически не отличающийся друг от друга профиль поверхности. А при обработке поверхностно-пластическим деформированием (ППД) шариком и роликом (при исходной $R_a = 3,2...2,5$ мкм получается $R_a = 0,2...0,4$ мкм) уменьшается количество вершин и впадин, увеличивается шаг поверхности, поверхностная твердость, повышается износостойкость и формируется оптимальная масляная пленка. Дальнейшее исследование шероховатости поверхности при восстановлении вала различными способами получило в работе [143], где рекомендуется ППД до $R_a = 0,1...0,3$ мкм для шеек валов под уплотнение в коробках передач трактора «Кировец» и коленчатого вала дизеля СМД-14.

Заслуживает внимания работа [148], где отмечено, что износостойкость сырых валов в 1,5...2,0 раза выше закаленных (при одинаковом значении R_a), если нет абразива в зоне трения. Увеличение процента абразива в масле приводит к необходимости повышения твердости вала. Твердость вала должна быть в пределах HRC 15...55.

На практике к повреждению или разрушению уплотнителя приводят случаи, когда множество факторов, оказывают негативное влияния на надёжность соединения, тогда как выход за пределы одного или двух факторов существенной нарушения работоспособности не вызывают.

Поскольку в машиностроении используется множество различных видов соединений «вал-уплотнение», то и влияние того или иного фактора на уплотнители будут различными, более того, возможны ситуации, когда негативное влияние одних факторов, может быть компенсировано негативным влиянием других. Таким образом, для определения оптимальных значений факторов, влияющих на надежность уплотнительного соединения необходимо проведение специальных исследований.



а

б

Рисунок 1.7 – Фланец КПП: а – новый; б – изношенный



а

б

Рисунок 1.8 – Армированная манжета: а – новая; б – изношенная

Классификации факторов, вызывающих отказы в соединениях «вал-уплотнение» представлена на древовидной диаграмме, представленной на рисунке 1.9.



Рисунок 1.9 – Причины отказов уплотнительного узла

Отказы уплотнительных узлов подробно рассмотрены в работе А.К. Логиноваса [128]. Исходя из его исследований, чаще всего к отказам

приводят постепенные факторы, вызванные механически износом деталей и внутренним износом резины. Постепенные деформационно-термические отказы происходят из-за охрупчивания или размягчения при перегреве узла, стеклование при переохлаждении и тепловое расширение резины. Поскольку все постепенные факторы действуют на уплотнительный узел одновременно, для отказа достаточно, чтобы значение только одного из них вышло за нормальные пределы.

Износные отказы приводят к появлению остаточных деформаций, это происходит из-за уменьшения внутреннего диаметра манжет, приводящего к уменьшению натяга в соединении, и как следствие, снижению контактного давления.

Деформационно-термические отказы приводят к растягиванию резинового материала уплотнителя, его размягчению и налипанию на вал, данные воздействия приводят к возникновению трещин глубиной 3-4 мм на кромках манжет. По мере старения материала происходит расширение имеющихся и появление новых трещин.

К возникновению внезапных отказов приводят дефекты, не выявленные в процессе входного контроля: нарушения температурного режима работы, нарушения технологии изготовления и ремонта [172]. К подобным дефектам относятся: поры в материале уплотнителя, подвороты и разрушения кромок, срывы браслетных пружин и др.

Ключевыми факторами, влияющими на износостойкость резиновых уплотнителей, являются физико-механические свойства их эластомера. Поэтому вместо резины в качестве него все чаще используется полиуретан, обладающий большей твердостью и эластичностью, высокой прочностью, имеющий стойкость к агрессивному влиянию внешних сред и раздиру [16, 37, 17].

Согласно исследованиям, износ манжетного уплотнения и вращающегося вала [173], несмотря на различия в свойствах, у манжет с резиновым и полиуретановым эластомерами имеет схожую динамику, что показано на графике на рисунке 1.10.

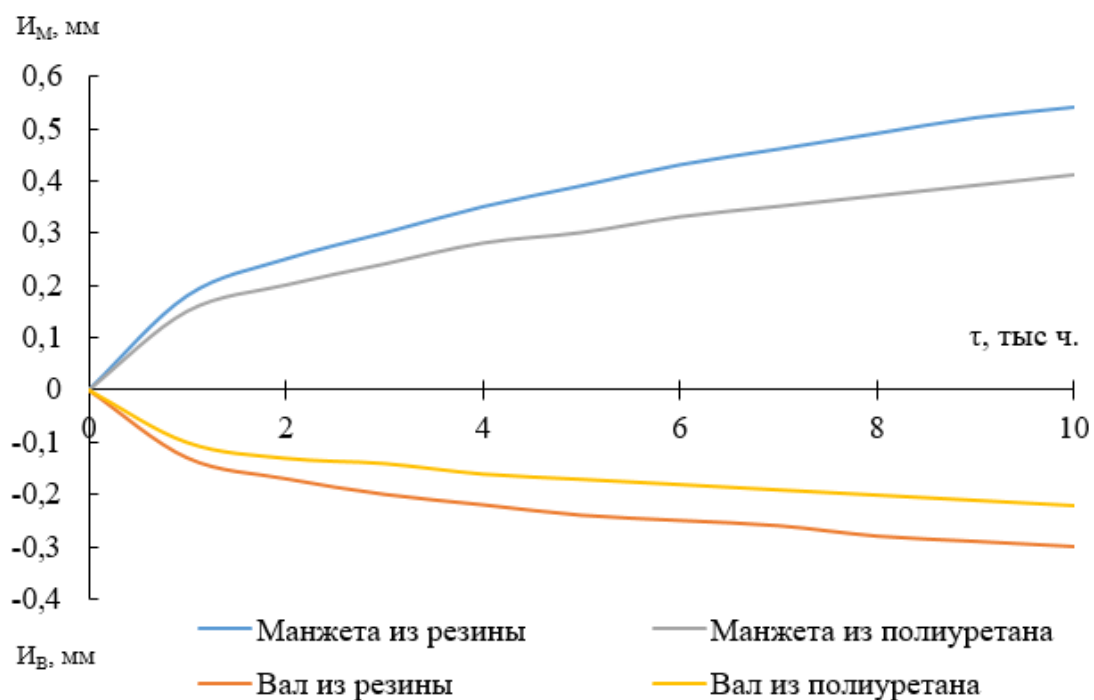


Рисунок 1.10 – График зависимости износа манжеты I_M и износа вала I_B , от продолжительности испытаний [173]

Как видно из графика (рисунок 1.10), интенсивность износа обеих манжет снижается по мере увеличения их времени работы. В научных работах [153, 129] высокий на ранних стадиях работы, но постепенно уменьшающийся износ составляющих уплотнительного узла, в результате которого на кромке образуется канавка, вызван остротой кромки манжеты при узкой полоске контакта, поскольку в начальный период работы происходит упругая деформация эластомера манжеты.

Поскольку отказ уплотнительного узла ведет к проникновению пыли в область уплотняемого соединения и к утечкам смазочных материалов, что приводит к критическим последствиям для всего агрегата, необходимо гарантировать работоспособность и ресурс уплотнительного устройства.

Согласно научной работе [127] причиной появления выбраковочных признаков у составляющих уплотняемого узла в 90% случаях является возникновение абразивного износа. Возникающие повреждения и частота их возникновения представлены в таблица 1.5.

Таблица 1.5 – Распределение дефектов уплотнительных узлов по видам повреждений

Виды повреждений	Частота возникновения, %
Увеличение зазоров сверх предельных значений нарушения плотности посадки	65...76
Нарушение плотности посадки	17...21
Микроскопические повреждения рабочих поверхностей	4...11
Поломка деталей	5...9

Для надлежащего определения предельных параметров работоспособности соединения «вал-уплотнение» необходимо обеспечить высокую точность обеспечения и прогнозирования ресурса.

1.6 Выводы по первой главе

Обобщение исследований состояния вопроса в области обеспечения качества сборки соединений при ремонте машин методами цифровизации и размерного анализа сделать следующие выводы:

1. Для описания процессов ремонтного производства в общем виде (на верхнем уровне цифровой модели) целесообразно использовать нотацию IDEF0. При декомпозиции процессов ремонтного производства лучшим вариантом является нотация BPMN, которая имеет большое количество элементов, связанных с автоматизацией процессов (триггеры, сообщения, потоки данных и так далее). Кроме того, в нотации есть возможность отображения участников процесса в виде отдельных дорожек, что позволяет наглядно показать разделение ответственности между ними. Таким образом, использование BPMN нотаций позволяет решать задачи по моделированию процессов и по автоматизации деятельности предприятия.

2. Применение размерного анализа позволяет оценить влияние и определить точность сборки узлов аналитически на этапе проектирования. Составление размерной цепи не менее важно, чем ее правильный расчет, но оно намного сложнее, поскольку требования по точности, определяющие работоспособность конкретной сборочной единицы, как правило, индивидуальны. Индивидуальна и

конфигурация (состав входящих в размерную цепь звеньев) конкретной размерной цепи, в то время как, формулы для расчета размерных цепей одинаковы и зависят только от выбранного метода достижения точности и характера составляющих звеньев. При этом неправильно составленная размерная цепь приведет к неверному результату расчета и соответственно к неверной оценке работоспособности узла или механизма.

3. Повышение точности измерений отклонений размеров и формы, как влияющих звеньев размерной цепи, увеличивает срок службы уплотнений в редукторах и других узлах машин и агрегатов. Несоблюдение норм отклонений формы и расположения поверхностей может привести к росту трудоемкости и снижению точности сборки, увеличению объема операций по подгонке и снижению показателей долговечности работы агрегатов и машин.

Необходимо разработать рекомендации по совершенствованию метрологического обеспечения контроля отклонений формы и расположения поверхностей деталей при ремонте машин, для этого определить критерии выбора средств измерений для контроля отклонений формы и расположения поверхностей деталей с учетом формулы их расчета, как результата не прямого, а косвенного измерения.

4. Соединение «вал-уплотнение» является одним из важнейших в машинах и оборудовании для сельского хозяйства. От долговечности работы данного соединения зависит ресурс работы агрегата, где оно установлено. Долговечность соединения «вал-уплотнение» зависит от множества факторов, в том числе и от заданной величины натягов между валом и манжетой, получаемых при сборке. Обеспечить заданную величину натягов можно путем применения размерного анализа. Для этого необходимо провести анализа размеров, образующих размерную цепь, где в качестве исходного замыкающего звена будет выступать отклонение от соосности и радиальное биение вала по отношению к диаметру манжеты.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА СБОРКИ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ РЕМОНТЕ МАШИН МЕТОДАМИ ЦИФРОВИЗАЦИИ И РАЗМЕРНОГО АНАЛИЗА

2.1. Теоретические основы цифровизации процессов при ремонте машин

2.1.1 Разработка цифровой модели процесса комплектации и сборки для ремонтного производства

Цифровое моделирование производственных процессов – это эффективный инструмент, позволяющий оптимизировать материальные затраты, трудозатраты, а также затраты времени. Существует множество вариантов цифрового обеспечения, позволяющих не только строить цифровые модели процессов в различных нотациях и форматах, но и проводить их имитации [125]. В нашем случае, построение моделей проводилось в программе BusinessStudio.

Для создания модели процесса комплектации и сборки для ремонтного производства определены: входы, выходы, ресурсы и механизмы процесса, а также взаимодействие по входам и выходам с производственной системой. Для удобства использования, модель целесообразно разбить на несколько уровней. Для каждого уровня, в зависимости от информации о процессе, которую необходимо изобразить, выбирают соответствующий метод описания (нотацию). Верхний уровень модели будет отражать место и взаимосвязь процессов комплектации и сборки в процессе ремонта КПП. На этом уровне нет необходимости в описании отдельных операций, поэтому для верхнего уровня следует использовать нотацию IDEF0. На рисунке 2.1 изображена цифровая модель процесса ремонта КПП в нотации IDEF0.

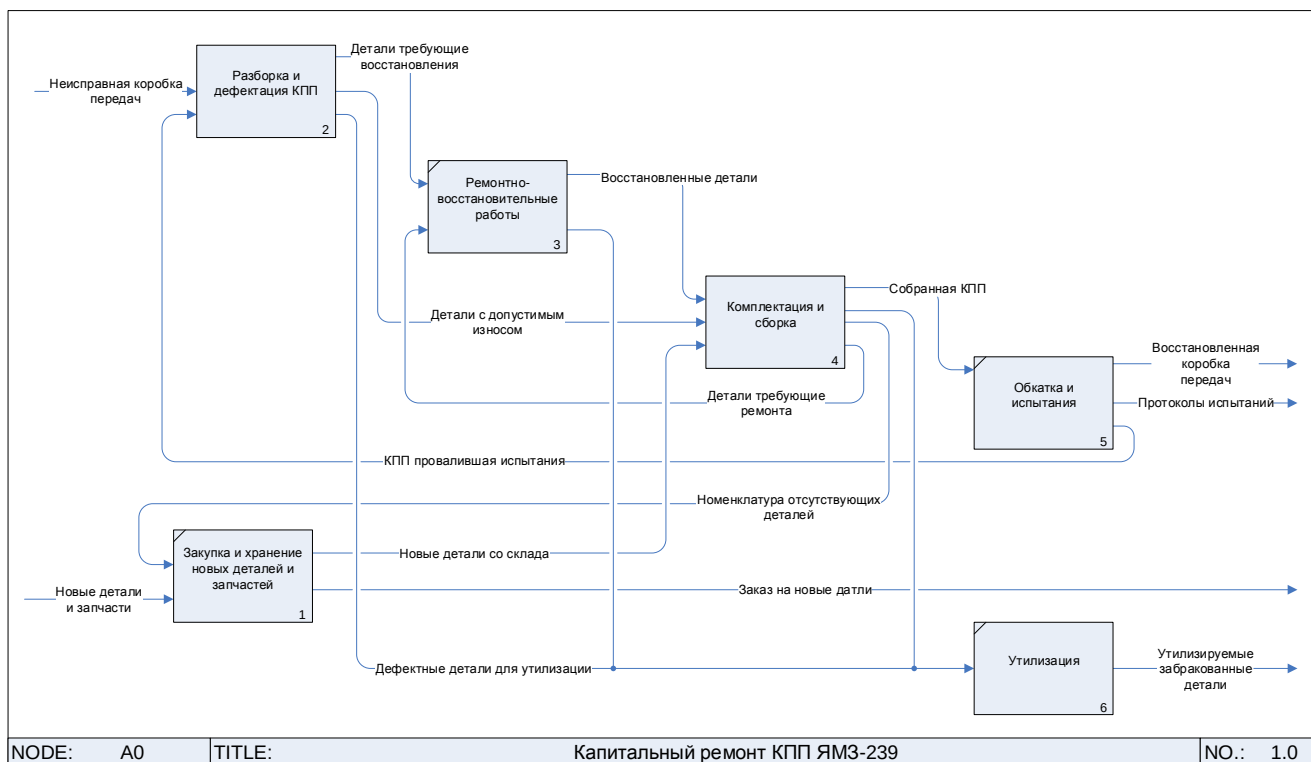


Рисунок 2.1 – Цифровая модель процесса ремонта КПП в нотации IDEF0

Из рисунка 2.1 видно, входами процесса «Комплектация и сборка» являются выходы процессов «Закупка и хранение новых деталей и запчастей», «Разборка и дефектация КПП», «Ремонтно-восстановительные работы». Новые детали поступают в процесс со склада предприятия (процесс «Закупка и хранение новых деталей и запчастей»). Детали с допустимым износом, это те детали, которые после разборки КПП и прохождения контроля признаны годными, что означает возможность их дальнейшего применения, в рассматриваемый процесс они, соответственно, поступают из процесса «Разборка и дефектация КПП». Третья категория деталей, поступающих на процесс комплектации и сборки – восстановленные детали, прошедшие ремонтно-восстановительные работы. Данные детали первоначально, в процессе разборки и дефектации КПП, определяют негодными, но поддающимися восстановлению, поэтому их отправляют в процесс ремонтно-восстановительных работ, и те детали, характеристики которых успешно доведены до допустимых эксплуатационных

значений переводят в процесс комплектации и сборки, чтобы они применялись в отремонтированной КПП.

На выходе из процесса комплектации и сборки, выходят отбракованные детали и собранные коробки передач. Из отбракованных деталей, которые подлежат восстановлению, отправляют в ремонт, неисправимый брак, отправляют на склад металлолома для утилизации. Собранную КПП отправляют в процесс обкатки и испытаний, который является заключительным для капитального ремонта КПП.

Для цифровых моделей следующего уровня использована нотация BPMN, так как она позволяет не только детально описать алгоритм выполнения отдельных операций процесса, но и послужить основой для создания имитационной модели и дальнейшей автоматизации управлением процесса. На рисунке 2.2 изображена цифровая модель процесса комплектации и сборки агрегатов и узлов двигателя в нотации BPMN.

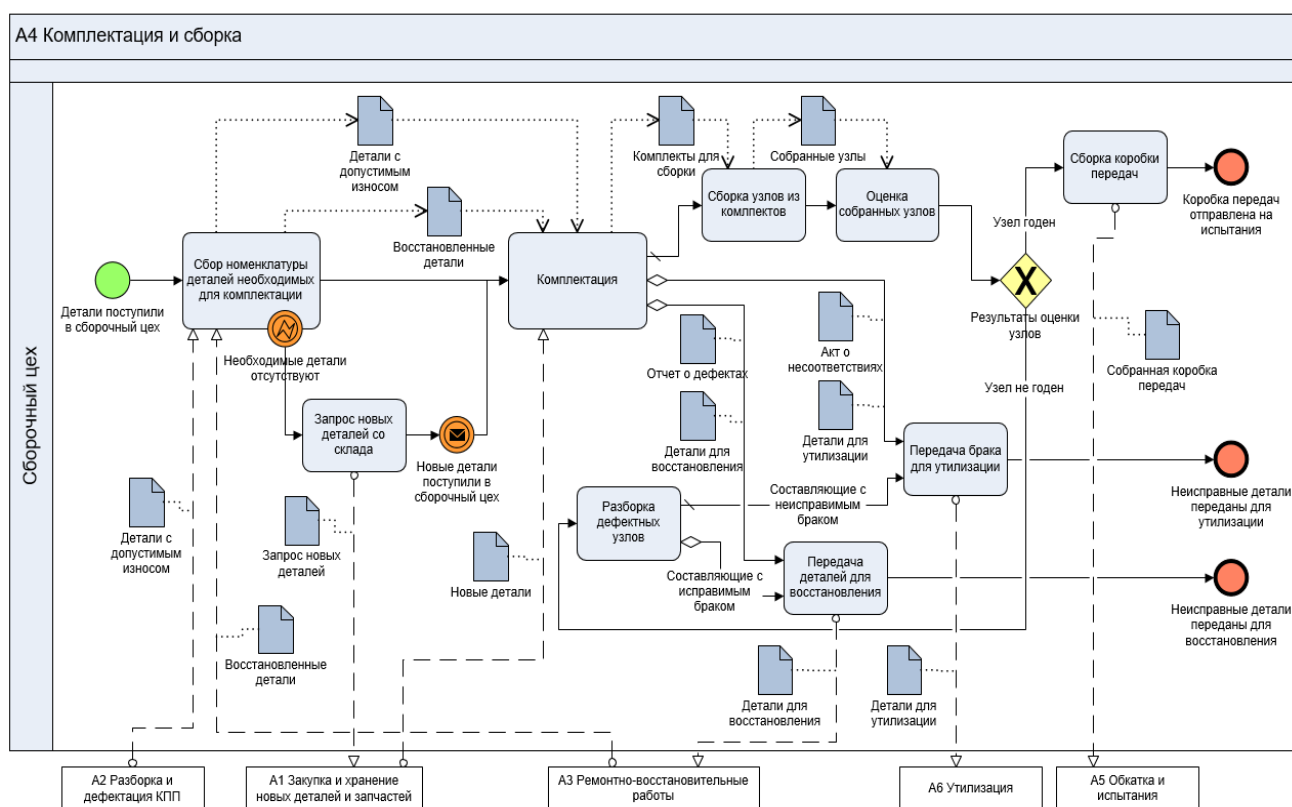


Рисунок 2.2 – Цифровая модель процесса комплектации и сборки КПП в нотации BPMN

На схеме (рисунок 2.2) отражены стартовые и конечные события данного процесса, его составляющие (отдельные процессы и функции), а также показано движение материальных объектов, использующихся и создающихся в процессе.

Комплектация и сборка начинается, с поступления деталей из трех процессов, однако первоначально используют восстановленные детали и детали с допустимым износом, в случае, когда из них невозможно составить полный комплект, составляется заявка для получения новых, недостающих деталей со склада запчастей. Новые детали, поступившие со склада, направляются, вместе с остальными деталями и сборочными единицами, непосредственно, на операции комплектования, проводимые определенным методом, в рассматриваемом случае – это метод полной взаимозаменяемости.

Необходимым условием для реализации метода полной взаимозаменяемости, является выполнение требований к точности деталей, поэтому для высокоточных соединений, этот метод является экономически нецелесообразным. Однако соединения высокой точности используются относительно редко. И в большинстве случаев достижение полной взаимозаменяемости обеспечивает существенное повышение эффективности процессов сборки, параллельно упрощая их, что также снижает экономические затраты, на сборочные процессы, а также открывает широкие возможности для применения средств механизации и автоматизации, что может также существенно улучшить процессы сборки и комплектации.

Схема процесса комплектования методом полной взаимозаменяемости, также, построена в нотации BPMN и представлена на рисунке 2.3.

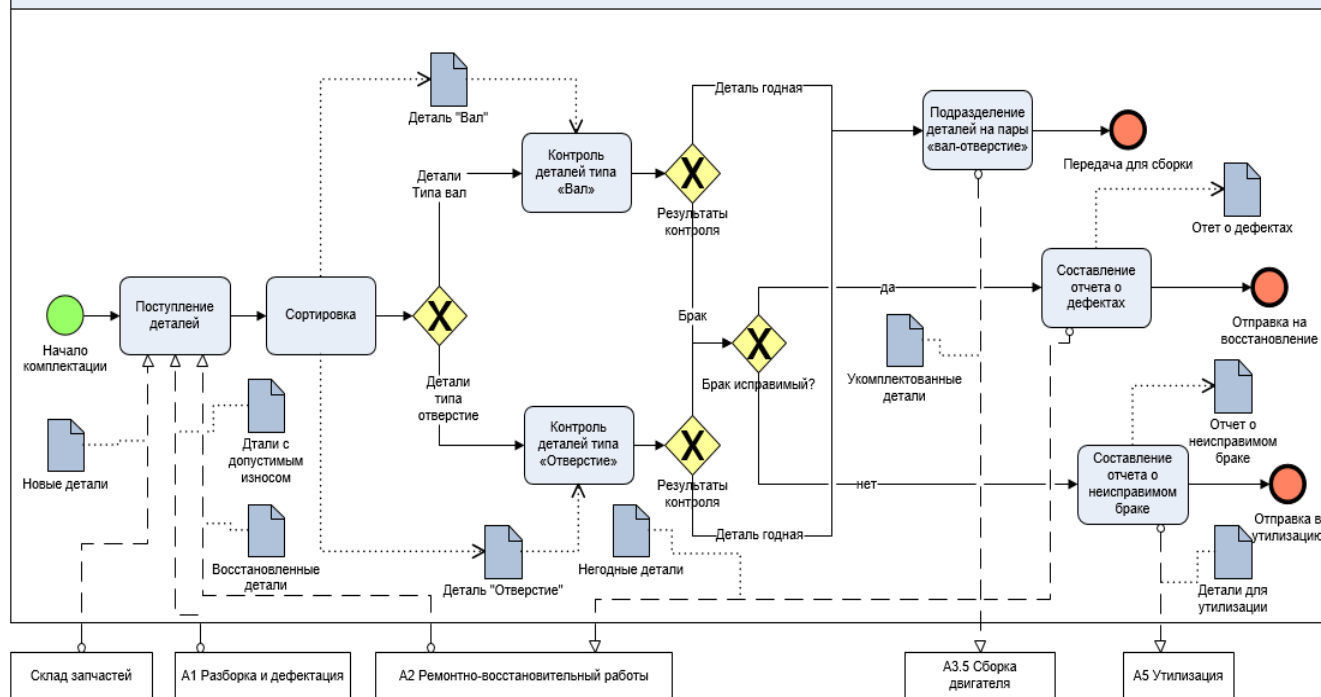


Рисунок 2.3 – Цифровая модель процесса комплектации (методом полной взаимозаменяемости) в нотации BPMN

Детали, соответствующие техническим требованиям (типа «вал» и типа «отверстие») по характеристикам, называют годными, и из них, впоследствии, формируют сборочные комплекты.

Поскольку в рассматриваемом случае применяется метод полной взаимозаменяемости, подобранные комплекты сразу направляются на сборку, что обеспечивается, испытаниями, проведенными на предшествующих этапах, отсеивающих детали, с допусками недостаточной точности, из-за чего необходимость в дополнительной обработке деталей отпадает.

У деталей с несоответствиями оценивается степень брака, в случае, когда брак исправимый, детали отправляют в ремонт для восстановления, после которого они могут допускаться для сборки в следующем цикле. Те детали, брак которых оценен как неисправимый, отправляют на склад металлолома для утилизации, с составлением акта о несоответствиях.

После завершения процесса укомплектованные пары передаются для сборки. При обнаружении неисправностей узлы разбираются, а составляющие их детали в зависимости от степени брака отправляют в ремонт или на склад металлолома для утилизации.

Построенные модели могут служить основой для:

- разработки регламентов процессов комплектации и сборки;
- создания инструкций и методических рекомендаций для процесса комплектации и сборки;
- разработки цифровых моделей комплектации и сборки для конкретных сборочных единиц и узлов;
- разработки имитационной модели и проведения функционально-стоимостного анализа процесса.

Для проведения имитационного моделирования и функционально-стоимостного анализа процесса в программе BusinessStudio необходимо собрать и ввести данные относящиеся к ресурсам производства, например, стоимость деталей и комплектующих использующихся при сборке, временные затраты на проведение операции процесса, количество применяемых вспомогательных материалов, заработная плата рабочих и другие количественные характеристики, связанные с ресурсной базой.

Построение имитационной модели требует известных статистических характеристик процесса связанных с распределением вероятностей переменных процесса. Это оценка распределения случайных событий, законы распределения случайных величин, доверительные вероятности случайных событий и д.р.

Реализация имитационной модели на ремонтном предприятии открывает возможности для управления порядком сборочных циклов, основываясь на состоянии предприятия и потребностях заказчика. Адаптировать использование ресурсов предприятиях, под конкретные нужды, манипулируя их числовыми характеристиками, такими как стоимость, количество, время, а также точностными параметрами.

Таким образом, определены основные характеристики процесса комплектации и сборки КПП, разработаны цифровые модели процесса в нотациях IDEF0 и BPMN. Оценено применения метода полной взаимозаменяемости при комплектации и определены основные пути применения имитационного моделирования с применением построенных цифровых моделей.

2.1.2 Мониторинг процесса сборки

Для осуществления контроля качества процесса комплектации и сборки, с использованием цифровой модели, необходимо установить мониторинговые показатели и критерии (количественные и качественные), а также определить методику их сбора и анализа. Также для регулирования мониторинговых показателей должны быть определены факторы, влияющие на их значения [79]. Систематизация основных факторов, оказывающих влияние на рассматриваемый процесс, позволяет структурировать потенциальные причины несоответствий, поскольку возникающие дефекты будут связаны с представленными факторами, что может существенно упростить их контроль [78].

Предлагаемые критерии, показатели и индикаторы для проведения мониторинга процесса комплектации и сборки представлены в таблице 2.1.

Так как большее количество информации для оценки индикаторов и показателей получают измерительным методом, очевидно, что качество комплектации и сборки будет зависеть от уровня метрологического обеспечения предприятия [52]. Таким образом, важным шагом при цифровизации предприятия, наряду с созданием и внедрением цифровых моделей процессов, является переход измерительных процессов на цифровые средства измерений. Метрологическое обеспечение может быть рассмотрено как отдельный процесс, для которого целесообразно разрабатывать свою систему мониторинга [22, 169].

Таблица 2.1 – Мониторинговые показатели качества комплектации сборки деталей и узлов

Критерий	Показатели	Индикатор	Метод сбора информации
Соответствие геометрических параметров деталей требованиям технической документации	Точность посадок и взаимного расположения сопряженных деталей и сборочных единиц	Отклонения от точности взаимного расположения деталей и узлов	Измерения
		Радиальное и осевое биение	Измерения
	Плоскостность, параллельность и перпендикулярность поверхностей направляющих	Неплотность прилегания сопрягаемых поверхностей и др.	Измерения
		Правильность положения сопрягаемых деталей и узлов	Осмотр
Соответствие технологии сборочных операций	Последовательность сборки	Наличие необходимых деталей в собранных соединениях (выполняют осмотром);	Осмотр
		Выполнение вспомогательных операций	Осмотр
	Выполнение специальных требований	Затяжка резьбовых соединений, плотность и качество постановки заклепок, плотность вальцовочных и других соединений	Измерение
		Уравновешенность узлов вращения, подгонка по массе и статическому моменту	Измерение

Кроме того, необходимо учитывать, что во многих случаях выполнение критерия «Соответствие геометрических параметров деталей требованиям технической документации» для различных величин будет определяться нормированием допускаемой погрешности измерений [166, 95, 120, 121].

Для анализа собранных данных можно использовать такие инструменты как: карты Шухарта (стабильность и управляемость процесса), корреляционный анализ (оценка взаимосвязи изменения контролируемых показателей), диаграмма Парето (выбор приоритетных путей регулирования качества процесса) [19]. Значения, полученные в результате мониторинга, могут быть также использованы в качестве ключевых показателей эффективности.

Таким образом, разработана система мониторинга качества комплектации сборки деталей и узлов, включающая два критерия: соответствие геометрических параметров деталей требованиям технической документации и соответствие технологии сборочных операций. Для каждого критерия определены показатели, индикаторы и методы сбора информации. Предложенная система мониторинга может быть дополнена другими показателями и критериями с учетом особенностей конкретной сборочной операции.

2.2 Теоретические основы расчета размерных цепей для определения суммарного отклонения от соосности и радиального биения

2.2.1 Математическое описание характеристик показателей качества машин

При использовании элементов расчета размерных степеней для оценки показателей качества машины, оборудования или агрегата, совокупность оцениваемых показателей могут быть представлены в виде функции зависящей от некоторых аргументов:

$$Y_{\Sigma} = F(Y_1, Y_2 \dots Y_n) \quad (2.1)$$

где Y_{Σ} – показатель машины, оборудования или агрегата; $Y_1, Y_2 \dots Y_n$ – аргументы функции.

В качестве аргументов функции показателя качества могут выступать различные переменные, характеризующие его функциональные параметры, влияющие на него факторы, причины, приводящие к его изменению и др. При этом сами аргументы также могут представлять из себя отдельные функции, поэтому они могут быть как случайными, так и постоянными, иметь или не иметь взаимную корреляцию, быть зависимыми или не зависимыми от других функций.

В расчетах, связанных с точностными параметрами изделий, используют линейную функцию [87]:

$$Y_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n k_i Y_i, \quad (2.2)$$

где Y_{Σ} – показатель точности изделия; k_i – коэффициент приведения (постоянная при случайной величине Y_i); Y_i – влияющий размер (показатель точности детали изделия, являющийся аргументом функции); n – количество размеров, влияющих на показатель точности изделия.

В качестве основных числовых характеристик рассматриваемых величин используют математическое ожидание и дисперсию. При оценке точностных параметров математическое ожидание $M[Y_{\Sigma}]$ и дисперсия $D[Y_{\Sigma}]$ будут рассчитываться в соответствии с формулами (2.3) и (2.4) соответственно [87]:

$$M[Y_{\Sigma}] = \sum_{i=1}^n k_i M[Y_i], \quad (2.3)$$

$$D[Y_{\Sigma}] = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial Y_{\Sigma}}{\partial Y_i} \right)^2 D[Y_i] + 2 \sum_{i,j=1}^n R_{ij} \left(\frac{\partial Y_{\Sigma}}{\partial Y_i} \right) \left(\frac{\partial Y_{\Sigma}}{\partial Y_j} \right) D[Y_i] D[Y_j], \quad (2.4)$$

где $\frac{\partial Y_{\Sigma}}{\partial Y_i}$ – частная производная первого функции Y_{Σ} ; R_{ij} – коэффициент корреляции.

Расчет дисперсии по формуле (2.4) может значительно упрощаться в зависимости от характера аргументов, случайных величин и производных. В случае, когда случайные величины не имеют корреляции ($R_{ij} = 0$) дисперсия $D[Y_{\Sigma}]$ будет определяться как:

$$D[Y_{\Sigma}] = \sum_{i=1}^n k_i^2 D[Y_i]. \quad (2.5)$$

В технической документации для оценки показателей точности охватывающий и охватываемых деталей используют отклонения двух видов верхнее (ES , es) и нижнее (EI , ei) связанные между собой допуском (T). Отклонения охватывающих деталей обозначаются большими буквами, а охватываемых маленькими, для дальнейшего упрощения отклонения деталей всех видов будут обозначаться маленькими буквами.

Допуск t определяется как разность верхнего и нижнего отклонений:

$$T = es - ei. \quad (2.6)$$

В некоторых случаях для расчетов используется среднее отклонение ec , определяемое по формуле:

$$ec = \frac{es + ei}{2}. \quad (2.7)$$

Использование среднего отклонения и допуска позволяет значительно упростить расчеты математического ожидания и дисперсии случайных величин. Без учета номинального размера для случайной величины x математической ожидание и дисперсия определяются по формулам (2.8) и (2.9) соответственно [87]:

$$M_x = ec + \alpha T, \quad (2.8)$$

$$D_x = \frac{\lambda^2 T^2}{36}. \quad (2.9)$$

где α – коэффициент относительной асимметрии рассеяния размера; λ – коэффициент относительного рассеяния размера, показывающий степень отличия закона рассеяния этого размера от закона Гауса (нормального распределения), если закон рассеяния размера совпадает с нормальным распределением $\lambda=1$.

2.2.2 Разновидности аргументов обобщенной функции качества

Аргументы Y_i , функции (2.1) могут быть случайными, независимыми, взаимно коррелированными и функционально зависимыми, скалярными и векторными. Аргументами этой функции могут быть также характеристики соединений деталей с зазором, в пределах которого сопряженные детали имеют возможность смещения. Расчетные схемы могут включать в себя как отдельные виды перечисленных величин, так и любые их комбинации. В общем случае расчетная схема может содержать все виды аргументов, т.е. из формулы (2.90) получим выражение, характеризующее дисперсию обобщенной функции качества:

$$\lambda_{\Sigma}^2 T_{\Sigma}^2 / 36 = \sum_{i=1}^n \lambda_{\Sigma i}^2 T_{\Sigma i}^2 / 36. \quad (2.10)$$

Отсюда допуск на значение обобщенной функции качества:

$$T_{\Sigma} = \frac{1}{\lambda_{\Sigma}} \sqrt{\sum_i \lambda_{\Sigma i}^2 T_{\Sigma i}^2}. \quad (2.11)$$

В этих формулах $\lambda_{\Sigma i}^2 T_{\Sigma i}^2$ – характеристика рассеяния i -го вида обобщенной функции аргумента.

В случае, если аргументы функции (2.1) скалярные величины, принимаем для обозначения индекс «s». Математическое ожидание функции (2.1) при скалярных аргументах, в соответствии с формулой (2.8), будет иметь вид:

$$M_{\Sigma s} = \sum_{s=1}^m k_s (e m_s + \alpha_s T_s), \quad (2.12)$$

где m – количество скалярных величин функции Y_{Σ} .

Дисперсия функции (2.1) при скалярных аргументах, в соответствии с формулой (2.10) и принятым обозначением величин будет, иметь вид:

$$\lambda_{\Sigma s}^2 T_{\Sigma s}^2 = \sum_{s=1}^m k_s^2 \lambda_s^2 T_s^2. \quad (2.13)$$

Аргументами функции (2.1) наяду с другими могут быть погрешности, имеющие случайные значения и направление. Встречаются также случаи, когда все аргументы функции (2.1) – векторные величины. Рассмотрим сначала случай, когда в расчетной схеме кроме векторных имеются погрешности других видов [87].

На рисунок 2.4 показан торец втулки, в которой оси отверстия и наружной поверхности смещены. Если необходимо знать направление Oy конечного размера, в расчет принимают величину Y – проекцию

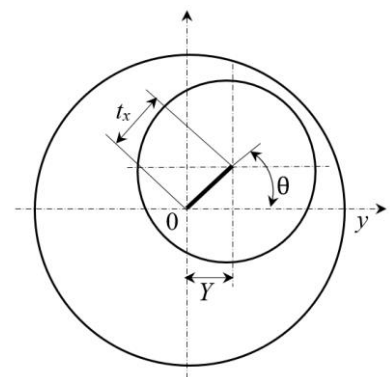


Рисунок 2.4 – Расчетная схема

погрешности t_x на Oy . Уравнение функциональной зависимости

$$Y = t_x \cos \theta,$$

где t_x и θ – абсолютное значение и аргумент вектора (случайные величины).

Величины t_x и θ независимые, поэтому математическое ожидание и дисперсия случайной величины Y .

$$M[Y] = M[t_x]M(\cos \theta),$$

$$D[Y] = D[t_x]D(\cos \theta) + D[t_x][M(\cos \theta)]^2 + D(\cos \theta)[M[t_x]]^2.$$

Формула для определения математического ожидания случайной величины имеет вид $M_x = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x)dx$. Для нахождения $M(\cos \theta)$ запишем

$$M(\cos \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} \cos \theta f(\cos \theta) d\theta.$$

При равновероятном изменении угла θ от 0 до 2π

$$f(\cos \theta) = \frac{1}{2\pi}; M(\cos \theta) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \cos \theta d\theta = \frac{1}{2\pi} |\sin \theta|_0^{2\pi} = \frac{1}{2\pi} |0 - 0| = 0$$

При измерении угла θ от 0 до π

$$f(\cos \theta) = \frac{1}{\pi}; M(\cos \theta) = \frac{1}{\pi} |\sin \theta|_0^{\pi} = \frac{1}{\pi} |0 - 0| = 0$$

Формула для определения дисперсии случайной величины

$$D_x = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 f(x) dx - M_x^2.$$

Для рассматриваемого случая

$$D(\cos \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} \cos^2 \theta f(\cos \theta) d\theta - M^2(\cos \theta)$$

При угле θ , изменяющемся равновероятно от 0 до 2π

$$f(\cos \theta) = \frac{1}{2\pi};$$

$$D(\cos \theta) = \int_0^{2\pi} \cos^2 \theta d\theta - M^2(\cos \theta) = \frac{1}{2\pi} \left| \frac{\theta}{2} + \frac{\sin 2\theta}{4} \right|_0^{2\pi} - M^2(\cos \theta)$$

После подстановки получим $D(\cos \theta) = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{2\pi}{2} + 0 - 0 + 0 \right) - 0 = 0,5$

При измерении угла θ от 0 до π

$$f(\cos \theta) = \frac{1}{\pi};$$

$$D(\cos \theta) = \frac{1}{\pi} \left| \frac{\theta}{2} + \frac{\sin 2\theta}{4} \right|_0^\pi - M^2(\cos \theta) = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\pi}{2} + 0 - 0 + 0 \right) - 0 = 0,5$$

С учетом этого

$$M[Y] = 0; D[Y] = 0,5 \left(D[t_x] + [M[t_x]]^2 \right).$$

Но

$$D[t_x] = \lambda_x^2 t_x^2 / 36; M[t_x] = em_x + \alpha_x t_x.$$

Кроме того, для векторных величин $em_x = 0,5t_x$. Тогда после подстановки найдем

$$\lambda_y^2 T_y^2 = 0,5[\lambda_x^2 + 36(0,5 + \alpha_x)^2] t_x^2 = \lambda^2 t_x^2$$

где t_y – удвоенное смещение осей (биение); $t_x = 0,5t_y$.

Примем для векторных величин индекс «v». Для получения $t_v = 2t_x$ в виде допуска соосности в диаметральной выражении уменьшим в 2 раза коэффициент λ . Тогда $\lambda_y^2 t_y^2 = \lambda_v^2 t_v^2$, где $\lambda_v^2 = 0,125[\lambda_x^2 + 36(0,5 + \alpha_x)^2]$.

Для суммы векторных величин с учетом коэффициента приведения найдем

$$\lambda_v^2 t_v^2 = \sum_{v=1}^m k_v^2 \lambda_v^2 t_v^2. \quad (2.14)$$

Поскольку векторные величины представлены в виде смещения осей, то законы их распределения, например, Гаусса или Симпсона, относят не ко всему полю рассеяния, а только к его половине. Приведенные коэффициенты относительного рассеяния при распределении модуля вектора по этим законам соответственно $\lambda_v = 0,70$ и $\lambda_v = 0,90$. Для проектных расчетов можно принимать $\lambda_v = 0,75$ [87].

Окончательно для случая, когда в расчетной схеме кроме векторных имеются погрешности других видов и суммарно распределение приближается к нормальному [87]:

$$\lambda_{\Sigma v}^2 t_{\Sigma v}^2 = 0,75^2 \sum_{v=1}^m k_v^2 t_v^2. \quad (2.15)$$

Если расчетная схема содержит только векторные величины, при проектных расчетах суммарный вектор определяют по формуле [87]:

$$t_{\Sigma v} = 0,85 \sqrt{\sum_{v=1}^m k_v^2 t_v^2}, \quad (2.16)$$

где коэффициент перед корнем получен по опытным данным [87].

Коэффициенты 0,75 и 0,85 соответствуют проценту риска $2\beta = 0,27\%$. Если $2\beta \neq 0,27\%$, то коэффициенты 0,75 и 0,85 умножают на коэффициент C_0 , который принимают по следующим данным [87] (таблица 2.2):

Таблица 2.2 – Значения коэффициента C_0 при проценте риска 2β

$2\beta, \% \dots$	0,05	0,10	0,20	0,27	0,50	1,00	2,00	3,00	5,00
$C_0 \dots \dots$	1,13	1,07	1,02	1,00	0,95	0,89	0,81	0,77	0,71

В формулах (2.15), (2.16) t_v и $t_{\Sigma v}$ – допуски модуля влияющего и исходного (суммарного) векторов.

В работе [159] описан метод суммирования векторных погрешностей с учетом измерения размеров в результате нагрева деталей во время работы машины.

2.3 Методика составления размерной цепи для выявления суммарного отклонения от соосности и радиального биения в соединении вала с манжетой

К появлению утечек чаще всего приводит выход за пределы следующих параметров уплотнительного узла: N – натяг; r – радиальное биение вала; Δ_c – отклонение от соосности осей манжеты и вала [90].

Радиальное биение и отклонение от соосности приводят к дестабилизации масляной пленки, давления и натяга, вызывая, соответственно, «динамическое» и

«статическое» раскрытие стыка между уплотнителем и валом. Для предотвращения утечек необходимо, чтобы натяга компенсировал данные параметры, и его значение не превышало значение наименьшего функционального натяга N_{Fmin} .

Наименьший функциональный натяг N_{Fmin} зависит от динамической и статической составляющих, и вычисляется по формуле [122]:

$$N_{Fmin} = N_{rn} + \Delta_c, \quad (2.17)$$

где N_{rn} – натяг, соответствующий началу утечек в соединении.

Для оценки динамической и статической характеристик, составляется размерная цепь, состоящая из звеньев, влияющих на значение наименьшего функционального натяга в рассматриваемом соединении. Динамическая составляющая начала утечек N_{rn} вычисляется на основе экспериментально полученной зависимости между натягом и частотой вращения. Для этого необходимо провести многофакторный эксперимент.

Суммарное радиальное биение как геометрическую сумму векторных звеньев в виде динамической составляющей можно рассчитать по формуле, аналогичной формуле (2.15):

$$r = T_{\Sigma rv} = \frac{0,75^2}{\lambda_{\Delta rv}^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n k_{rvi}^2 T_{rvi}^2}, \quad (2.18)$$

где λ – коэффициент относительного рассеяния, T – допуск звена размерной цепи, k – коэффициент приведения; n – число динамических векторных звеньев; индекс v – векторное звено.

Статическая составляющая Δ_c выражаемая как суммарный допуск отклонения от соосности, может рассматриваться как скалярная величина, тогда из формулы (2.13) получим:

$$\Delta_c = T_{\Sigma c} = \frac{1}{\lambda_{\Sigma c}} \sqrt{\lambda_{\Sigma cv}^2 T_{\Sigma cv}^2 + \lambda_{\Sigma cs}^2 T_{\Sigma cs}^2}, \quad (2.19)$$

где индексы: Σ – суммарное значение, c – звено (как отклонение от соосности, в том числе это может быть v – векторное звено и s – звено в виде зазора).

Векторные звенья для соединения вала с манжетой могут быть динамическими и статическими. Динамические векторные звенья – это звенья, проявляющие себя в виде радиального биения при вращении вала. Статические векторные звенья – это звенья, смещающие ось вала относительно манжеты в виде отклонения от соосности без динамического эффекта. Причем динамические и статические векторные звенья могут при сборке как компенсировать друг друга, так и дополнять, а также изменяться в процессе эксплуатации в результате износа поверхностей и изменения их положения. Например, местнонагруженные кольца подшипников качения, переходную посадку или посадку с зазором, должны постепенно проворачиваться под действием нагрузок, что приводит к равномерному износу дорожки качения этого кольца без оваллизации. Но при этом вектор разностенности кольца будет попеременно «вращаться» в квазистатическом положении, увеличивая и уменьшая суммарный вектор отклонения от соосности.

Звенья в виде зазоров образуются посадками и имеют свою методику расчета показателей точности и свои коэффициенты, поэтому они должны рассчитываться по отдельной методике.

Суммарный допуск звеньев в виде зазора рассчитывается по формуле [87]:

$$T_{\Sigma cs} = \frac{1}{\lambda_{\Sigma cs}} \sqrt{\sum_{i=1}^m k_{csi}^2 \cdot \lambda_{csi}^2 \cdot T_{csi}^2}. \quad (2.20)$$

В формуле (2.20) m – число i -х звеньев в виде зазора; k – передаточное отношение

В большинстве посадок с зазором отношение среднего зазора S к допуску посадки T_s имеет вид $S/T_s \leq 1$ [87] и расчет этих допусков может производиться по следующим зависимостям [87]:

допуск посадки

$$T_s = \frac{0,5}{\lambda_s} \sqrt{\lambda_D^2 \cdot T_D^2 + \lambda_d^2 \cdot T_d^2}, \quad (2.21)$$

средний зазор

$$S = 0,5[(EC - ec) + (\alpha_D \cdot T_D - \alpha_d \cdot T_d)] - \alpha_s \cdot T_s; \quad (2.22)$$

допуск звена размерной цепи в виде зазора

$$T_{cs} = 2 \cdot S + T_s. \quad (2.23)$$

В формулах (2.21), (2.22), (2.23) T_D и T_d – допуски отверстия и вала, образующих соединения с зазором; EC и ec – средние отклонения диаметров отверстия и вала, образующих соединение; α_D , α_d , α_s – коэффициенты относительной асимметрии рассеяния размеров отверстия, вала и зазоров в посадке; λ_D , λ_d , λ_s – коэффициенты относительного рассеяния размеров отверстия, вала и зазоров в посадке.

При расчетах размерных цепей с элементами в виде зазоров используются следующие значения коэффициентов относительного рассеяния: $\lambda_s = 1$, $\lambda_D = \lambda_d = 1,2$ [87].

Во время оценки наименьшего функционального натяга, при отсутствии необходимости в учете частоты вращения вала и принятии звеньев, в виде радиального биения, в качестве векторных, достаточно расчетов по формуле (2.19). Однако результат расчетов с учетом динамической составляющей учитывает возможность «прокручивания» вала в манжете, и потому является более точным, и позволяет более полно определить объемы утечек.

2.4 Методика расчета и выбора размеров компенсаторов с помощью размерного анализа

Точность изготовления деталей характеризует соответствие геометрических параметров реально изготовленной детали, параметрам, которые заданы для этой детали нормативной документацией. По мере развития технического прогресса, точность машин должна постоянно расти, обеспечивая постоянное улучшение их качества. Однако высокая точность требует высоких затрат на производство, поэтому установление оптимального уровня точности является наиболее рациональным методом решения задачи параметрической надежности.

В тех случаях, когда заданная точность не может быть обеспечена, применяются методы неполной взаимозаменяемости: селективная сборка, методы компенсации и методы подбора.

С позиции трудоемкости работ наиболее рационально применять селективную сборку, сущность которой заключается в разбиении допусков сопрягаемых деталей на группы [163, 156, 155]. Методы подбора, наоборот, наиболее трудоемки, но могут широко использоваться в условиях единичного и мелкосерийного производства [9].

При расчете сборочных размерных цепей с целью достижения заданной точности замыкающего звена также используются вышеперечисленные методы, но уже со своими особенностями реализации [65, 151].

Одним из методов достижения заданного уровня точности является метод компенсации. Данный метод используется, когда присутствует значительное различие между требуемым и рассчитанным допуском. Для компенсации могут использоваться прокладки, втулки, кольца, винтовые устройства, припуски на пригонку, набор деталей разной толщины, эксцентрики, зазоры, деформирование деталей, в таком случае размер компенсатора должен включаться в расчетную схему. Применение различных компенсаторов позволяет, значительно уменьшить суммарную погрешность влияющих размеров, тем самым обеспечивая заданную точность [77].

Методика расчета и выбора размеров компенсаторов для приведения отклонения от соосности соединяемых с помощью муфты редукторов в регламентируемые технической документацией пределы заключается в выполнении следующей последовательности действий:

1. составляют размерную цепь, где в качестве замыкающего звена выступает отклонение от соосности соединяемых агрегатов;
2. выявляют составляющие звенья, размеры которых влияют на размер замыкающего звена;
3. назначают стандартные нормы точности на все составляющее звенья, кроме звена – компенсатора:

4. определяют коэффициент относительного рассеяния замыкающего звена λ_Σ по формуле [87]:

$$\lambda_\Sigma = 1 + \frac{0,55 \left(\sqrt{\sum k_i^2 \lambda_i^2 T_i^2} - \sqrt{\sum k_i^2 T_i^2} \right)}{\sqrt{\sum |k_i| T_i}}. \quad (2.20)$$

5. рассчитывают среднее отклонение исходного размера замыкающего звена em_Σ по формуле:

$$em_\Sigma = \sum_{i=1}^n k_i (em_i + \alpha_i T_i) - \alpha_\Sigma T_\Sigma. \quad (2.21)$$

6. определяют допуск на замыкающее звено T_Σ по формуле:

$$T_\Sigma = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n k_i^2 \lambda_i^2 T_i^2}}{\lambda_\Sigma}. \quad (2.22)$$

7. рассчитывают среднее отклонение для компенсатора em_k по формуле:

$$em_k = \frac{em_\Sigma - em_\Sigma}{k_k}, \quad (2.23)$$

где k_k – коэффициент приведения компенсатора, em_Σ – середина поля допуска замыкающего звена.

8. определяют наибольший расчетный размер компенсатора $Y_{k\max}$ по формуле:

$$Y_{k\max} = Y_k + em_k + \frac{0,5T_k}{|k_k|}, \quad (2.24)$$

где T_k – допуск компенсатора, Y_k – номинальный размер компенсатора.

9. определяют размеры компенсаторов.

Для условий набора одинаковых компенсаторов – прокладок, толщина одной прокладки – h , определяют в соответствии с неравенством (2.25), количество прокладок – m , в соответствии с неравенством (2.26):

$$h \leq \frac{T_\Sigma}{|k_k|}, \quad (2.25)$$

$$m \geq \frac{Y_{k \max}}{h}. \quad (2.26)$$

Для условий набора прокладок разной толщины, по неравенству (2.2) сначала рассчитывают толщину самой тонкой прокладки – h_1 . Толщина самой толстой прокладки – h_m , определяется по неравенству (2.26). Толщина остальных прокладок рассчитывается по прогрессии (2.27), так чтобы, их сумма была приблизительно равна $Y_{k \max}$.

$$h_m \geq 0,5Y_{k \max}, \quad (2.27)$$

$$h_n \approx 2h_{n-1}. \quad (2.28)$$

Таким образом, составлена последовательность действий для расчета и выбора размеров компенсаторов для приведения отклонения от соосности соединяемых с помощью муфты редукторов.

2.5 Выводы

1. Определены основные характеристики процесса комплектации и сборки при ремонте КПП (входы, выходы, механизмы и ресурсы). Разработаны цифровые модели процесса комплектации и сборки КПП в нотациях IDEF0 и BPMN. Определены основные пути применения имитационного моделирования с использованием построенных моделей.

2. Усовершенствованы методики размерного анализа для случаев составления и расчета:

- размерной цепи для соединения «вал- уплотнение», где предложено подразделять звенья на две категории – статические отклонения от соосности и динамические – в виде радиального биения;
- размеров компенсаторов для приведения отклонения от соосности соединяемых с помощью муфты валов редукторов в регламентируемые технической документацией пределы.

3 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Выбор средств измерений для контроля размеров деталей соединения «вал-уплотнение»

Для исследования рассеяния размеров деталей, образующих соединение «вал-уплотнение» необходимо выбрать средства измерений. В качестве объекта исследования выбрано соединение выходного вала (в виде фланца) с манжетой коробки передач двигателя ЯМЗ-239. Эскиз соединения фланца с манжетой коробки передач ЯМЗ-239 представлен на рисунок 3.3.

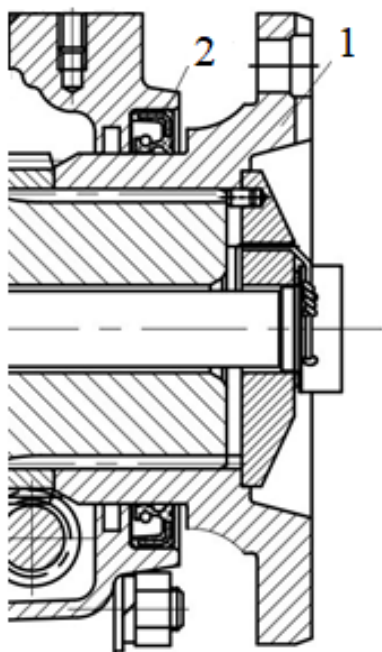


Рисунок 3.1 – Эскиз соединения фланца с манжетой коробки передач ЯМЗ:
1 – фланец; 2 – манжета

Параметры точности фланцев и манжет 1.2–100×125–12 выходного вала (фланца) коробки передач ЯМЗ-239 представлены в таблица 3.1.

Таблица 3.1 – Параметры точности фланцев и манжет 1.2–100×125–12 выходного вала коробки передач ЯМЗ-239

Наименование измеряемой детали	Номинальный размер с отклонениями, мм	Допуск, мм	Размер предельно допустимый без ремонта, мм
Наружный диаметр фланца	$100h10_{(-0,14)}$	0,14	99,7
Отверстие манжеты	$100_{-3,0}^{-2,0}$	1,0	*

* при ремонте все манжеты заменяются на новые

Средства измерений внутреннего диаметра манжеты и посадочной поверхности под манжету на валу выбирались в соответствии с требованиями ГОСТ 8.051-81 [72]. Выбор номенклатуры средств измерений для отверстия манжеты и для вала с учетом метрологических характеристик из условия:

$$\pm\Delta_{\text{lim}} \leq \pm\delta, \quad (3.1)$$

где $\pm\Delta_{\text{lim}}$ – предельная погрешность средства измерений; $\pm\delta$ – допускаемая погрешность измерения.

Допускаемую погрешность измерения δ для линейных величин определяют в зависимости от номинального размера и качества по ГОСТ 8.051-81 [72]. Для наружного диаметра фланца (выходной вал коробки перемены передач) $d_n = \varnothing 100h10_{(-0,14)}$ имеем $T = 140$ мкм и $\delta = \pm 30$ мкм.

Для измерения диаметров концов валов выбрано средство измерений максимально возможной точности. Метрологические характеристики средства измерений представлены в таблица 3.2.

Таблица 3.2 – Метрологические характеристики средства измерений диаметров концов валов

Средство измерений	Условное обозначение	Диапазон показаний, мм	Диапазон измерений, мм	Цена делений, мм	Погрешность измерений*, мм
Скоба рычажная	СРП 100- 0,001	$\pm 0,07$	75-100	0,001	$\pm 0,0014$

* ± 30 делений от нулевого штриха (согласно ГОСТ)

Для измерения внутреннего диаметра манжеты в исследованиях использовался двухкоординатный измерительный прибор ДИП-6 с оптико-электронной измерительной системой НИИК-890, дискретность отсчета 0,01 мм (рисунок 3.2).

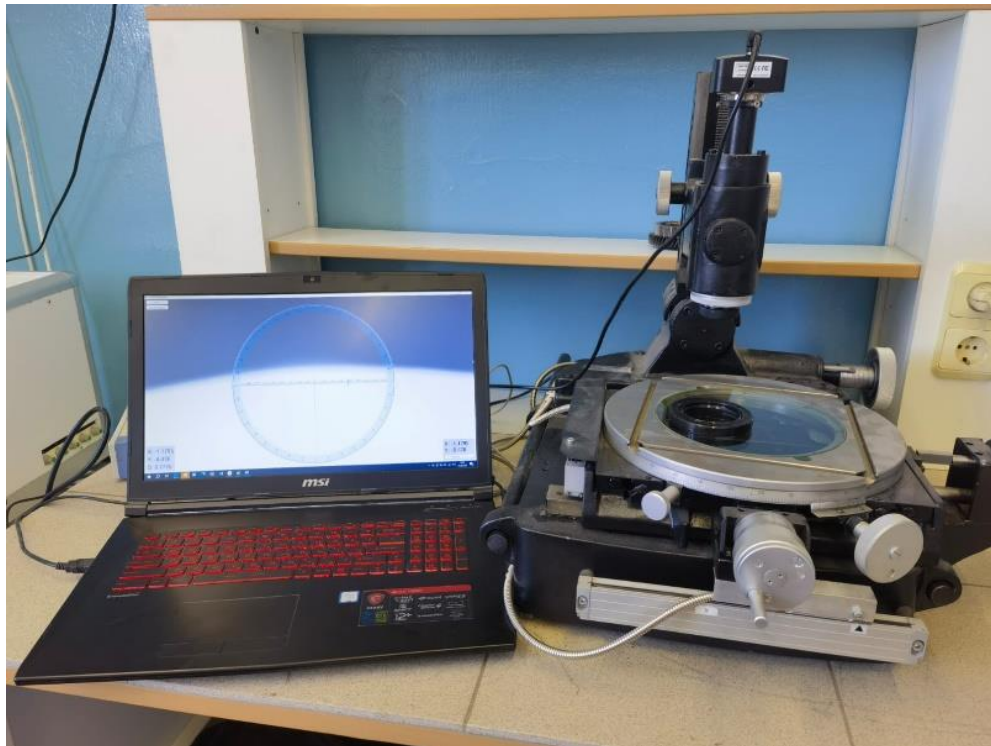


Рисунок 3.2 – Контроль внутреннего диаметра манжеты

3.2 Методика определения закона распределения рассеяния размеров деталей соединений «вал-уплотнение»

Для оценки вероятностных характеристик соединений «вал-уплотнение» необходимо установить законы распределения рассеяния размеров валов и манжет, образующих данное соединение. Кроме этого, закон распределения рассеяния размеров и его характеристики (математическое ожидание, среднеквадратическое отклонение) необходимы для обоснованного выбора средств измерений. С целью оценки закона распределения рассеяния размеров валов и манжет необходимо провести прямые измерения с многократными наблюдениями.

При планировании прямых измерений с многократными наблюдениями необходимо определить количество наблюдений. Количество наблюдений зависит от

двух факторов: требуемой достоверности полученного результата и реальных временных возможностей для проведения эксперимента. В нашем случае, для подтверждения гипотезы о законе распределения размеров валов и манжет с достоверностью не менее 95% необходимо провести 100 кратные измерения [138].

Полученные результаты прямых измерений с многократными наблюдениями обрабатывались в Excel по методике ГОСТ 8.207-76 [73] в следующей последовательности:

1. Оценка среднего арифметического значения результатов многократных наблюдений. Полученное среднее арифметическое значение принимают за оценку истинного результата измеряемой величины (диаметра вала, манжеты).

2. Расчет среднего квадратического отклонения среднего арифметического значения результата измерений и среднего квадратического отклонения единичного результата наблюдения.

3. Проверка наибольшего и наименьшего из полученных результатов наблюдений (вариационного ряда) на наличие грубых погрешностей (промахов). В нашем случае был использован критерий Гибса, т.к. число измерений $n = 100$ [73].

4. Проверка гипотезы о том, что результаты наблюдений принадлежат нормальному распределению. В нашем случае, т.к. число измерений $n = 100$, был использован критерий согласия χ^2 (критерий Пирсона). Расхождение между эмпирической и теоретической кривой оценивают с помощью величины [73]:

$$\chi_k^2 = \sum_{i=1}^m \frac{(n_i - nP_i)^2}{nP_i}, \quad (3.2)$$

где n_i – i -ый результат измерений вариационного ряда; P_i – вероятность i -ого результата измерений вариационного ряда.

5. Оценка границ неисключенной систематической погрешности результата измерения. В нашем случае, в качестве границ неисключенной систематической погрешности результата измерения принимались границы погрешности используемых средств измерений, указанные в п.3.1.

6. Оценка границ случайной составляющей погрешности результата измерений исходя из соотношения среднего квадратического отклонения среднего арифметического значения результата измерений и неисключенной систематической погрешности.

7. Оценка доверительных границ погрешности результата измерения.

3.3 Нормирование допускаемой погрешности и выбор средств измерений при контроле отклонения формы и расположения поверхностей

Согласно ГОСТ 2.308–2011 «Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Указания допусков формы и расположения поверхностей» [69] овальность и конусообразность цилиндрических поверхностей деталей являются в общем виде отклонением формы (Δ_{EF}). Измерения овальности и конусообразности являются косвенными, т.к. расчет овальности и конусообразности ведется по формуле:

$$\Delta_{EF} = 0,5(d_{\max} - d_{\min}), \quad (3.3)$$

где $d_{\max}$ – наибольший размер детали; $d_{\min}$ – наименьший размер детали.

Погрешность косвенного результата измерений, формируется в зависимости от влияния частных производных аргументов, входящих в зависимость косвенно измеряемой величины, и от погрешностей применяемых средств измерений.

Погрешность средства измерений аргумента, входящего в формулу косвенно измеряемой величины, можно рассматривать как неисключенную систематическую погрешность. Доверительные границы неисключенной систематической погрешности результата косвенного измерения ($\pm\theta_p$) при линейной зависимости (3.3) можно рассчитать по формуле [168]:

$$\pm\theta_p = \frac{k\sqrt{2 \cdot \Delta^2}}{2}, \quad (3.4)$$

где Δ – погрешность измерения размера детали; k – поправочный коэффициент.

В соответствии с нормативным документом МИ 2083-90 «ГСИ. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей»

[168] при доверительной вероятности $P = 0,95$ поправочный коэффициент k принимается равным 1,101. При доверительной вероятности $P = 0,99$ поправочный коэффициент k принимается равным 1,276, если число суммируемых составляющих $m = 2$.

При выборе средства измерений для контроля овальности и конусообразности (косвенных измерений) необходимо, так же, как и при прямых измерениях, чтобы погрешность измерения контролируемого параметра (3.3) была меньше или равна допускаемой погрешности измерения овальности и конусообразности, т.е. выполнялось условие (3.1).

Для данных контролируемых величин (овальность и конусообразность) допускаемая погрешность измерения не определена и для ее расчета целесообразно использовать метрологическое соответствие [137]

$$\pm \delta = 0,33 \cdot T, \quad (3.5)$$

где T – допуск на контролируемый параметр.

При анализе отклонений формы и расположения поверхностей, за допуск на контролируемый параметр можно принять величину нормируемого отклонения овальности и конусообразности согласно технической документации.

Следовательно, условие выбора средства измерений для контроля овальности и конусообразности будет иметь вид:

$$\pm \Delta_{\text{lim}} \leq \frac{2\delta}{k\sqrt{2}}, \quad (3.6)$$

Таким образом, разработана методика расчета допускаемой погрешности и разработаны рекомендации по выбору средств измерений для контроля таких важных геометрических параметров деталей, как отклонения формы и расположения поверхностей деталей применительно к ремонтному производству.

Использование в реальной практике разработанных критериев выбора средств измерений повысит точность и достоверность результатов измерения отклонения формы и расположения поверхностей деталей при ремонте двигателей, что значительно снизит риски принятия бракованных деталей «как

годные» с превышением норм отклонения формы и расположения поверхностей, а также снизит риски забракования годных изделий.

3.4 Разработка компьютерной программы для расчета допуска звена размерной цепи в виде зазора

На основании разработанной методики, представленной в п. 2.2 – 2.3 составлен алгоритм расчета допуска звена размерной цепи в виде зазора (рисунок 3.3).

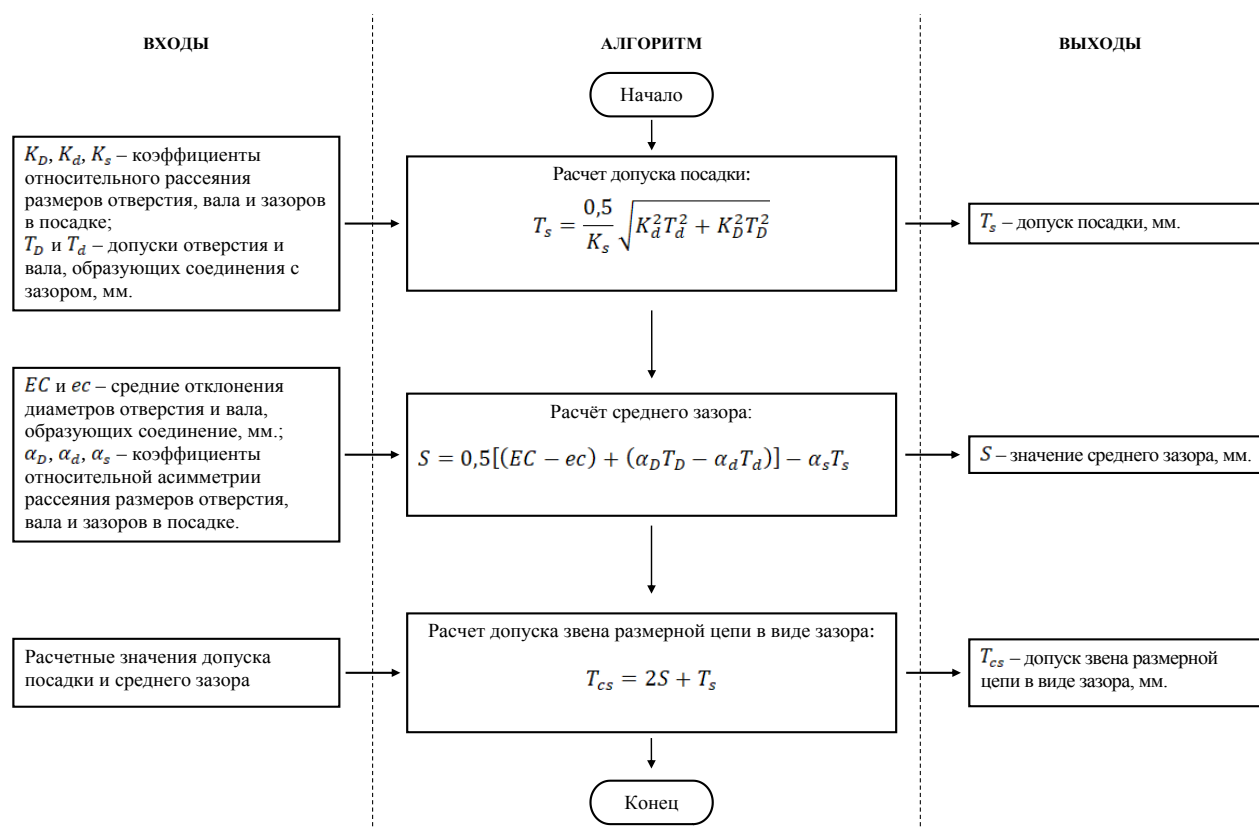


Рисунок 3.3 – Алгоритм расчета допуска звена размерной цепи в виде зазора

На базе разработанной методики и представленного алгоритма (рисунок 3.3) на языке программирования Python разработаны компьютерные программы расчета допуска звена размерной цепи в виде зазора. Пользовательский интерфейс компьютерных программ представлен на рисунке 3.4.

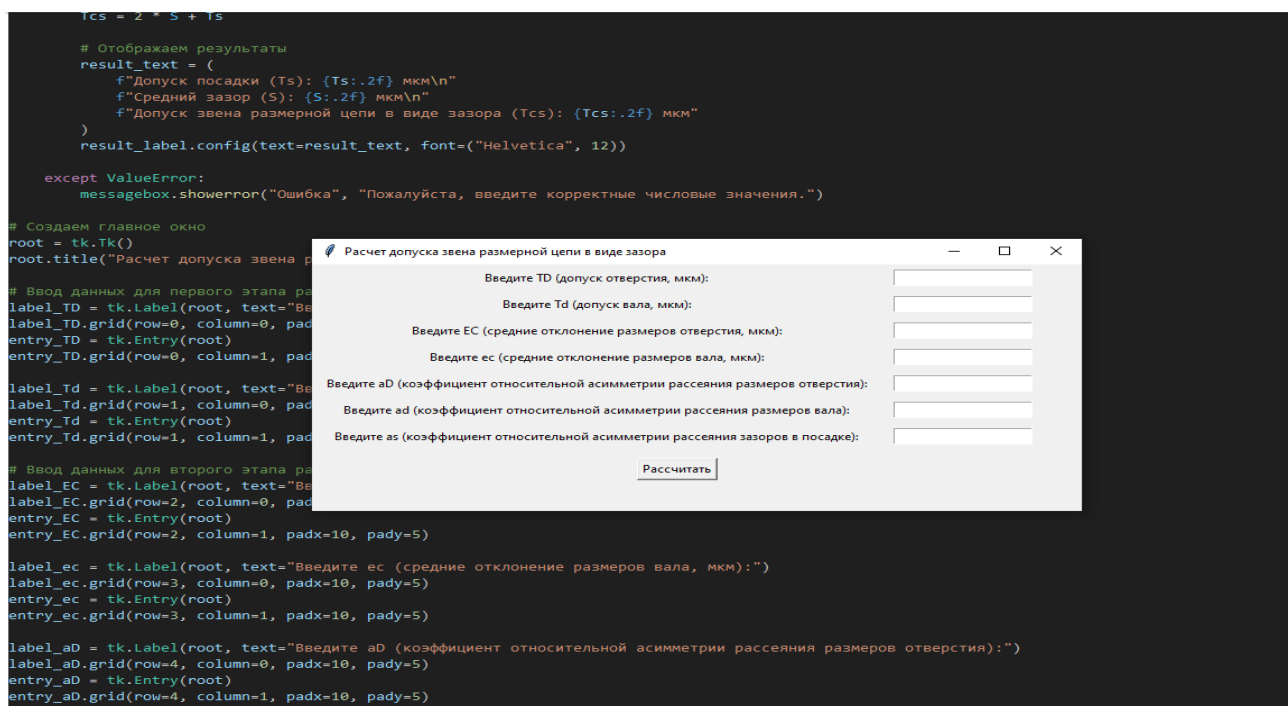


Рисунок 3.4 – Пользовательский интерфейс компьютерной программы для расчета допуска звена размерной цепи в виде зазора

Использование, разработанной компьютерной программы, позволит значительно сократить время и повысить точность расчетов допуска звена размерной цепи в виде зазора при проектировании КПП ЯМЗ и при создании ремонтной документации.

3.5 Выводы

1. Для исследования рассеяния размеров, деталей соединения выходного вала (фланца) с манжетой коробки передач двигателя ЯМЗ-239, выбраны средства измерений и составлена методика обработки экспериментальных данных прямых измерений с многократными наблюдениями.

2. Разработана методика расчета допускаемой погрешности и разработаны рекомендации по выбору средств измерений для контроля отклонения формы и расположения поверхностей деталей.

3. На базе разработанной методики расчета допуска звена размерной цепи КПП ЯМЗ составлен алгоритм и разработана компьютерная программа, написанная на языке программирования Python.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

4.1 Исследование параметров рассеяния натягов в соединении выходного конца вала (фланца) КПП ЯМЗ с манжетой

Соединение «вал-уплотнение» является одним из важнейших в машинах и оборудовании для сельского хозяйства. От долговечности работы данного соединения зависит ресурс работы агрегата, где оно установлено [135, 134]. Долговечность работы соединения «вал-уплотнение» зависит от различных факторов, которые укрупнено можно рассмотреть по стадиям жизненного цикла агрегата.

При проектировании для обеспечения надёжности соединения «вал-уплотнение» должны быть учтены такие факторы, как: материал изготовления вала и манжеты, шероховатость и твердость поверхности вала, тип конструкции манжеты [101], нагрузка, параметры давления [94], параметры размерной взаимозаменяемости [89].

Параметры размерной взаимозаменяемости включают в себя: отклонения формы и расположение поверхностей в виде отклонение от соосности и радиальное биение вала относительно манжеты, а также параметры точности деталей и соединения в плане обеспечения требуемого конструктивного натяга.

На стадии изготовления на долговечность соединения «вал-уплотнение» будут влиять такие факторы, как точность обработки поверхности вала под манжету, а также точность технологического процесса изготовления манжет. На этом этапе возможно формирование заданной и повышенной долговечности манжеты, путем внесения модификаторов в её материал [140]. Долговечность вала можно повысить путем нанесения специальных износостойких покрытий [144, 59].

На стадии эксплуатации долговечность соединения «вал-уплотнение» зависит от качества и состава применяемых смазочных материалов, режимов эксплуатации и запыленности внешней и внутренней среды.

Исследования, проведенные инженерами Ярославского моторного завода, выявили, что в процессе эксплуатации силовых агрегатов ЯМЗ (двигатель в сборе с КПП) при наработке свыше 8000-10000 тыс. часов на поверхности вала под рабочей кромкой манжет появляется износ на глубину до 0,2 мм, приводящий к утечкам смазочного материала. Замена старой манжеты на новую в такой ситуации течь масла не устраняет [43]. Полученные результаты свидетельствуют о том, что необходимо исследовать качество формирования первоначального диапазона натягов в соединении «вал-уплотнение» и их соответствие параметрам размерной взаимозаменяемости, заложенным в конструкторской документации на этапе проектирования агрегата. Если данные требования будут выполнены, то на следующем этапе необходимо проведение анализа отклонений от соосности и радиального биение вала относительно манжеты. Причем исследовать необходимо как новые соединения, так и изношенные. Это может быть возможно путем составления размерных цепей, формирующих данные отклонения.

Долговечность соединения «вал-уплотнение» обеспечивается заданными величинами натягов, получаемых при сборке. При эксплуатации происходит уменьшение натягов подвижного соединения из-за износа поверхности вала и манжеты, что приводит к началу утечек и отказу соединения.

Исследования проводились с целью оценки вероятностных характеристик рассеяния соединений внутреннего диаметра манжеты и наружного диаметра фланца КПП ЯМЗ-239.

Для исследований были отобраны 100 первичных валов коробки передач двигателя ЯМЗ и 100 новых манжет 1.2–100×125–12. Проведены измерения поверхности под манжету у новых фланцев, и внутренних диаметров отверстий манжет. По результатам измерений были рассчитаны параметры распределения

рассеяния диаметров посадочных поверхностей под манжету фланцев и внутренних диаметров отверстий манжет (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Параметры распределения рассеяния диаметров посадочных поверхностей под манжету фланцев и внутренних диаметров отверстий манжет

Параметры распределения рассеяния	Усл. обозначение	Манжеты	Фланцы
Среднее арифметическое, мм	$\bar{x}$	97,578	99,956
Среднее квадратическое отклонение, мм	σ	0,176	0,018
Зона рассеяния, мм	ω	1,056	0,108

По данным, представленным в таблица 4.1 построим гистограммы и графики распределения рассеяния контролируемых параметров, рисунки 4.1 – 4.2.

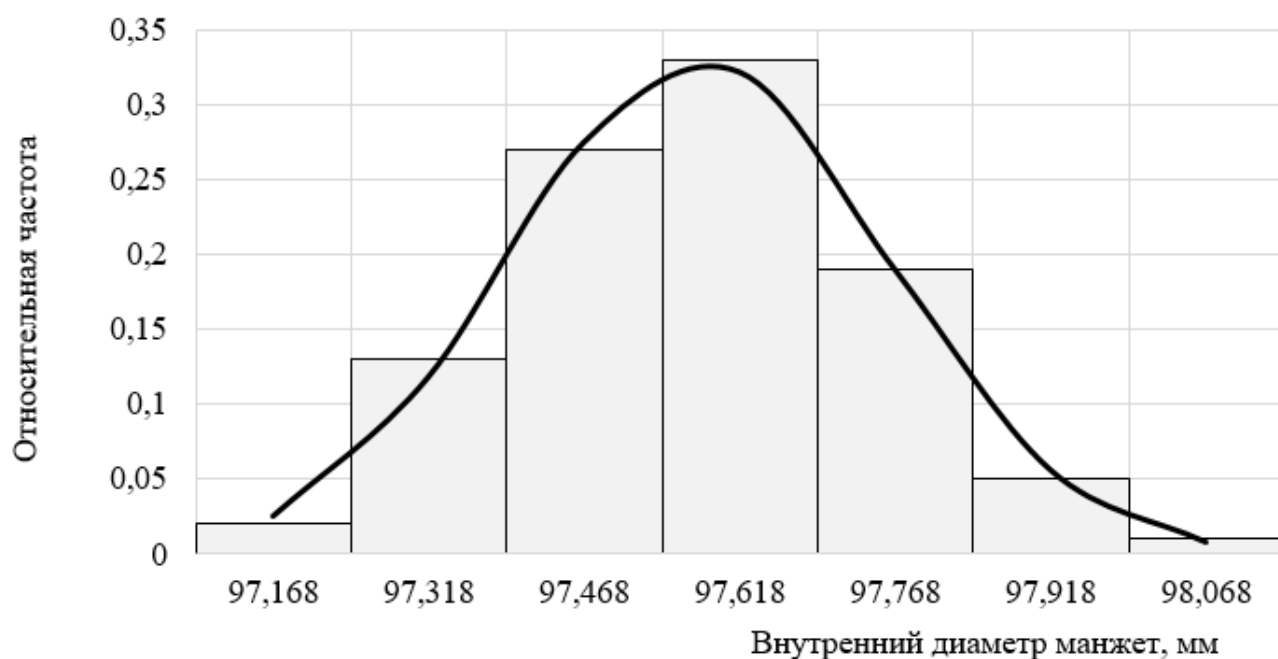


Рисунок 4.1 – Распределение внутренних диаметров манжет

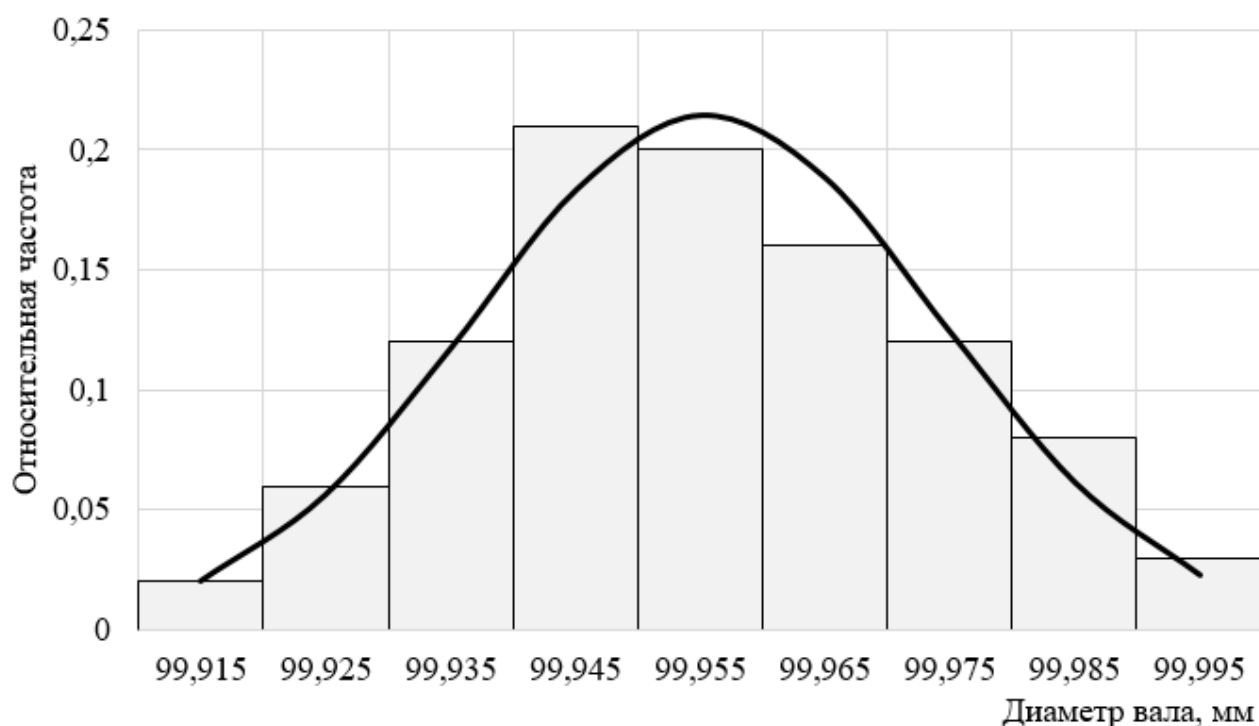


Рисунок 4.2 – Распределение поверхности фланца под манжету

Для оценки точности и настроенности технологического процесса обработки поверхности фланца под манжету и внутреннего диаметра манжеты, воспользуемся формулами:

– коэффициент точности технологического процесса:

$$K_T = \frac{T}{6 \cdot \sigma}, \quad (4.1)$$

– коэффициент настроенности технологического процесса:

$$K_C = \frac{X_{\text{ср}} - \bar{X}}{2 \cdot T}, \quad (4.2)$$

где $X_{\text{ср}}$ – середина поля допуска контролируемого параметра.

Результаты расчетов показателей точности и настроенности технологического процесса обработки поверхности фланцев под манжету и внутренних диаметров манжет, рассчитанные по формулам (4.1) - (4.2), представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Параметры точности и настроенности технологического процесса обработки поверхности фланцев под манжету и внутренних диаметров манжет

Коэффициент	Манжеты	Фланцы
Точности технологического процесса, K_T	0,95	1,27
Настроенности технологического процесса, K_C	0,06	-0,09

Из данных, представленных в таблице 4.4 и на рисунке 4.1 можно сделать вывод, что точность процесса формирования внутреннего диаметра манжет хорошая, настроенность процесса удовлетворительная, имеется небольшой сдвиг в сторону неисправимого брака.

Данные представленные в таблице 4.2 и на рисунке 4.2 свидетельствуют о том, что при изготовлении фланца обеспечивается точность технологического процесса выше требуемой с удовлетворительной настроенностью, имеется сдвиг в сторону исправимого брака, что обеспечивает вероятность появления неисправимого брака равную нулю.

Такие параметры распределения связаны с необходимостью обеспечения шероховатости поверхности вала под манжету $Ra = 0,32$ мкм, что можно сформировать:

- тонким шлифованием – это будет 6-й или 7-й квалитет точности;
- алмазным обтачиванием продольной подачи – это будет 6-й квалитет точности;
- обычным полированием – это будет 6-й квалитет точности.

Используя данные, представленные в таблице 4.1, проведем оценку рассеяния вероятных натягов в соединении «фланец-манжета», результаты расчетов представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Вероятностные характеристики рассеяния натягов в соединении «фланец-манжета»

Характеристика рассеяния натягов в соединении «фланец-манжета»	Значение
Среднее квадратическое отклонение зазоров (натягов), мм	0,177
Средний действительный натяг, мм	2,378
Коэффициент риска по наибольшему натягу	2,92
Коэффициент риска по наименьшему натягу	3,51
Предельный наибольший натяг, мм	2,91
Предельный наименьший, мм	1,843
Вероятный процент бракованных соединений по наибольшему натягу, %	0,17
Вероятный процент бракованных соединений по наименьшему натягу, %	0,01
Суммарный вероятный процент брака, %	0,18

Используя данные, представленные в таблице 4.3, построим схему рассеяния действительных натягов в посадке «фланец-манжета» (рисунок 4.3).

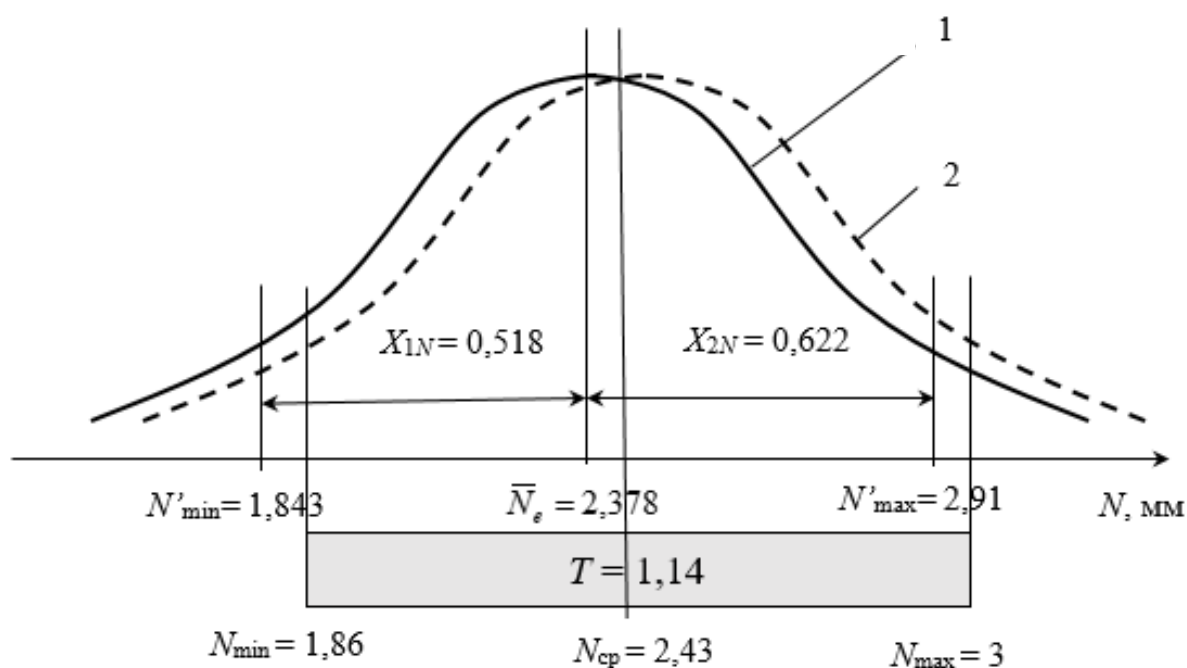


Рисунок 4.3 – Схема к расчету брака при сборке соединения «манжета-вал»:

- 1 – реальное рассеяние натягов в посадке;
- 2 – идеальное рассеяние натягов в посадке.

Анализ рассеяния натягов позволил сделать следующие выводы: вероятный процент бракованных соединений, как характеристики долговечности, составил 0,01%. Полученное значение свидетельствует о том, что качество изготовления манжет и фланцев находится на высоком уровне, качество обработки поверхности фланца под манжету обеспечивает запас по требуемой точности, а рассеяния размеров отверстий манжет показывает практически полное совпадение с требуемыми характеристиками.

Таким образом, точность изготовления деталей, образующих соединение «фланец-манжета», отвечает заданным требованиям, а возникающие проблемы с утечками смазочного материала из уплотнений следует искать исходя из параметров износостойкости указанных деталей, а также исходя из анализа износа влияющих размеров, образующих размерную цепь, где в качестве исходного замыкающего звена будет выступать отклонение от соосности и радиальное биение вала по отношению к диаметру манжеты.

4.2 Расчет суммарного отклонения от соосности выходного вала КПП ЯМЗ относительно манжеты

Нормирование точности отдельных сборочных единиц и соединений является достаточно сложной задачей и требует индивидуального подхода в каждом случае [20, 34]. Многие функциональные параметры можно определить только после сборки с помощью методов расчета размерных цепей [147, 63, 163]. В ряде случаев размерный анализ применяется для определения эксплуатационных характеристик изделий [62, 50]. Характеристики норм точности звеньев размерной цепи назначаются по требованиям единой системы допусков и посадок, при этом при производстве используют технологии допускового контроля с целью обеспечения качества сборки.

Самыми распространенными уплотнениями в сборочных единицах и агрегатах машин являются резиновые армированные манжеты. Теория герметичности манжет еще не разработана, поэтому проводится целый ряд

исследований по совершенствованию и обеспечению качества уплотнительных устройств подшипниковых узлов техники [135, 133]. В теоретическом плане исследованы влияния: давления манжеты на поверхность вала [131], состава резины манжет на их работоспособность, конструктивной формы рабочей кромки манжетного уплотнения на обеспечение гарантированной герметизации [101, 152]. В практическом плане изучаются вопросы, связанные со снижением коэффициента трения и повышения износостойкости поверхностей манжеты [64] и вала [144, 59, 105].

На начало утечек в соединении «вал – манжета» оказывают влияние такие геометрические параметры, как радиальное биение вала Δ_r и отклонение от соосности осей вала и манжеты Δ_c .

Согласно требованиям действующего в настоящее время ГОСТ 8752-79 [74], предельное радиальное биение и допуск соосности не должны превышать заданных величин, указанных в таблицах 4.4, 4.5.

Таблица 4.4 – Предельные радиальные биения поверхностей вала, контактирующей с манжетой, в зависимости от частоты вращения по ГОСТ 8752-79 [74]

Параметр	Величины					
Частота вращения вала, мин ⁻¹	до 1000	св. 1000 до 2000	св. 2000 до 3000	св. 3000 до 4000	св. 4000 до 5000	св. 5000
Предельное радиальное биение поверхности вала, контактирующей с манжетой, мм,	0,18	0,15	0,12	0,10	0,08	0,02

Таблица 4.5 – Предельные допуски соосности посадочного места под манжету относительно оси вращения вала, в зависимости от диаметра вала по ГОСТ 8752-79 [74]

Параметр	Величины			
Диаметр вала, мм	до 55	св. 55 до 120	св. 120 до 320	св. 320 до 500
Допуск соосности посадочного места под манжету относительно оси вращения вала, мм	0,10	0,15	0,20	0,25

Главной проблемой определения суммарного отклонения от соосности и радиального биения является само составление размерной цепи, выявление звеньев в виде зазора, а также векторных статических и динамических звеньев. Необходимо также определить номинальные значения допусков размеров, отклонений формы и расположения поверхностей.

Используя методику, представленную в п. 2.3, составим размерную цепь и определим при каких значениях отклонений от соосности и радиального биения начнутся утечки в соединении «вал – манжета» КПП ЯМЗ-239.

Исходя из фрагмента сборочного чертежа КПП ЯМЗ-239, рисунок 2.3, можно выделить элементы деталей, параметры точности которых оказывают влияние на замыкающее звено в виде отклонения от соосности и радиального биения диаметра манжеты и диаметра фланца. Согласно рисунок 2.3, это следующие элементы:

T_1 – отклонение от соосности отверстий крышки демультипликатора (202.1721205-40) под манжету и подшипник 50217K5;

T_2 – наличие зазора в посадке наружного кольца подшипника 50217K5;

T_3 – допуск на разностенность (радиальное биение) наружного кольца подшипника 50217K5;

T_4 – радиальный зазор в подшипнике 50217K5;

T_5 – допуск на разностенность (радиальное биение) внутреннего кольца подшипника 50217K5;

T_6 – наличие зазора в посадке внутреннего кольца подшипника 50217K5;

T_7 – отклонение от соосности (радиальное биение) поверхности наружного диаметра шлицев вала относительно поверхности вала под подшипник;

T_8 – зазор в посадке между наружным диаметром шлицевого вала и шлицевой втулкой (фланцем), соединение 80×H7/g6×4×9H/9h ГОСТ 6033-80;

T_9 – отклонение от соосности (радиальное биение) наружного диаметра шлицевой поверхности фланца и наружной поверхности фланца под манжету.

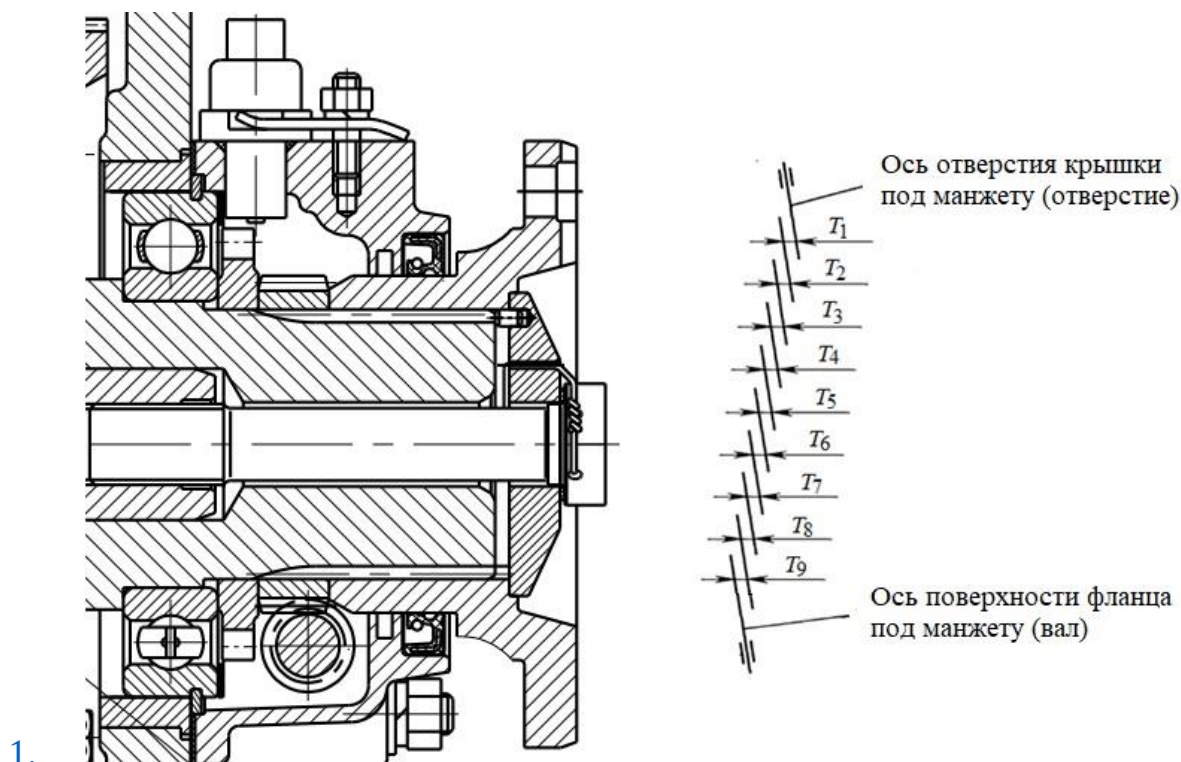


Рисунок 4.4 – Размерная цепь для расчета суммарной величины отклонения от соосности

Из описания звеньев размерной цепи выходного конца вала (фланца) КПП ЯМЗ-239 видно, что определенные звенья смещают ось вала по отношению к манжете в виде зазора и отклонения от соосности, а другие – в виде радиального биения.

Расчет смещения осей деталей в посадках из-за наличия зазора в звеньях, входящих в размерную цепь КПП ЯМЗ-239, представлен в таблица 4.6.

Таблица 4.6 – Расчет смещения осей деталей в посадках из-за наличия зазора в звеньях, входящих в размерную цепь выходного конца вала КПП ЯМЗ-239

Обозначение	Посадка	Допуски		Средние значения		Коэффициенты		Допуск T_{cs} , мкм
		Обозначение	Значение, мкм	Обозначение	Значение, мкм	λ	α	
T_2	$\varnothing 150H6/l5$	T_D	25	EC	+12,5	1,2	-0,1	37,9
		T_d	15	ec	-7,5	1,2	+0,1	
		T_s	15,9	S	11	1,0	-0,1	
T_6	$\varnothing 85L5/k5$	T_D	15	EC	-7,5	1,2	-0,1	0
		T_d	15	ec	+10,5	1,2	+0,1	
		T_s	9	S	-10,5	1,0	-0,1	
T_8	$\varnothing 80H7/g6$	T_D	30	EC	+15	1,2	-0,1	50,1
		T_d	19	ec	-14,5	1,2	+0,1	
		T_s	21,3	S	14,4	1,0	-0,1	

Характеристики звеньев размерной цепи выходного конца вала КПП ЯМЗ-239 представлены в таблица 4.7.

Таблица 4.7 – Характеристики звеньев размерной цепи выходного конца вала КПП ЯМЗ-239 относительно манжеты

Обозначение	Тип звена	Допуск, мм	Коэффициенты		
			k	α	λ
T_1	cv	0,020	1,0	0	0,75
T_2	cs	0,0379	1,0	0	1,00
T_3	cv	0,011	1,0	0	0,75
T_4	cv	0,036 / 0,15*	1,0	0	0,75
T_5	rv	0,006	1,0	0	0,75
T_6	cs	0,000	1,0	0	1,00
T_7	rv	0,020	1,0	0	0,75
T_8	rv	0,0501	1,0	0	1,00
T_9	rv	0,020	1,0	0	0,75

Условные обозначения: cs – звено в виде зазора; cv – векторное статическое звено; rv – векторное динамическое звено. * – предельно допустимый радиальный зазор.

Результаты расчета параметров размерной цепи выходного конца вала КПП ЯМЗ-239 относительно манжеты представлены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Результаты расчета параметров размерной цепи выходного конца вала КПП ЯМЗ 239 относительно манжеты

Наименование параметра	Обозначение	Значение
Расчет по предлагаемой методике		
Суммарный допуск звеньев в виде зазора	$T_{\Sigma cs}$	0,0379 мм
Суммарный допуск векторных статических звеньев	$T_{\Sigma cv}$	0,0496 мм
Суммарный допуск векторных динамических звеньев	$\Delta_r = T_{\Sigma rv}$	0,0546 мм
Суммарное отклонение от соосности	Δ_c	0,0624 мм
Расчет по классической методике		
Суммарный допуск звеньев в виде зазора	$T_{\Sigma cs}$	0,0628 мм
Суммарный допуск векторных звеньев	$T_{\Sigma cv}$	0,0276 мм
Суммарное отклонение от соосности	Δ_c	0,0686 мм

В таблица 4.8 показано, что именно для соединения вращающегося вала с резиновой армированной манжетой при составлении и расчете размерной цепи следует обязательно разделять звенья на статические и динамические. Такое разделение необходимо для выявления звеньев в виде радиального биения, которое попеременно старается раскрыть стык манжеты с валом, и для выявления именно отклонения от соосности, которое действует статически и приводит так же к раскрытию стыка, но в одном заданном направлении. При определенных частотах вращения, даже при наличии натяга в соединении, в результате действия радиального биения, манжета может не успевать закрыть стык – и начнутся утечки. Расчет по классической методике – только в статике, как показано в таблице 4.8, дает искаженный результат.

Из данных таблицы 4.8 видно, что суммарное радиальное биение составляет 0,0546 мм, что не превышает предельной величины, указанной в таблице 4.4, и равной 0,15 мм. Это свидетельствует о том, что сформирован запас точности по радиальному биению, равный 2,75. Звенья, составляющие размерную цепь в виде радиальных биений, практически не изнашиваются. В процессе эксплуатации они не будут оказывать существенного влияния на динамику роста суммарного радиального биения.

С другой стороны, из данных таблицы 4.8 видно, что суммарное отклонение от соосности составляет 0,0624 мм, что не превышает предельной величины, указанной в таблице 4.5 и равной 0,15 мм. Это свидетельствует о том, что сформирован запас точности по отклонению от соосности, равный 2,4. Большая часть звеньев в виде отклонений от соосности практически не изнашиваются в процессе эксплуатации, но радиальный зазор в подшипнике по мере работы КПП будет увеличиваться из-за износа шариков и колец, вследствие чего достигнет предельно допустимой величины 0,15 мм и начнутся утечки. А в результате действия радиального биения в виде 0,055 мм, утечки начнутся раньше. Исходя из полученных данных, можно предположить, что при таком радиальном биении и износе подшипника качения, незначительные утечки начнутся при достижении отклонения от соосности $\Delta = 0,15 - 0,055 = 0,095$ мм и будут увеличиваться.

Таким образом, апробирована методика составления размерной цепи для соединения «вал-уплотнение» (п.2.3), где в качестве замыкающего звена выступают такие параметры, как отклонение от соосности и радиальное вращающегося биение вала относительно манжеты. В методике показано, что необходимо подразделять звенья размерной цепи на две категории – статические отклонение от соосности и динамическое – в виде радиального биения. Проведенный расчет на примере выходного вала КПП ЯМЗ-239 показал, что размерная цепь образуется из девяти звеньев, пять из которых являются отклонениями от соосности, а четыре – радиальным биением. В первоначальном новом состоянии формируется запас точности, как по параметру суммарной соосности, так и по параметру суммарного радиального биения. В процессе эксплуатации будет наблюдаться детерминирующее изнашивание радиального подшипника качения в виде увеличения рабочего радиального зазора, и при неизменном радиальном биении в 0,055 мм, начнутся утечки смазки при достижении отклонения от соосности 0,095 мм.

4.3 Исследование параметров размерной цепи выходного конца вала КПП ЯМЗ-239 относительно манжеты при использовании размеров, допустимых без ремонта

В технических условиях на ремонт КПП ЯМЗ-239 указаны не только номинальные размеры и отклонения деталей, входящих в исследуемую размерную цепь, но и допустимые без ремонта. Так для посадки наружного кольца подшипника в корпус $\varnothing 150H6/l5$ предусмотрено, что возможно увеличение размера отверстия в корпусе до 150,05 мм. Для посадки внутреннего кольца на вал $\varnothing 85L5/k5$ допускается уменьшение размера вала до 84,95 мм.

Используя методику, представленную в п.2.2, рассчитаем параметры точности составляющих звеньев размерной цепи для случая использования допустимых без ремонта размеров в посадках, таблицы 4.9-4.11.

Таблица 4.9 – Расчет смещения осей деталей в посадках из-за наличия зазора в звеньях, входящих в размерную цепь выходного конца вала КПП ЯМЗ 239 при использовании размеров, допустимых без ремонта

Обозначение	Посадка	Допуски		Средние значения		Коэффициенты		Допуск T_{cs} , мкм
		Обозначение	Значение, мкм	Обозначение	Значение, мкм	λ	α	
T_2	$\varnothing 150^{+0,05}/_{-0,015}$	T_D	50	EC	+25	1,2	0	96,9
		T_d	15	ec	-7,5	1,2	+0,1	
		T_s	31,3	S	32,8	1,0	-0,05	
T_6	$\varnothing 85^{-0,015}/_{-0,05}$	T_D	15	EC	-7,5	1,2	-0,1	59,6
		T_d	50	ec	-25	1,2	0	
		T_s	31,3	S	14,1	1,0	-0,05	
T_8	$\varnothing 80H7/g6$	T_D	30	EC	+15	1,2	0,1	50,1
		T_d	19	ec	-14,5	1,2	+0,1	
		T_s	21,3	S	14,4	1,0	-0,1	

Таблица 4.10 – Характеристики звеньев размерной цепи выходного конца вала КПП ЯМЗ-239 относительно манжеты при использовании размеров, допустимых без ремонта

Обозначение	Тип звена	Допуск, мм	Коэффициенты		
			k	α	λ
T_1	cv	0,020	1,0	0	0,75
T_2	cs	0,0969	1,0	0	1,00
T_3	cv	0,011	1,0	0	0,75
T_4	cv	0,036 / 0,15*	1,0	0	0,75
T_5	rv	0,006	1,0	0	0,75
T_6	cs	0,0596	1,0	0	1,00
T_7	rv	0,020	1,0	0	0,75
T_8	rv	0,0501	1,0	0	1,00
T_9	rv	0,020	1,0	0	0,75

Условные обозначения: cs – звено в виде зазора; cv – векторное статическое звено; rv – векторное динамическое звено. * – предельно допустимый радиальный зазор.

Таблица 4.11 – Результаты расчета параметров размерной цепи выходного конца вала КПП ЯМЗ-239 относительно манжеты при использовании размеров, допустимых без ремонта

Наименование параметра	Обозначение	Значение
Расчет по предлагаемой методике		
Суммарный допуск звеньев в виде зазора	$T_{\Sigma cs}$	0,1135 мм
Суммарный допуск векторных статических звеньев	$T_{\Sigma cv}$	0,0496 мм
Суммарный допуск векторных динамических звеньев	$\Delta_r = T_{\Sigma rv}$	0,0546 мм
Суммарное отклонение от соосности	Δ_c	0,1243 мм
Расчет по классической методике		
Суммарный допуск звеньев в виде зазора	$T_{\Sigma cs}$	0,1241 мм
Суммарный допуск векторных звеньев	$T_{\Sigma cv}$	0,0276 мм
Суммарное отклонение от соосности	Δ_c	0,1272 мм

Из данных таблицы 4.11 видно, что суммарное отклонение от соосности составляет 0,124 мм, что не превышает предельной величины 0,15 мм, но приближается к ней. Это свидетельствует о том, что сформирован малый, по сравнению с размерами новых деталей, запас точности по отклонению от

соосности, равный 1,2. И при увеличении радиального зазора в подшипнике качения до 0,07 мм начнутся утечки.

Таким образом, использование допустимых без ремонта размеров изнашиваемых поверхностей ответственных деталей – диаметра отверстия под наружное кольцо подшипника качения и шейки вала под внутреннее кольцо подшипника, приведут к более раннему отказу отремонтированной КПП по параметру начала утечек из уплотнения выходного вала.

4.4 Обеспечение точности расположения осей валов редукторов методом компенсации

Долговечность работы современных агрегатов и узлов различных машин обеспечивается не только параметрами прочности и износостойкости, но и параметрами точности ответственных соединений [27, 25, 83]. Причем при ремонте машин определяют допустимые размеры изношенных деталей, которые можно использовать без замены [106]. Точность изготовления деталей характеризует соответствие геометрических параметров реально изготовленной детали, параметрам, которые заданы для этой детали нормативной документацией. По мере развития технического прогресса, точность машин должна постоянно расти, обеспечивая постоянное улучшение их качества. Однако высокая точность требует высоких затрат на производство, поэтому установление оптимального уровня точности является наиболее рациональным методом решения задачи параметрической надежности.

В тех случаях, когда заданная точность не может быть обеспечена, применяются методы неполной взаимозаменяемости: селективная сборка, методы компенсации и методы подбора.

С позиции трудоемкости работ наиболее рационально применять селективную сборку, сущность которой заключается в разбиении допусков сопрягаемых деталей на группы [163, 156, 155, 154]. Методы подбора, наоборот,

наиболее трудоемки, но могут широко использоваться в условиях единичного и мелкосерийного производства [102].

При расчете сборочных размерных цепей с целью достижения заданной точности замыкающего звена также используются вышеперечисленные методы, но уже со своими особенностями реализации [65,151].

Одним из методов достижения заданного уровня точности является метод компенсации. Данный метод используется, когда присутствует значительное различие между требуемым и рассчитанным допуском. Для компенсации могут использоваться прокладки, втулки, кольца, винтовые устройства, припуски на пригонку, набор деталей разной толщины, эксцентрики, зазоры, деформирование деталей, в таком случае размер компенсатора должен включаться в расчетную схему. Применение различных компенсаторов позволяет, значительно уменьшить суммарную погрешность влияющих размеров, тем самым обеспечивая заданную точность [123].

Рассмотрим апробацию методики расчета и выбора размеров компенсаторов с помощью размерного анализа (п.2.4) на примере соединения вала редуктора Н.094.44.000-323 с валом редуктора и Н.090.20.000-121 в картофелеуборочном комбайне КПК-2-01.

При проведении размерного анализа в качестве замыкающего звена выбрано отклонение от соосности валов соединяемых редукторов $A_{\Sigma} = 0 \pm 0,25$ мм. Данная величина обусловлена техническими характеристиками цепной муфты ККУ.01.44.601, так как дальнейшее увеличение отклонения от соосности приведет к повышению интенсивности изнашивания цепи и зубьев полумуфт и срыву цепи, а это отказ работы муфты. В качестве увеличивающего звена выбрано расстояние от оси вала редуктора Н.094.44.000-323 до опорной поверхности, в качестве уменьшающих звеньев расстояние от оси вала редуктора Н.090.20.000-121 до опорной поверхности, высота подставки и толщина компенсатора. Размерная цепь, построенная в результате выявления влияющих звеньев на замыкающее звено $A_{\Sigma} = 0 \pm 0,25$ мм, представлена на рисунок 4.5.

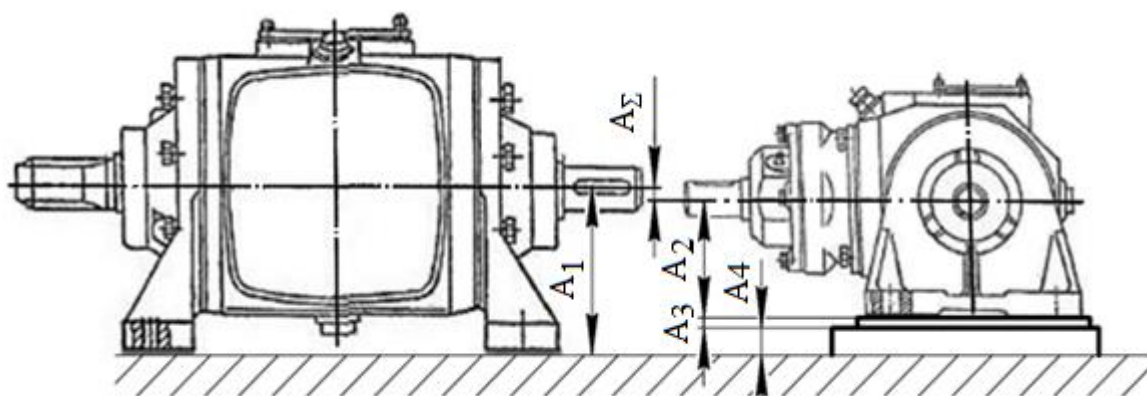


Рисунок 4.5 – Размерная цепь:

A_1 – расстояние от оси вала редуктора Н.094.44.000-323 до опорной поверхности, A_2 – расстояние от оси вала редуктора Н.090.20.000-121 до опорной поверхности; A_3 – толщина компенсатора; A_4 – высота подставки, A_Σ – расстояние между валами

Допустимые отклонения рассеяний от оси вращения вала до опорной поверхности редукторов $A_1 = 150_{-0,5}$ мм и $A_2 = 100_{-0,5}$ мм взяты из их технических характеристик, откуда видно, что значения допусков этих размеров значительно превосходят допуск замыкающего звена $A_\Sigma = 0 \pm 0,25$ мм, что обуславливает необходимость применения метода компенсации.

Теоретически в данном случае, в качестве компенсатора A_3 обычно используют набор прокладок одинаковой толщины (вариант 1) или набор прокладок разной толщины (вариант 2), устанавливаемые под опорную поверхность меньшего по высоте редуктора, который, в свою очередь, стоит на подставке высотой A_4 . Предельные отклонения высоты подставки A_4 и толщины подкладки A_3 рекомендуется выбрать по 11 качеству [87], как возможной достижимой точности использования материалов без дополнительной механической обработки. Таким образом, сформированы исходные данные для расчетов в таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Исходные данные для расчетов

	Наименование размера				
	A_{Σ}	A_1	A_2	A_3	A_4
Размер с отклонением Y_i , мм	$0^{+0,25}_{-0,25}$	$150_{-0,5}$	$100_{-0,5}$	$3_{-0,06}$	$47^{+0,08}_{-0,08}$
Середина поля допуска em_i , мм	0	0,25	0,25	0,03	0
Допуск влияющего размера t_i , мм	0,5	-0,5	-0,5	-0,06	0,16
Коэффициент относительной симметрии α_i	0	0	0	0	0
Коэффициент относительного рассеяния размера K_i	–	1,2	1,2	1,2	1,2

Результаты расчётов по формулам (2.20) ... (2.24) представлены в таблице 4.13. Определён наибольший размер компенсатора $Y_{Kmax} = 3,05$ мм и расчетный допуск на исходный размер $t_{\Sigma} = 0,805$ мм.

Прокладки-компенсаторы должны обеспечивать попадание отклонения от сносности валов в заданные пределы $A_{\Sigma} = 0 \pm 0,25$ мм, поэтому величину необходимой компенсации замыкающего звена принимают равной расчетному допуску t_{Σ} этого размера.

Таблица 4.13 – Результаты расчетов

Параметр	Значение
Коэффициент относительного рассеяния K_{Σ} , мм	1,08
Среднее отклонение исходного размера em_{Σ} , мм	0,03
Расчётный допуск на исходный размер t_{Σ} , мм	0,805
Среднее отклонение для компенсатора em_K , мм	0,03
Наибольший расчетный размер компенсатора Y_{Kmax} , мм	3,05
Толщина одной прокладки из набора прокладок одинаковой толщины h , мм	$0,8h11_{(-0,06)}$
Количество одинаковы прокладок m , штук	4
Толщина прокладок из набора прокладок разной величины: первой h_1 , мм второй h_2 , мм третьей h_3 , мм	$0,45h11_{(-0,06)}$ $0,91h11_{(-0,06)}$ $1,82h11_{(-0,06)}$
Размер компенсатора, при максимальных значениях увеличивающих звеньев и минимальных уменьшающих A_3^{max}	$3,58_{-0,5}$
Размер компенсатора, при минимальных значениях увеличивающих звеньев и максимальных уменьшающих A_3^{min}	$2,42^{+0,5}$

В результате расчетов по формулам (2.25) ... (2.28) получено, что при реализации варианта 1 – набора одинаковых прокладок необходимо использовать четыре прокладки толщиной 0,8 мм. Если используется вариант 2 – набор разных прокладок, то этот набор должен состоять из трёх прокладок толщиной: 0,45 мм, 0,91 мм, 1,82 мм.

С целью определения наиболее рационального варианта использования прокладок – компенсаторов, был проведен проверочный расчет для двух критических случаев формирования размеров влияющих звеньев при сборке. Необходимо определить, подходят ли размеры компенсаторов для случаев, когда увеличивающие и уменьшающие звенья имеют противоположные предельные отклонения.

В первом случае отклонения увеличивающих звеньев соответствуют верхним пределам, а отклонения уменьшающих – нижним пределам, с учетом допусков размеров прокладок, тогда размеры компенсатора должны находиться в пределах от 3,08 до 3,58 мм. Данные пределы достигаются при использовании и первого и второго вариантов использования компенсаторов.

Во втором случае отклонения увеличивающих звеньев соответствуют нижним пределам, а отклонения уменьшающих – верхним, с учетом допусков размеров прокладок, тогда размеры компенсатора должны находиться в пределах от 2,42 до 2,92 мм. Данные пределы достигаются только при использовании варианта 2 – набором прокладок разной толщины, с помощью второй и третьей прокладок.

Поскольку условиям проверочного расчета соответствует только набор прокладок разной толщины, данный вариант применения компенсаторов будет являться оптимальным для достижения необходимой точности в рассматриваемой размерной цепи.

Таким образом, с целью достижения заданной точности отклонения от соосности $A_{\Sigma} = 0 \pm 0,25$ мм соединяемых с помощью цепной муфты валов редукторов Н.094.44.000-323 и Н.090.20.000-121 картофелеуборочного комбайна КПК-2-01 решена задача размерного анализа. Построена размерная цепь из

четырех влияющих звеньев и выявлено, что вероятностная сумма допусков размеров больше допуска замыкающего звена, поэтому для обеспечения точности сборки следует использовать метод компенсации. Исходя из теории расчетов допусков и отклонений размерных цепей, определены параметры компенсаторов и установлено, что можно использовать набор из четырех одинаковых прокладок толщиной 0,8 мм или набор из трех разных прокладок толщиной 0,45 мм, 0,91 мм и 1,82 мм. В результате проверочного расчета выявлено, что наиболее рационально использовать набор прокладок разной толщины.

4.5 Нормирование шероховатости поверхностей валов в соединениях с резиновыми армированными манжетами

Как было показано в п.1.1 шероховатость поверхности оказывает существенное влияние на долговечность соединений, узлов, сборочных единиц и агрегатов современной техники.

При формировании посадок с натягом, чем больше вертикальные параметры шероховатости (Ra и Rz), тем менее качественным оказывается соединение, поскольку уменьшается фактическая площадь контакта, даже при идеальной геометрической форме элементов деталей [8]. На качество оказывают влияние и отклонения формы соединяемых отверстий и валов [68]. Также шероховатость поверхности сминается, что приводит к уменьшению натяга [26].

При эксплуатации посадок с зазором большие поверхностные неровности быстро истираются, что приводит к быстрому увеличению начального конструктивного зазора [24]. При истирании частицы материала не полностью удаляются из зоны контакта деталей и способствуют еще большему износу поверхностей. Поэтому для многих агрегатов, и в частности, для двигателей и коробок передач, устанавливают ограничения по нагрузке в начальный период эксплуатации, который называют обкаткой, и требуют регулярной смены масла для того, чтобы удалить продукты износа из агрегата.

Поверхностные неровности влияют на антикоррозийные свойства поверхности. Чем больше поверхностные неровности, тем больше идет накопление во впадинах влаги и кислот, что способствует распространению коррозии.

Поверхностные неровности влияют также на качество электрических и тепловых контактов, герметичность соединений, отражение лучей, точности измерений, макрогеометрия поверхностей и т.д. [28].

Большинство случаев отказа опор с подшипниками качения связано с утечками смазки из редукторов и коробок передач, а в послеремонтный период эксплуатации эти отказы чаще [27].

В качестве достоинств резиновых армированных манжет можно назвать малую стоимость, простоту конструкции и монтажа, а также реализацию самоподжимного уплотняющего эффекта, который реализуется с помощью пружины. Недостатками манжет являются потери энергии на трение в зоне контакта, ускоренное старение уплотняемой среды и самой манжеты вследствие взаимоокисления их поверхностей, износ вала в зоне контакта. В современных исследованиях можно выделить три основных направления решения задачи повышения надежности и долговечности уплотнительных узлов: улучшение физико-химических свойств материала армированной манжеты [6, 150, 31, 36, 42, 140]; совершенствование конструкции манжет [38, 14, 29, 101]; повышение качества и износостойкости поверхностей валов под манжету [59, 82, 49, 35, 1, 13].

Для удобства описания конструктивных, технологических и точностных параметров соединения «вал-уплотнение» основные данные, полученные при анализе работ [68, 67, 112] сведены в действующий стандарт [74] (таблица 4.14).

Таблица 4.14 – Нормированные и действительные параметры сопряженных с манжетами валов и отверстий корпусов [74]

Наименование параметра	Нормированное значение		Действительное значение	
	Вал	Отверстие	Вал	Отверстие
1. Шероховатость поверхности R_a мкм, при скорости скольжения: до 4 м/с св. 5 м/с	0,32-0,63 0,16-0,32	1,25-2,5 1,25-2,5	0,63-1,25 0,63-1,25	0,63-3,2 0,63-3,2
2. Твердость поверхности вала при скорости скольжения: до 4 м/с св. 5 м/с	HRC 30 HRC 50	-	HB 200-600	-
3. Материал вала	нержавеющая сталь	-	Сталь 45 (45-60%)	-

Из таблицы 4.14 видно, что требования, предъявляемые к соединению и деталям, достаточно высоки и не все параметры соблюдаются в нормируемых пределах. Особенно это касается геометрических параметров: шероховатости поверхности, отклонения от соосности, радиального биения, допуска и отклонений вала.

При анализе технических требований на капитальный ремонт различных машин, разработанных в ГОСНИТИ, таблица 4.15, нами выявлено, что допуски вала под манжету отличаются более чем в 30 раз, основное отклонение вала колеблется в пределах $-0,032 \dots +0,150$ мм, шероховатость поверхности вала чаще всего ниже нормированного диапазона значений. Это означает, что все вышеназванные параметры не рассчитываются, а назначаются по методу прецедентов, либо, если на той же поверхности вала находится другая деталь, то отклонения нормируются именно для этой детали [96].

Таким образом, необходимо исследовать геометрические параметры вала и соединения, т.к. их различные значения влияют как на стоимость обработки, так и на ресурс соединения.

Таблица 4.15 – Анализ допусков и отклонений вала в соединении «вал-уплотнение» сельскохозяйственной техники

Наименование и марка машины	Место установки соединения	Размер вала по чертежу, мм	R_a , мкм
Картофеле-уборочный комбайн ККУ-2А	Эксцентриковый вал	$\varnothing 85_{-0,23}$	1,6
	Вал основного элеватора	$\varnothing 35_{-0,17}$	1,6
	Вал цепного редуктора	$\varnothing 30_{-0,01}$	0,63
	Вал коробки передач	$\varnothing 30_{-0,14}$	1,0
Сеноуборочная машина КИК-1,4	Вал главной коробки	$\varnothing 45_{-0,62}$	2,0
	Вал червячного редуктора	$\varnothing 25_{-0,01}$	0,63
	Вал основного редуктора	$\varnothing 25_{-0,045}$	1,6
Трактор МТЗ-50 (52), МТЗ-80(82)	Вал трансмиссии	$\varnothing 30_{-0,14}$	1,6
	Шестерня трансмиссии	$\varnothing 50_{-0,05}$	0,63
Трактор Т-25	Вал трансмиссии	$\varnothing 25_{-0,045}$	0,63
	Шестерня трансмиссии	$\varnothing 45_{-0,100}$	0,8
Трактор Т-40	Вал главного сцепления	$\varnothing 50_{-0,040}$	0,63
	Вал сцепления ВОМ	$\varnothing 60_{+0,15}$	1,6
	Вилка ведущей шестерни	$\varnothing 45_{-0,1}$	1,6
	Цапфа осевая	$\varnothing 50_{+0,125}$	1,6
Трактор ДТ-75В	Вилка кардана	$\varnothing 70_{-0,2}$	0,63

Исходя из анализа литературных источников (п. 1.1) установлены следующие заключения:

1. уменьшение шероховатости поверхности вала – $R_a < 0,1$ мкм, приведет к образованию гидродинамического масляного клина, что вызовет повышенные утечки, а из-за увеличения шероховатости вала $R_a > 1,25$ мкм резко возрастает износ манжеты;

2. наилучшим считается такой режим, при котором после приработки и при определенных пределах значений шероховатости поверхности вала формируется слой микро-гидродинамической масляной пленки, что значительно повышает долговечность соединения;

3. при финишной обработке ППД шариком и роликом уменьшается количество вершин и впадин, увеличиваются шаг поверхности, поверхностная твердость, повышается износостойкость и образуется требуемая толщина масляной пленки.

Существует такой параметр шероховатости поверхности, как относительная опорная длина профиля t_p , которая характеризует фактическую опорную площадь, и именно от нее в большой степени зависят износостойкость подвижных соединений, прочность прессовых посадок и размер пластической деформации поверхностей при их контактировании, рисунок 4.6.

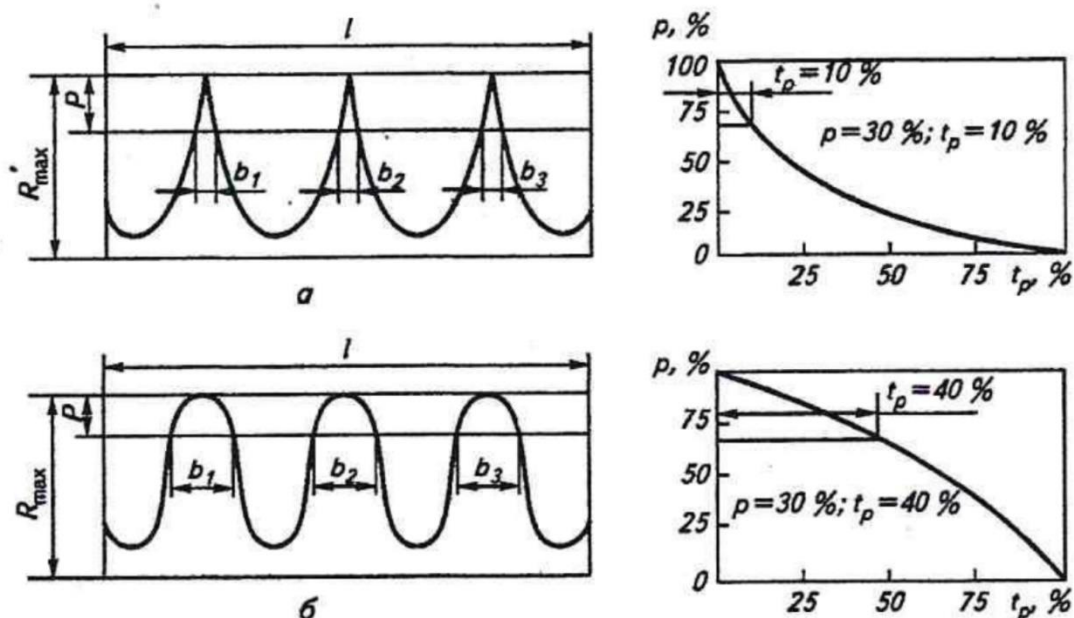


Рисунок 4.6 – Формирование относительной опорной длины профиля:
а – при точении; б – при полировании

Из рисунка 4.6 ясно, что если финишной обработкой будет ППД, то неровности профиля будут иметь сглаженный вид, что приведет к повышению износостойкости соединения за счет меньшего износа кромки манжеты. Таким образом, для поверхности вала под манжету необходимо нормировать и $t_p > t_{50}60$, то есть на уровне средней линии профиля (50 %) в процессе обработки должно быть сформировано не менее 60 % опорной площади.

Стандартом на шероховатость поверхности установлены еще два качественных параметра [70], которые необходимо использовать в требованиях к профилю шероховатости поверхности вала под манжету:

- вид обработки;
- тип направления неровностей.

Вид обработки указывается в том случае, когда шероховатость поверхности следует получить только определенным способом. Для поверхности вала под манжету следует указывать такой способ, в частном случае – поверхностно – пластическое деформирование шариками или роликами. Но есть еще и другие способы обработки, с помощью которых можно достичь туповершинного профиля с $t_p > t_{5060}$.

Тип направления неровностей указывается в ответственных случаях, когда это необходимо по условиям работы детали или сопряжения. В зависимости от направления движения часто бывает целесообразным, чтобы неровности имели направление, совпадающее с направлением движения. Для поверхности вала под манжету необходимо обеспечивать перпендикулярное направление, но при этом еще иметь ввиду, что винтовала линия, которая образуется в процессе обработки, при вращении вала имела выход в сторону конца вала, а не во внутрь герметизируемого узла. Именно этим требованием решается проблема лучшей смазки кромки манжеты, так как тончайшие слои уплотняемой жидкости будут по винтовой линии поступать к кромке, а вся пыль и грязь будет медленно вымываться из соединения кромки с валом. Если сделать обратное вращение – такого эффекта не будет, а в поры рабочей кромки резиновой манжеты будет попадать больше пыли.

Обобщая вышеприведенные данные, а также используя требования действующего стандарта [70], можно сформировать следующие обозначения шероховатости поверхности, применительно к валу, рисунок 4.7. На рисунок 4.7а представлены требования для скорости скольжения до 4 м/с, а на рисунок 2б – св. 5 м/с.

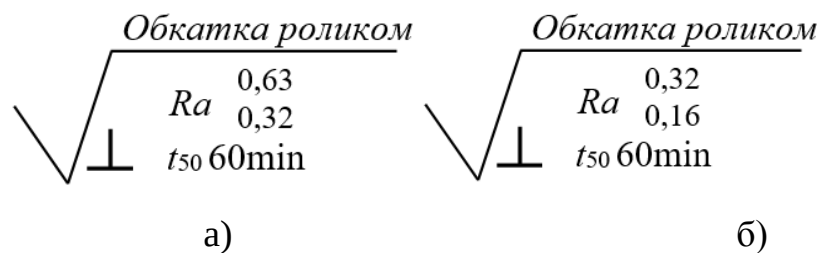


Рисунок 4.7 – Предлагаемые условные обозначения шероховатости поверхности вала под резиновую армированную манжету:

- а) для скорости скольжения до 4 м/с;
- б) для скорости скольжения свыше 5 м/с.

Стандарт по шероховатости поверхности не предусматривает требований по направлению винтовой линии, поэтому ее формирование – дело грамотного технолога, который знает конструкцию сборочной единицы, знает в какую сторону вращается вал (по часовой стрелке или против) и может организовать технологический процесс обработки с требуемыми характеристиками поверхности.

Таким образом, на основе анализа научных литературных источников в области исследования влияния шероховатости поверхности вала на долговечность работы соединения с резиновой армированной манжетой, предложено усовершенствованное условное обозначение требований к шероховатости поверхности вала, включающее в себя не только диапазон значений среднего арифметического отклонения профиля в зависимости от скорости скольжения рабочей кромки манжеты относительно вала, но и требования к перпендикулярному расположению неровностей, требования к относительной опорной длине профиля, которая должна составлять не менее 60% на 50% - ном уровне, а также требования к виду обработки, формирующего такой профиль.

4.6 Использование метода групповой взаимозаменяемости для повышения качества сборки валов с манжетами в ремонтном производстве

Эффективным инструментом повышения качества сборки является применение селекции. В нашем случае, с целью увеличения среднего натяга в соединении вала с манжетой предложено использовать метод селективной сборки по двум группам. В таблице 4.16. представлены параметры точности фланцев и манжет 1.2–100×125–12 выходного вала коробки передач ЯМЗ-239, на котором был апробирован предложенный метод.

Таблица 4.16 – Параметры точности фланцев и манжет 1.2–100×125–12 выходного вала коробки передач ЯМЗ-239

Наименование измеряемой детали	Номинальный размер с отклонениями, мм	Допуск, мм	Размер предельно допустимый без ремонта, мм
Фланец	$100h10_{(-0,14)}$	0,14	99,7
Отверстие манжеты	$100_{-3,0}^{-2,0}$	1,0	*

* при ремонте все манжеты заменяются на новые

Применим разбиение диаметров манжет на две группы. Для этого определим границу разбиения манжет, которая соответствует середине поля допуска и определяется через среднее отклонение EC (2.7). В результате расчета по формуле (2.7) получим $EC = -2,5$ мм.

Валы, необходимо разбить на два вида размеров:

- первый будет соответствовать номинальному размеру нового вала $\varnothing 100h10_{(-0,14)}$ и соединятся с манжетами второй группы, имеющими меньший диаметр для образования соединения с большими натягами;
- второй будет соответствовать ремонтному размеру вала $\varnothing 100,5h10_{(-0,14)}$ и соединятся с манжетами первой группы, что также позволит комплектовать соединения с большими натягами.

На основании полученных данных составим комплектовочную таблицу для соединения валов с манжетами (таблица 4.17).

Таблица 4.17 – Комплектовочная таблица для соединения валов с манжетами

Параметры	Номер группы комплектования	
	1	2
	Значение, мм	
Отверстие манжеты	$\varnothing 100_{-2,5}^{-2,0}$	$\varnothing 100_{-3,0}^{-2,5}$
Диаметр вала	$\varnothing 100,5h10_{(-0,14)}$	$\varnothing 100h10_{(-0,14)}$
Диапазон натягов в группе	2,36 ... 3,0	2,36 ... 3,0
Средний натяг в группе	2,68	2,68

Как видно из таблицы 4.17 диапазон натягов будет составлять от (2,36 ... 3,0) мм в обоих случаях, что позволит повысить ресурс соединения на 2400 мото-часов, т.е. на 20 %.

4.7 Выводы

1. Проведенный анализ рассеяния натягов позволил установить, что качество изготовления манжет и фланцев находится на высоком уровне, качество обработки поверхности фланца под манжету обеспечивает запас по требуемой точности, а рассеяния размеров отверстий манжет показывает практически полное совпадение с требуемыми характеристиками. Следовательно, причины проблем, возникающих с утечками смазочного материала из уплотнений, следует искать исходя из параметров износостойкости указанных деталей, а также исходя из анализа износа влияющих размеров, образующих размерную цепь, где в качестве исходного замыкающего звена будет выступать отклонение от соосности и радиальное биение вала по отношению к диаметру манжеты.

2. Апробирована методика составления размерной цепи для соединения «вал-уплотнение» (п.2.3) на примере выходного вала КПП ЯМЗ-239. Установлено, что размерная цепь образуется из девяти звеньев, пять из которых являются отклонениями от соосности, а четыре – радиальным биением. В

первоначальном новом состоянии формируется запас точности, как по параметру суммарной соосности, так и по параметру суммарного радиального биения. В процессе эксплуатации будет наблюдаться детерминирующее изнашивание радиального подшипника качения в виде увеличения рабочего радиального зазора, и при неизменном радиальном биении в 0,055 мм, начнутся утечки смазки при достижении отклонения от соосности 0,095 мм. Также доказано, что при использовании допустимых без ремонта размеров изнашиваемых поверхностей ответственных деталей – диаметра отверстия под наружное кольцо подшипника качения и шейки вала под внутреннее кольцо подшипника, приведут к более раннему отказу отремонтированной КПП по параметру начала утечек из уплотнения выходного вала.

3. В результате апробации методики расчета и выбора размеров компенсаторов с помощью размерного анализа (п. 2.4) на примере соединения вала редуктора Н.094.44.000-323 с валом редуктора и Н.090.20.000-121 в картофелеуборочном комбайне КПК-2-01, установлено, что можно использовать набор из четырех одинаковых прокладок толщиной 0,8 мм или набор из трех разных прокладок толщиной 0,45 мм, 0,91 мм и 1,82 мм. В результате проверочного расчета выявлено, что наиболее рационально использовать набор прокладок разной толщины.

4. Предложено усовершенствованное условное обозначение требований к шероховатости поверхности вала, включающее в себя не только диапазон значений среднего арифметического отклонения профиля в зависимости от скорости скольжения рабочей кромки манжеты относительно вала, но и требования к перпендикулярному расположению неровностей, требования к относительной опорной длине профиля, которая должна составлять не менее 60% на 50% - ном уровне, а также требования к виду обработки, формирующего такой профиль.

5. С целью увеличения натяга и повышения ресурса соединения предложено разбиение диаметров манжет на две группы. Фланцы КПП необходимо также разбить на два вида размеров. Для соединения манжет первой группы, с

большими диаметрами, предложено обрабатывать вал на $-0,5\text{мм}$ с целью выведения следов износа и установкой тонкостенной ремонтной втулки для формирования размера $\varnothing 100,5h10_{(-0,14)}$. Для соединения манжет второй группы, с меньшими диаметрами будут использованы новые фланцы с номинальным размером $\varnothing 100h10_{(-0,14)}$. Диапазон натягов будет составлять от $(2,36 \dots 3,0)$ мм в обоих случаях, что позволит повысить ресурс соединения на 2400 мото-часов, т.е. на 20 %.

5 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

5.1 Расчёт экономического эффекта от применения цифровых средств измерений при контроле фланца КПП

Важным аспектам цифровизации ремонтного предприятия, наряду с созданием и внедрением цифровых моделей процессов, является переход измерительных процессов на цифровые средства измерений. Преимуществами применения цифровых средств измерений являются (при прочих равных условиях в сравнении с аналоговыми приборами):

- высокая точность;
- производительность (измерительных процесс занимает меньше времени);
- возможность передавать измерительную информацию для хранения и обработки в память ПК.

Порядок выбора и оценки экономической эффективности применения цифровых средств измерений не отличается от аналоговых приборов, и включает в себя следующие этапы:

1. выбор номенклатуры подходящих цифровых средств измерений по метрологическим характеристикам (диапазон измерений должен превышать значение измеряемой величины, погрешность средства измерений должна отвечать требованиям по условию (3.1));
2. оценка вероятностных характеристик результатов измерений (вероятности ошибок 1-го и 2-го рода);
3. оценка экономических потерь от ошибок 1-го и 2-го рода;
4. оценка экономических затрат на измерения (затраты на поверку, заработную плату контролера);

5. оценка экономического эффекта от применения более точного цифрового средства измерений.

В нашем случае, при выборе средств измерений для контроля размеров фланца КПП после восстановления недостаточно выполнения условия (3.1), т.к. необходимо контролировать не только диаметр фланца, а еще отклонение формы, в виде отклонения от цилиндричности, в частном случае, проявляемая как овальность или огранка. Поэтому при выборе цифрового прибора, в данном случае, необходимо выполнение условия (3.1), пункт 3.2.

Допускаемая погрешность средства измерений для контроля отклонения формы определяется по формуле:

$$\pm \Delta_{\text{lim}} \leq \frac{2\varepsilon}{k\sqrt{2}}. \quad (5.1)$$

Используя формулу (3.1) и (6) проведем расчет допускаемой погрешности измерений цифрового прибора, для контроля размеров фланца Ø100,5h10 (таблица 5.1).

Таблица 5.1 – Исходные данные для выбора цифрового средства измерений для контроля размеров фланца Ø100,5h10

Параметр	Значение, мм
Допуск на диаметр фланца, мм	0,140
Допуск на отклонение формы, мм	0,03
Допускаемая погрешность измерений по допуску на диаметр фланца, мм	±0,046
Допускаемая погрешность измерений по допуску на отклонение формы, мм	±0,012

Исходя из условия (5.1), с учётом номинального размера, для измерений параметров восстановленного фланца подходят следующие цифровые средства измерений:

- по условию (3.1) – скоба рычажная цифровая;
- по условию (3.2) – штангенциркуль цифровой.

Метрологические характеристики выбранных средств измерений представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Метрологические характеристики средств измерений для контроля размеров фланца Ø100,5h10

Наименование средства измерений	Условное обозначение	Метрологические характеристики		
		Диапазон измерений, мм	Дискретность отсчетного устройства, мм	Предел допускаемой погрешности, мкм
Скоба рычажная цифровая	СРЦ-125-0,001	100-125	0,001	±4
Штангенциркуль цифровой	ШЦЦ-125-0,01	0-125	0,01	±30

Проведем сравнительный анализ экономического эффекта от применения цифровых средств измерений, выбранных по условию (3.1) и по условию (3.5).

Годовой экономический эффект от использования более точного средства измерений рассчитывают по формуле [167, 166]:

$$\mathcal{E}^{\Gamma} = 3_{\Sigma 1}^{\Gamma} - 3_{\Sigma 2}^{\Gamma}, \quad (5.2)$$

где $3_{\Sigma 1}^{\Gamma}, 3_{\Sigma 2}^{\Gamma}$ – суммарные годовые затраты на измерения первым и вторым средством измерений, р./год.

Суммарные годовые затраты на измерения включают в себя затраты на эксплуатацию ($3_{\text{ИП}}^{\Gamma}$) и потери от погрешности измерений ($\Pi_{\text{И}}^{\Gamma}$) [167, 166]:

$$3_{\Sigma}^{\Gamma} = 3_{\text{ИП}}^{\Gamma} + \Pi_{\text{И}}^{\Gamma} \quad (5.3)$$

Определение годовых затрат на проведение измерений для каждого из выбранных средств измерений проводят по формуле:

$$3_{\text{ИП}}^{\Gamma} = 3_{\mathcal{E}} + \Pi / T, \quad (5.4)$$

где $3_{\mathcal{E}}$ – годовые затраты на эксплуатацию средств измерений, р./год; Π – цена средства измерений, р.; T – срок службы, год.

Годовые затраты на эксплуатацию выбранных средств измерений рассчитывают по формуле:

$$З_{\Sigma} = З_{\Pi} + З_{ЗП} + З_{ЭЛ}, \quad (5.5)$$

где $З_{\Pi}$ – годовые затраты на поверку (калибровку) средства измерений, р./год; $З_{ЗП}$ – годовые затраты на заработную плату контролеров (операторов), выполняющих контрольные операции р./год; $З_{ЭЛ}$ – затраты на электроэнергию (элемент питания цифрового средства измерений), р.

Рассчитаем годовую заработную плату контролера по формуле:

$$З_{ЗП} = T \cdot B \cdot C_{\text{ч}} \cdot k_{\text{д}} \cdot k_{\text{СФР}}, \quad (5.6)$$

где T – суммарная трудоемкость контрольной операции, чел·ч/дет.; $C_{\text{ч}}$ – средняя часовая тарифная ставка контролера, р./ч.; $k_{\text{д}}$ – коэффициент, учитывающий дополнительную оплату; $k_{\text{СФР}}$ – коэффициент, учитывающий страховые взносы Социальный фонд России; B – годовой объем измерений, шт.

Исходные данные и результаты расчетов годовой заработной платы контролера представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Исходные данные и результаты расчетов годовой заработной платы контролера

Параметр	Значение
Суммарная трудоемкость контрольной операции, чел·ч	0,15
Средняя часовая тарифная ставка контролера, р./ч.	500
Коэффициент, учитывающий дополнительную оплату	1,2
Коэффициент, учитывающий страховые взносы Социальный фонд России	1,3
Годовой объем измерений, шт.	1000
Годовая заработная плата контролера, р.	117000

Исходные данные и результаты расчётов годовых затрат на эксплуатацию выбранных цифровых средств измерений представлены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Исходные данные и результаты годовых затрат на эксплуатацию выбранных цифровых средств измерений

Параметр	Значение	
	СРЦ-125-0,001	ШЦЦ-125-0,01
Годовые затраты на поверку (калибровку) средства измерений*, р.	990	450
Годовые затраты на электроэнергию, р.	450	450
Годовая заработная плата контролера, р.	117000	
Годовые затрат на эксплуатацию средства измерений, р.	118440	117900

*межповерочный интервал – 1 год.

Для расчета годовых затрат на проведение измерений составим таблицу 5.5.

Таблица 5.5 – Исходные данные для расчёта суммарных годовых затрат на измерения размеров фланца Ø100,5h10

Параметр	Значение	
	СРЦ-125-0,001	ШЦЦ-125-0,01
Цена средства измерений, р.	62000	6700
Срок службы, год.	5	5
Годовые затрат на эксплуатацию средства измерений, р.	118440	117900
Суммарные годовые затраты на измерения	130840	119240

Потери от погрешности измерений определяют по формуле [167, 168]:

$$\Pi_{\text{и}}^{\Gamma} = B \cdot (n \cdot \Pi_n + m \cdot \Pi_m), \quad (5.7)$$

где n – доля ошибок 1-го рода; Π_n – потери от ошибок 1-го рода, р./ед.; m – доля ошибок 2-го рода; Π_m – потери от ошибок 2-го рода, р./ед.

Ошибки 1-го рода (бракуется годная деталь) и 2-го рода (бракованная деталь принимается как годная) зависят от рассеяния контролируемого параметра (таблица 4.1) и погрешности средства измерений (таблица 5.2). Для расчёта ошибок 1-го рода (бракуется годная деталь) и 2-го рода (бракованная деталь принимается как годная) использовалась специальная компьютерная программа [124].

Потери от ошибки 1-го рода (бракуется годная деталь) принимается равной стоимости детали (фланца) за вычетом стоимости лома. Потери от ошибок 2-го рода (бракованная деталь принимается как годная) принимаем равным затратам на рекламацию.

Исходные данные и результаты расчетов потерь от погрешности измерений при контроле размеров фланца Ø100,5h10 представлены в таблице 5.6.

Таблица 5.6 – Исходные данные и результаты расчетов потерь от погрешности измерений при контроле размеров фланца Ø100,5h10

Параметр	Значение	
	СРЦ-125-0,001	ШЦЦ-125-0,01
Доля ошибок 1-го рода	0,0005	0,007
Доля ошибок 2-го рода	0,0004	0,002
Потери от ошибок 1-го рода, р.	7600	
Потери от ошибок 2-го рода, р.	6000	
Годовой объем измерений, шт.	1000	
Потери от погрешности измерений, р.	6200	65200

Сведем полученные значения в таблице 5.7 и рассчитаем годовой экономический эффект от использования более точного цифрового средства измерений.

Таблица 5.7 – Исходные данные и результаты расчетов годовой экономический эффект от использования более точного цифрового средства измерений

Параметр	Значение	
	СРЦ-125-0,001	ШЦЦ-125-0,01
Годовые затраты на измерения, р	130840	119240
Потери от погрешности измерений, р.	6200	65200
Суммарные годовые затраты на измерения, р.	137040	184440
Годовой экономический эффект от использования более точного средства, р.	47400	

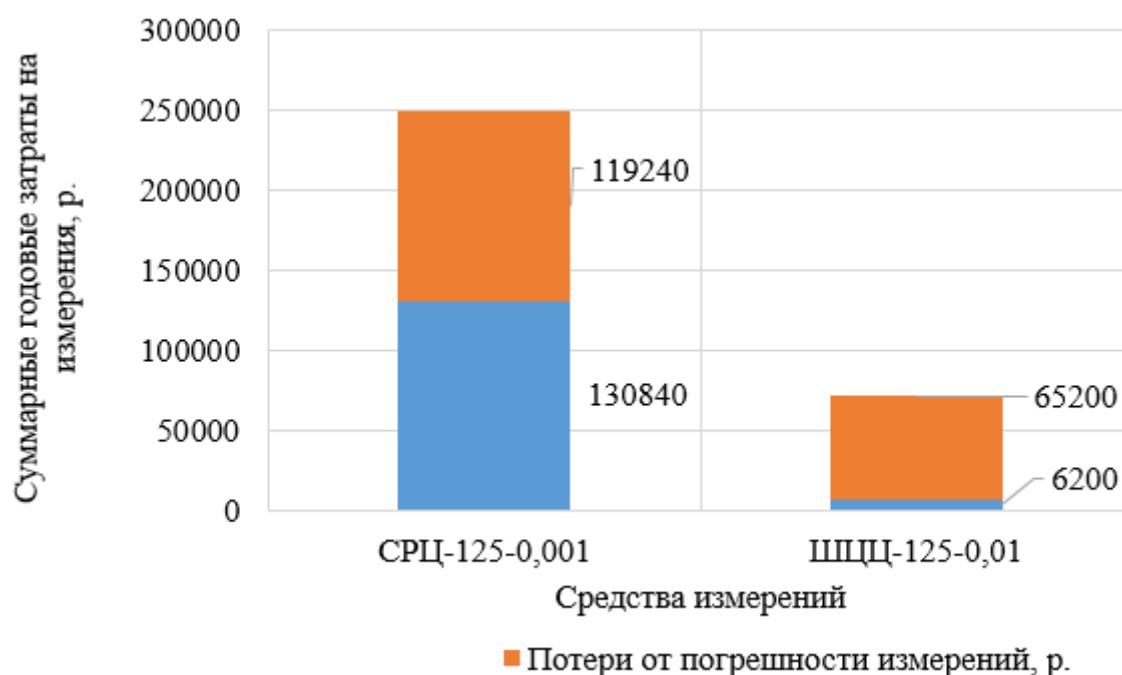


Рисунок 5.1. – Распределение суммарных годовых затрат на измерения цифровыми приборами при контроле размеров фланца Ø100,5h10

Таким образом, несмотря на то, что рычажная цифровая скоба (СРЦ-125-0,001) дороже цифрового штангенциркуля (ШЦЦ-125-0,01) более чем на 55000, ее применение будет более эффективным, т.к. позволит сократить потери от ошибок 1-го рода и 1-го рода.

5.2 Оценка экономического эффекта от внедрения технологического процесса восстановления валов установкой ремонтной втулки для коробки передач силовых агрегатов ЯМЗ

Оценим экономический эффект от внедрения технологического процесса восстановления валов установкой ремонтной втулки для коробки передач силовых агрегатов ЯМЗ.

Себестоимость восстановления поверхности вала под манжету включает в себя четыре слагаемых:

- основная и дополнительная заработная плата рабочих, участвующих в выполнении производственного процесса восстановления поверхности вала под манжету, включая страховые взносы во внебюджетные фонды (СФР);
- затраты на материалы и запасные части необходимые для процесса восстановления поверхности вала под манжету;
- затраты на приобретение ремфонда, которые определяются как сумма стоимости изношенного вала по цене металлолома и транспортных затрат на его доставку на предприятие;
- затраты на электроэнергию и воду, расходуемые для восстановления поверхности вала под манжету.

Рассчитаем заработную плату по формуле:

$$З_{ЗП} = T \cdot C_{\text{ч}} \cdot k_{\text{д}} \cdot k_{\text{СФР}}, \quad (5.11)$$

где T – суммарная трудоемкость выполнения технологического процесса восстановления вала под ремонтный размер, чел·ч/дет.; $C_{\text{ч}}$ – средняя часовая тарифная ставка производственных рабочих за выполнение i -той операции при определенном разряде работ, р./ч.; $k_{\text{д}}$ – коэффициент, учитывающий дополнительную оплату; $k_{\text{СФР}}$ – коэффициент, учитывающий страховые взносы Социальный фонд России.

Для расчета заработной платы необходимо определить трудоемкость выполнения технологического процесса восстановления валов под ремонтный размер. Для этого составим таблицу 5.8.

Исходные данные и результаты расчета заработной платы рабочих, участвующих в выполнении производственного процесса восстановления поверхности вала под манжету представлены в таблице 5.9.

Таблица 5.8 – Трудоемкость выполнения технологического процесса восстановления вала методом установки ремонтной втулки

Операция	Трудоемкость, чел·ч/дет.
Очистка	0,35
Дефектация и контроль	0,15
Шлифование (механическая обработка)	0,06
Запрессовка (нагрев) ремонтной втулки	0,18
Шлифование запрессованной втулки	0,06
Поверхностное пластическое деформирование поверхности запрессованной втулки	0,1
Контроль диаметра вала под манжету	0,15
Итого:	1,05

Таблица 5.9 – Исходные данные и результаты расчета заработной платы рабочих, участвующих в выполнении производственного процесса восстановления поверхности вала под манжету

Параметр	Значение
Суммарная трудоемкость выполнения технологического процесса восстановления вала под ремонтный размер, чел·ч/дет.	0,213
Средняя часовая тарифная ставка производственных рабочих за выполнение i -той операции при определенном разряде работ, р./ч.	500
Коэффициент, учитывающий дополнительную оплату	1,2
Коэффициент, учитывающий страховые взносы Социальный фонд России	1,3
Затраты на заработную плату на восстановление вала под ремонтный размер, р./дет.	819

Затраты на материалы, включают в себя расходы на моющее средство, расходуемого на очистку вала. Для очистки валов используется имеющаяся автоматическая промывочная установка АПУ 800У, резервуар установки 120 л. Концентрация технического моющего средства МС–37, используемого для очистки поверхностей от масложировых, смолистых загрязнений, нагаров составляет 25 г/дм³, цена 1 кг МС–37 составляет 108 р. Таким образом, затраты на моющее средство при загрузке установки составят 324 р. В одной загрузке в

машину может быть загружено до 10 валов, следовательно, затраты моющего средства на один вал составят $Z_M = 32,4$ р.

Для восстановления поверхности вала будет использована покупная втулка, обработанная по внутреннему диаметру под требуемый размер с точностью по 6 или 7 квалитету. Наружный диаметр втулки будет обработан после запрессовки на вал, путем шлифования и пластического деформирования под размер $\varnothing 100,5h10_{(-0,14)}$. Затраты на покупку ремонтной втулки из стали 40Х $Z_B = 380$ р. В дальнейшем, с целью повышения долговечности и ресурса соединения втулку можно заказывать не только из стали 40Х, но и из более износостойких сталей.

Затраты на приобретение ремфонда (изношенного вала) определяются как сумма стоимости вала по цене металлолома и транспортных затрат на его доставку на предприятие, $Z_{PФ} = 250$ р.

Затраты на электроэнергию при известной трудоемкости выполнения электрообеспечиваемых операций определяют по формуле:

$$Z_{Э} = C_{Э} \cdot \sum_{i=1}^k T_i \cdot N_{Эi}, \quad (2)$$

где $C_{Э}$ – тариф на электроэнергию, р/кВт·ч; T_i – трудоемкость выполнения i -й операции, чел·ч (таблица 4); $N_{Эi}$ – мощность оборудования, на котором выполняется i -я операция, кВт.

Исходные данные и результаты расчета затрат на электроэнергию представлены в таблице 5.10.

Таблица 5.10 – Исходные данные и результаты расчета затрат на электроэнергию

Параметр	Значение
Тариф на электроэнергию, р/кВт·ч	6,5
Мощность моечной машины, кВт	30
Мощность шлифовального станка, кВт	4,5
Мощность токарного станка, кВт	4,5
Затраты на электроэнергию, р.	74

Затраты на воду, расходуемую на автоматической промывочной установка АПУ 800У с резервуаром 120 л, при тарифе на техническую воду $C_{ВТ} = 12,3$ р./м³

составят $Z_B = 120 \cdot 0,001 \cdot 12,3 = 1,47$ р.

Используя полученные значения, рассчитаем себестоимость восстановления вала. Исходные данные и результаты расчета представлены в таблице 5.11.

Таблица 5.11 – Исходные данные и результаты расчета себестоимости процесса восстановления поверхности вала под манжету

Параметр	Значение
Затраты на заработную плату на восстановление вала под ремонтный размер, р./дет.	819
Затраты моющего средства на один вал составят, р./дет.	32,4
Затраты на покупку ремонтной втулки из стали 40Х, р.	380
Затраты на приобретение ремфонда, р./дет.	250
Затраты на электроэнергию, р./дет.	74
Затраты на воду, р./дет.	1,47
Себестоимость восстановления вала, р./дет.	1556,87

Как видно из таблицы 5.10 и рисунка 5.2 себестоимость восстановления поверхности вала под манжету по предложенной технологии составляют 1556 р., наибольший удельный вес в себестоимости имеют затраты на заработную плату (53 %).



Рисунок 5.2 – Составляющие себестоимости процесса восстановления поверхности вала под манжету

Таким образом, при цене нового фланца 7 тыс.р., и затратах на восстановление изношенного фланца 1556 р, экономический эффект внедрения технологического процесса восстановления валов установкой ремонтной втулки и покупку нового вала для коробки передач силовых агрегатов ЯМЗ составит 5444 р.

5.3 Выводы

1. Проведена оценка сравнительной экономической эффективности применения цифровых средств измерений для контроля размеров фланца КПП после восстановления. В результате расчетов установлено, что суммарные годовые затраты на измерения рычажной цифровой скобой (СРЦ-125-0,001) составляют 184 тыс.р., цифровым штангенциркулем (ШЦЦ-125-0,01) 137 тыс.р. Доказано, что применение более точного средства измерений (СРЦ-125-0,001), позволит сократить потери от ошибок 1-го рода и 2-го рода. Годовой экономический эффект от использования более точного средства измерений (СРЦ-125-0,001) составит 47 тыс.р.

2. Проведена оценка экономического эффекта от внедрения технологического процесса восстановления валов установкой ремонтной втулки коробки передач силовых агрегатов ЯМЗ. Себестоимость восстановления поверхности вала под манжету по предложенной технологии составила 1556 р., экономический эффект составил 5444 р.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Определены основные характеристики процесса комплектации и сборки при ремонте КПП (входы, выходы, механизмы и ресурсы). Разработаны цифровые модели процесса комплектации и сборки КПП в нотациях IDEF0 и BPMN. Определены основные пути применения имитационного моделирования с использованием построенных цифровых моделей.

2. Усовершенствованы методики размерного анализа для случаев составления и расчета:

- размерной цепи для соединения «вал- уплотнение», где предложено подразделять звенья на две категории – статические отклонения от соосности и динамические – в виде радиального биения;

- размеров компенсаторов для приведения отклонения от соосности соединяемых с помощью муфты валов редукторов в регламентируемые технической документацией пределы.

3. Проведенный расчет на примере выходного вала КПП ЯМЗ 239 показал, что размерная цепь образуется из девяти звеньев, пять из которых являются отклонениями от соосности, а четыре – радиальным биением. В первоначальном новом состоянии формируется запас точности, как по параметру суммарной соосности, так и по параметру суммарного радиального биения. В процессе эксплуатации будет наблюдаться детерминирующее изнашивание радиального подшипника качения в виде увеличения рабочего радиального зазора, и при неизменном радиальном биении в 0,055 мм, начнутся утечки смазки при достижении отклонения от соосности 0,095 мм.

4. Для редукторов Н.094.44.000-323 и Н.090.20.000-121 картофелеуборочного комбайна КПК-2-01 построена размерная цепь из четырех влияющих звеньев. Установлено, что вероятностная сумма допусков размеров больше допуска замыкающего звена, поэтому для обеспечения точности сборки следует использовать метод компенсации. Рассчитаны размеры для набора из

четырех одинаковых прокладок толщиной 0,8 мм или для набора из трех разных прокладок толщиной 0,45 мм, 0,91 мм и 1,82 мм. В результате проверочного расчета выявлено, что наиболее рационально использовать набор прокладок разной толщины.

5. С целью увеличения натяга и повышения ресурса соединения предложено разбиение диаметров манжет на две группы. Фланцы КПП необходимо также разбить на два вида размеров. Для соединения манжет первой группы, с большими диаметрами, предложено обрабатывать вал на $-0,5\text{мм}$ с целью выведения следов износа и установкой тонкостенной ремонтной втулки для формирования размера $\varnothing 100,5h10_{(-0,14)}$. Для соединения манжет второй группы, с меньшими диаметрами будут использованы новые фланцы с номинальным размером $\varnothing 100h10_{(-0,14)}$. Диапазон натягов будет составлять от $(2,36 \dots 3,0)$ мм в обоих случаях, что позволит повысить ресурс соединения на 2400 мото-часов, т.е. на 20 %.

6. Проведена оценка сравнительной экономической эффективности применения цифровых средств измерений для контроля размеров фланца КПП после восстановления. В результате расчетов установлено, что суммарные годовые затраты на измерения рычажной цифровой скобой (СРЦ-125-0,001) составляют 184 тыс.р., цифровым штангенциркулем (ШЦЦ-125-0,01) 137 тыс.р. Доказано, что применение более точного средства (СРЦ-125-0,001), позволит сократить потери от ошибок 1-го рода и 2-го рода. Годовой экономический эффект от использования более точного средства (СРЦ-125-0,001) составил 47 тыс.р.

Проведена оценка экономического эффекта от внедрения технологического процесса восстановления валов установкой ремонтной втулки коробки передач силовых агрегатов ЯМЗ. Себестоимость восстановления поверхности вала под манжету по предложенной технологии составила 1556 р., экономический эффект составил 5444 р.

Рекомендации к производству

1. Для повышения ресурса соединения «вал-манжета» на этапе комплектации проводить разбиение диаметров манжет на две группы. Комплектовать манжет первой группы, с большими диаметрами, с восстановленными валами (большого диаметра), а манжет второй группы, с меньшими диаметрами – с новыми фланцами.

2. Для контроля отклонений формы и расположения поверхностей деталей при ремонте машин выбирать цифровые средства измерений по критерию (5.1).

3. При реализации технологического процесса обработки поверхности вала под манжету учитывать требования к относительной опорной длине профиля, которая должна составлять не менее 60% на 50% - ном уровне, а также требования к виду обработки, формирующего такой профиль.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Проведенные диссертационные исследования могут служить основой для дальнейшего развития методов цифровизации и размерного анализа с целью обеспечения качества сборки соединений при ремонте.

Перспективными направлениями развития темы являются:

1. Разработка имитационной модели технологического процесса комплектации и сборки с целью оптимизации технико-экономических показателей качества процесса и т.д.;

2. Составление размерных цепей и проведение расчетов с целью повышения качества сборки различных узлов и агрегатов сельскохозяйственной техники.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bauer, N. Elastohydrodynamic Simulation of Pneumatic Sealing Friction Considering 3D Surface Topography / N. Bauer, M. Baumann, S. Feldmeth, F. Bauer, K. Schmitz // *Chemical Engineering & Technology*. 46 (2023), N 1 Special Issue: Digital Reliable Sustainable, P. 167-174. DOI 10.1002/ceat.202200471;
2. Chen, X. Dynamic behavior analysis of rigid-flexible coupling planar mechanism considering dry clearances and lubrication clearances / X. Chen, T. Wang // *J. of Mechanical Science and Technology*. 2023. Vol. 37. <https://doi.org/10.1007/s12206-023-0302-3>;
3. Chu, Z. Analysis of uncertainty relation of pin-shaft fitting in mechanical system with clearance / Z. Chu, D. Hu // *Vibroengineering PROCEDIA*. 2021. Vol. 38. P. 113. <https://doi.org/10.21595/vp.2021.22099>;
4. Erokhin, M.N. Calculation of fits for cylindrical connections with key for reducers in agricultural machinery / M.N. Erokhin // *Engineering for Rural Development*. 2019. P.469–474;
5. Erokhin, M.N. Assessing the Relative Interchangeability in Joints with Preload/ M.N. Erokhin // *Russian Engineering Research*. 2020.V. 40. P. 469–472;
6. Erokhin, M.N. Influence of Volumetric Modification on the Physical and Mechanical Properties of Rubber Reinforced Cuffs / M.N. Erokhin, O.M. Melnikov, O.A. Leonov, N.Zh. Shkaruba // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2023. Vol. 52, No. 7. P. 43-48. DOI 10.3103/S1052618823070087;
7. Erokhin, M.N. Production and Repair of Agricultural Equipment: Analysis by the 5M Principle. / M.N. Erokhin, O.A. Leonov, N.Z. Shkaruba // *Russ. Engin. Res*. Vol. 43. P. 1242 –1245 (2023). <https://doi.org/10.3103/S1068798X23100076>;
8. Erokhin, M.N. Shaft Surface Roughness Standardization for Connections with Rubber Armored Cuffs / M.N. Erokhin, O.A. Leonov, N.Zh. Shkaruba, O.M. Mel'nikov, L.A. Grinchenko // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2024. Vol. 53, No. 8. P. 896-902. DOI 10.1134/S1052618824700699;

9. Erokhin, M.N. Tightness and Leakage in Applying Reinforced Rubber Sleeves to Shafts / M.N. Erokhin // Russian Engineering Research. 2019. V. 39. N. 6. P. 459–462;
10. Feuchtmüller, O. On friction and surface energy in the tribological contact of rod seals / O. Feuchtmüller, L. Hörl, F. Bauer // In: 7th World Tribology Congress, 2022 IMA-DT 717;
11. Grün, J. Modeling and Simulation of the Dynamic Sealing and Lubrication Mechanism of Rotary Shaft Seals / J. Grün, S. Feldmeth, F. Bauer // In: 77th STLE Annual Meeting & Exhibition, 2023. IMA-DT 738;
12. Grün, J. Modeling of Mixed Friction on Rotary Shaft Seals under Consideration of Real Measured Surface Data / J. Grün, S. Feldmeth, F. Bauer // In: 76th STLE Annual Meeting & Exhibition, 2022 IMA-DT 706;
13. Grün, J. Multiscale Structural Mechanics of Rotary Shaft Seals: Numerical Studies and Visual Experiments / J. Grün, M. Gohs, F. Bauer // Lubricants. (2023), 11(6), 234. DOI 10.3390/lubricants11060234;
14. Heo, Seongjun Design of an expeller seal to reduce leakage in a stuffing box / Seongjun Heo, Gunyoung Park, Chanyoung Shin, Kyungkook Lim, Hyoseo Kwak, Hyoseong Jang, Chul Kim // Journal of Mechanical Science and Technology. 2022. 36. P. 2387-2396. DOI –10.1007/s12206-022-0421-2;
15. <https://www.bpmn.org/>;
16. Janusz, Datta Influence of Glycols on the Glycolysis Process and the Structure and Properties of Polyurethane Elastomers / Datta Janusz // Journal of Elastomers and Plastics. 2011. № 43. P. 529-541;
17. Janusz, Datta Synthesis and Investigation of Glycolysates and Obtained Polyurethane Elastomers / Datta Janusz // Journal of Elastomers and Plastics. 2010. № 42. P. 117-127;
18. Kirchmer, M. Chapter 1: Business Process Management: What Is It and Why Do You Need It? / M. Kirchmer // High Performance Through Business Process Management: Strategy Execution in a Digital World. Springer, 2017. P. 1–28. ISBN 9783319512594;

19. Leonov, O.A. Quality Control in the Machining of Cylinder Liners at Repair Enterprises / O.A. Leonov, N.Zh. Shkaruba, Y.G. Vergazova [et al.] // Russian Engineering;

20. Leonov O.A. Calculation of the maximum functional clearance of a cylindrical joint between a steel shaft and a cast iron sprocket / O.A. Leonov, N.Zh. Shkaruba, Yu.G. Vergazova // CIS Iron and Steel Review. 2024. Vol. 27. P. 108-112. DOI 10.17580/cisr.2024.01.17;

21. Leonov O.A. Determining the Tolerances in Fitting for Joints with Interference / O.A. Leonov // Russian Engineering Research. 2019. V. 39. N.7. P.554–547;

22. Leonov O.A. Development of the management system for metrological assurance of measurements / O.A. Leonov, N.Zh. Shkaruba // Krasnoyarsk, Russia: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. P. 32010. DOI 10.1088/1742-6596/1515/3/032010;

23. Leonov, O. Automation of repair company processes through the use of digital models / O. Leonov, N. Shkaruba, D. Pupkova, L. Grinchenko // E3S Web of Conferences. 2024. Vol. 583. P. 05017. DOI 10.1051/e3sconf/202458305017;

24. Leonov, O.A. Calculation of Fit Tolerance with Clearance to Increase Relative Wear Resistance of Joints / O.A. Leonov, N.Zh. Shkaruba, G.N. Temasova [et al.] // Journal of Friction and Wear. 2023. Vol. 44, No. 3. P. 171-177. DOI 10.3103/S1068366623030054;

25. Leonov, O.A. Fit of Elastic Sleeve–Pin Couplings with Shafts / O.A. Leonov, N.Zh. Shkaruba, Yu.G. Vergazova [et al.] // Russian Engineering Research. 2023. Vol. 43, No. 4. P. 399-403. DOI 10.3103/S1068798X2305012X;

26. Leonov, O.A. Justification of Keyed Joint Fits / O.A. Leonov, N.Zh. Shkaruba, Yu.G. Vergazova, D.U. Khasyanova // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2022. Vol. 51, No. 6. P. 548-553. DOI 10.3103/S1052618822060073;

27. Leonov, O.A. Project Assessment of the Reliability of the Joint of a Circulation-Loaded Ring of a Rolling Bearing with a Shaft of Tolerance Class js6 / O.A. Leonov, N.Zh. Shkaruba, Yu.G. Vergazova [et al.] // Journal of Machinery

Manufacture and Reliability. 2023. Vol. 52, No. 4. P. 343-350. DOI 10.3103/s1052618823040088;

28. Leonov, O.A. Study of the Influence of Macrogeometry Parameters on the Tightness of Shaft–Seal Joints / O. A. Leonov, N. Zh. Shkaruba, L. A. Grinchenko [et al.] // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2023. Vol. 52, No. 6. P. 40-47. DOI 10.1134/S1052618823060109;

29. Li, Yongfan Experimental Study on Leakage and Thermal Features of Herringbone-Grooved Oil-Film-Lubricated Mechanical Face Seals / Yongfan Li, Muming Hao, Baojie Ren, Tianzhao Li, Xinhui Sun, // Tribology Online. 2022. 17. 126-134. – DOI 10.2474/trol.17.126;

30. Liu, Y Fretting initiated crevice corrosion of 316LVM stainless steel in physiological phosphate buffered saline: Potential and cycles to initiation. / Y Liu, D Zhu, D Pierre, JL Gilbert // Acta Biomater. 2019 Oct 1;97:565-577. doi: 10.1016/j.actbio.2019.07.051. Epub 2019 Jul 30. PMID: 31374339;

31. Mayasari, Hesty The preparation of nbr/enr composite for oil seal applications / Hesty Mayasari, Muhammad Sholeh, Norma Kinasih, Muh Sya'bani, Bidhari Pidhatika, // European Journal of Materials Science and Engineering. 5. 161-170. DOI 10.36868/ejmse.2020.05.03.161;

32. Melezhik, R. Load simulation and substantiation of design values of a pin flexible coupling with a flexible disk-type element / R. Melezhik, D. Vlasenko // Mining Science and Technology. 2021. Vol. 6. P. 128. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-128-135>;

33. Park, Won Man Oil-Sealing Performance Evaluation of Labyrinth Seal Using Combined Finite Element Analysis and Computational Fluid Dynamics. / Won Man Park, Sung Son, Dae Choi, Hong Lee, Choengryul Choi, // Lubricants. 11. 400. 10.3390/lubricants11090400;

34. Qingya, Li Design of Positioning Mechanism Fit Clearances Based on On-Orbit Re-Orientation Accuracy / Li Qingya, Libao Yang, Weiguo Zhao // Applied Sciences-Basel. 2019. 6(21) № 4712;

35. Röttger, J. Influence of dressing parameters on the formation of micro lead on shaft sealing counterfaces during external cylindrical plunge grinding / J. Röttger, T. Bergs, S. Barth, M. Baumann, F. Bauer // *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*. (2022). DOI 10.1016/j.aime.2022.100098;
36. Shabbir Sarah, Analysis of the tribological interaction of a polytetrafluoroethylene-lined radial lip oil seal, shaft and lubricant sample / Sarah Shabbir, Seamus Garvey, Sam Dakka, Benjmain Rothwell, Su Rong, Richard Leach, Nicola Weston // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2021. P. 236. DOI 10.1177/13506501211005876;
37. Sheng, Li Effect of Elastomer on Flame Retardancy, Thermal Degradation, and Mechanical Properties of Intumescent Flame-Retardant Polyethylene / Li Sheng // *Journal of Elastomers and Plastics*. 2011. № 43. P. 257-273;
38. Stoll, M. A near-frictionless sealing approach with innovative gas-lubricated shaft seals made of elastomer / M. Stoll, N. Dakov, M. Gohs, F. Bauer // *Tribology Transactions*. 2021. 64(6), P.1022-1034. DOI 10.1080/10402004.2021.1958967;
39. Wang, Rui Nonlinear Analysis of Rotor-Bearing-Seal System with Varying Parameters Muszynska Model Based on CFD and RBF. *Machines* / Rui Wang, Yuefang Wang, Cao Xiaojian, Shuhua Yang, Xinglin Guo, //. 10.3390/machines10121238;
40. Weske, M. Chapter 1: Introduction. *Business Process Management: Concepts, Languages, Architectures*. / M. Weske // Springer Science & Business Media, 2012. P. 1–24. ISBN 9783642286162;
41. Wu, Tingcheng CFD analysis of the influence of gas content on the rotordynamic force coefficients for a circumferentially grooved annular seal for multiple phase pumps / Tingcheng Wu, Luis San Andrés, Xueliang Lu // *Journal of Tribology*. 144. 1-10. 10.1115/1.4054757;
42. Xiang-ping, Cheng Study on Sealing Performance of Oil Seal with Micropores Textured in Rotary Shaft Surface / Cheng Xiang-ping, Zhang You-liang, Kang Lin-ping, // *MATEC Web of Conferences*. 10.1051/matecconf/202032703002;

43. Антропов, Б.С. Методы обеспечения работоспособности уплотнений коленчатого вала на автотракторных двигателях ЯМЗ / Б.С. Антропов, В.А. Бодров, И.С. Басалов // Вестник АПК Верхневолжья. 2014. № 4(28). С. 80-81;
44. Балакшин, Б.С. Взаимозаменяемость и технические измерения в машиностроении / Б.С. Балакшин // М.: Машиностроение, 1972. С. 615;
45. Балакшин, Б.С. Теория и практика технологии машиностроения / Б.С. Балакшин // М.: Машиностроение, 1982. С. 239;
46. Башта, Т.М. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: Учебник / Т.М. Башта, С.С. Руднев, Б.Б. Некрасов [и др.] // 4 изд. М.: «Издательство дом Альянс», 2010. С. 423;
47. Белов, М.И. Оценка давления уплотнения на вал / М.И. Белов, М.Н. Ерохин, О.М. Мельников // Агроинженерия. 2020. № 2(96). С. 29-33. DOI 10.26897/2687-1149-2020-2-29-33;
48. Березин, М.А. Повышение долговечности уплотнительных соединений совершенствованием условий контактного взаимодействия в системе "уплотнитель-контртело": на примере уплотнительных соединений ГУР трактора МТЗ 80/82 Автореф дис. канд. техн. наук / М.А. Березин // Саранск. 2006. С. 215;
49. Березин, М.А. Теоретическое исследование влияния шероховатости поверхности контртела на работоспособность неподвижных уплотнительных соединений / М.А. Березин // Агропромышленные технологии Центральной России. 2023. № 1(27). С. 137-143. DOI 10.24888/2541-7835-2023-27-137-143;
50. Богуцкий, В.Б. Размерный анализ как инструмент обеспечения эксплуатационных характеристик электроинструмента / В.Б. Богуцкий, Л.Б. Шрон, В.М. Мануйленко, М.В. Пянковская // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 8-2. С. 64-70;
51. Бондарева, Г.И. Оценка внешнего брака на предприятиях машиностроения / Г.И. Бондарева, Г.Н. Темасова, О.А. Леонов [и др.] // Вестник машиностроения. 2021. № 11. С. 93-96. DOI 10.36652/0042-4633-2021-11-93-96;
52. Бондарева, Г.И. Проектирование и анализ качества контрольных процессов на ремонтных предприятиях / Г.И. Бондарева, О.А. Леонов, Н.Ж.

Шкаруба [и др.]. // Москва : Общество с ограниченной ответственностью «ОнтоПринт», 2020. С. 95. DOI 10.37738/VNIIGIM.2021.77.78.001;

53. Бондарева, Г.И. Разработка алгоритма верификации запасных частей при ремонте машин / Г.И. Бондарева, О.А. Леонов, Н.Ж. Шкаруба [и др.] // Сельский механизатор. 2022. № 10. С. 27-29. DOI 10.47336/0131-7393-2022-10-27-28-29;

54. Бородачев, Н.А. Расчетные методы выявления резервов производительности и точности производства в точном машиностроении и приборостроении / Н.А. Бородачев // Труды Московского авиационного института. Вып. 116.1959. С. 13-67;

55. Бородачев, Н.А. Точность производства в машиностроении и приборостроении / Н.А. Бородачев, Р.М. Абдрашитов, И.М. Веселова, ред. А.Н. Гаврилова // М.: Машиностроение, 1973. С. 567;

56. Бoryчев, С.Н. Оценка уровня эксплуатационной надежности технических средств, используемых при уборке картофеля / С.Н. Бoryчев, И.А. Успенский, Н.В. Бышов, Г.К. Рембалович // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. 2009. № 4. С. 29-31;

57. Власов, А.И. Системный анализ производства с использованием визуальных инструментов BPMN / А.И. Власов, Д.С. Гоношилов // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2019. № 3(175). С. 10-16;

58. Водяков, В.Н. Математическая модель утечек рабочей жидкости в неподвижных уплотнительных соединениях / В.Н. Водяков, М.А. Березин, В.В. Кузнецов // Тракторы и сельхозмашины. 2013. № 12. С. 28-30;

59. Водяков, В.Н. Повышение ресурса уплотнительных соединений активного типа модификацией посадочных мест / В.Н. Водяков, В.В. Кузнецов, М. А.Березин, В.И. Борисов // Тракторы и сельхозмашины. 2009. № 8. С. 33-37;

60. Вошинин, А.П. Оптимизация в условиях неопределенности / А.П. Вошинин, Г.Р. Сотиров // М. : Изд-во Моск. энергетич. ин-та : Техника, 1989. С. 224 с. ISBN 5-7046-0001-8;

61. Гайдар, С.М. Сальниковое уплотнение: патент на полезную модель № 55064 / С.М. Гайдар, А.В. Серяков, Л.П. Захаров // заявл. 02.02.2006; опубл. 27.07.2006. Бюл. № 21;
62. Галкин, М.Г. Вероятностный расчет технологических размерных цепей с учетом колебаний значений технологических припусков / М.Г. Галкин, А.С. Смагин // Вестник машиностроения. 2014. № 12. С. 44-46;
63. Галкин, М.Г. Особенности расчета технологических размерных цепей вероятностным методом / М.Г. Галкин, А.С. Смагин // Вестник машиностроения. 2016. № 4. С. 13-17;
64. Гаркунов, Д.Н. Уплотнение вращающегося вала / Д.Н. Гаркунов, В.Г. Бабель, Э.Л. Мельников [и др.] // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2020. № 5. С. 3-5. DOI 10.31044/1684-2561-2020-0-5-3-5;
65. Глинская, Н.Ю. Формализация выявления линейных размерных цепей / Н.Ю. Глинская, И.Д. Белоновская, А.М. Черноусова // Научно-технический вестник Поволжья. 2023. № 11. С. 44-48;
66. Голиницкий, П.В. Цифровые технологии проектирования процессов в АПК / П.В. Голиницкий, У.Ю. Антонова, Э.И. Черкасова [и др.] // Москва : Российский государственный аграрный университет- Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева, 2023. С. 172. ISBN 978-5-00207-374-0;
67. Голубев, А.И. Уплотнения и уплотнительная техника. / А.И. Голубев, Л.А. Кондаков // М.: Машиностроение, 1985. С. 463;
68. Голубев, Г.А. Контактные уплотнения вращающихся валов / Г.А. Голубев, Г.Н. Кукин, Г.Е. Лазарев, А.В. Чичинадзе // М.: Машиностроение, 1976. С. 264;
69. ГОСТ 2.308–2011. ЕСКД. Указания допусков формы и расположения поверхностей. М.: Стандартинформ, 2012. С. 27;
70. ГОСТ 2.309-73. Единая система конструкторской документации. Обозначения шероховатости поверхностей. Взамен ГОСТ 2.309-68 ; введ. 9.11.1973. М.: Стандартинформ, 2007;

71. ГОСТ 27860-88. Детали трущихся сопряжений. Методы измерения износа. М.: Изд-во стандартов, 1988;
72. ГОСТ 8.051-81 (СТ СЭВ 303-76) государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Погрешности, допускаемые при измерении линейных размеров до 500 мм. М.: Изд-во стандартов, 1986. С. 84;
73. ГОСТ 8.207-76. ГСИ. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений [Текст]. М.: Изд-во стандартов, 1988;
74. ГОСТ 8752-79. Манжеты резиновые армированные для валов. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1990;
75. ГОСТ Р 8.736-2011. ГСИ. Измерения прямые многократны. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. [Текст]. М.: Изд-во стандартов, 2012;
76. Григорьев, А.В. Надежность и диагностика гидравлических систем : учеб. пособие / А.В. Григорьев, В.Е. Щерба, Е.А. Павлюченко, А.К. Кужбанов // Омск : Изд-во ОмГТУ, 2020. С. 116. ISBN 978-5-8149-3004-0. С. 41;
77. Гринченко, Л.А. Контроль соосности валов редукторов картофелеуборочного комбайна КПК-2-01 методом компенсации / Гринченко Л.А. // Москва: РГАУ - МСХА им. К.А. Тимирязева, 2024. С. 139-144;
78. Гринченко, Л.А. Моделирование и анализ процесса сборки методом полной взаимозаменяемости / Л.А. Гринченко // Чтения академика В. Н. Болтинского, Москва, 25–26 января 2023 года. Том 2. Москва: ООО «Сам полиграфист», 2023. С. 284-291;
79. Гринченко, Л.А. Мониторинг комплектации и сборки в процессе капитального ремонта двигателя внутреннего сгорания / Л.А. Гринченко // материалы конференции Ульяновского ГАУ. Ульяновск: Ульяновский ГАУ им. П.А. Столыпина, 2022. С. 762-768;
80. Гринченко, Л.А. Показатели качества резиновой армированной манжеты / Л.А. Гринченко // Москва: РГАУ - МСХА им. К.А. Тимирязева, 2023. С. 167-171;

81. Денисов, А.С. Теоретические предпосылки влияния режима работы сальника на герметичность уплотнения / А.С. Денисов, И.Г. Иванов // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. Т. 2, № 1(55). С. 142-146;
82. Денисов, В.А. Повышение износостойкости валов дифференциалов за счет применения технологии алмазного выравнивания / П.В. Пучков, В.П. Зарубин, В.В. Киселев [и др.] // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2022. № 4(72). С. 55-61. DOI 10.6060/snt.20227204.0008;
83. Денисов, В.А. Подходы к поиску конструктивных параметров ответственных деталей объемных гидроприводов зарубежного производства / В.А. Денисов, П.А. Ионов, С.В. Пьянзов [и др.] // Технический сервис машин. 2023. Т. 61, № 3(152). С. 32-38. DOI 10.22314/2618-8287-2023-61-3-32-38;
84. Дизели ЯМЗ-240Б, ЯМЗ-240БМ: Технические требования на капитальный ремонт ТК 10-05.0001.026–87. М.: ГосНИТИ, 1989. С. 99;
85. Дмитриев В.А. Детали машин. / В.А. Дмитриев // Л.: Судостроение, 1970. С. 792;
86. Доценко, А.И. Триботехника : учебник / А.И. Доценко, И.А. Буяновский // Москва : ИНФРА-М, 2020. 2-е изд., перераб. и доп. С. 399;
87. Дунаев, П. Ф. Расчет допусков размеров / П. Ф. Дунаев, О. П. Леликов. — 4-е изд. перераб. и доп. // Москва : Машиностроение, 2006. С. 400 ISBN 5-217-03309-6;
88. Дунин-Барковский, И.В. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения: учебник / И.В. Дунин-Барковский // М.: Издательство стандартов, 1987. С. 352;
89. Ерохин, М. Н. Применение размерного анализа для расчета суммарного отклонения от соосности манжеты относительно вала / М.Н. Ерохин, О.А. Леонов, Н.Ж. Шкаруба // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2021. № 6. С. 61-67. DOI 10.31857/S0235711921060067;

90. Ерохин, М.Н. Влияние объемного модифицирования на физико-механические свойства резиновых армированных манжет / М.Н. Ерохин, О.М. Мельников, О.А. Леонов, Н.Ж. Шкаруба // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2021. № 4. С. 41-47. DOI 10.52261/02346206-2021-4-41;
91. Ерохин, М.Н. Детали машин / М.Н. Ерохин, С.П. Казанцев // М.: ТРАНСЛОГ, 2018. С. 410;
92. Ерохин, М.Н. Исследование влияния полимерных добавок на основе фтора на физико-механические свойства / М.Н. Ерохин, Н.А. Выхребенцев // Сборник научных трудов МИИСП. 1991. С. 91-97;
93. Ерохин, М.Н. Методика расчета контактного давления манжеты на вал / М.Н. Ерохин, М.И. Белов, О.М. Мельников // Вестник машиностроения. 2020. № 11. С. 39-45. DOI 10.36652/0042-4633-2020-11-39-45;
94. Ерохин, М.Н. Методика расчета натяга для соединений резиновых армированных манжет с валами по критерию начала утечек / М.Н. Ерохин, О.А. Леонов, Ю.В. Катаев, О.М. Мельников // Вестник машиностроения. 2019. № 3. С. 41-44;
95. Ерохин, М.Н. Нормирование допускаемой погрешности измерения массы при контроле деталей шатунно-поршневой группы / М.Н. Ерохин, О.А. Леонов, Н.Ж. Шкаруба [и др.] // Вестник машиностроения. 2021. № 9. С. 40-44. DOI 10.36652/0042-4633-2021-9-40-44;
96. Ерохин, М.Н. Нормирование шероховатости поверхностей валов в соединениях с резиновыми армированными манжетами / М. Н. Ерохин, О. А. Леонов, Н. Ж. Шкаруба [и др.] // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2024. № 2. С. 104-111. DOI 10.52261/02346206_2024_2_104;
97. Ерохин, М.Н. Процентная взаимозаменяемость посадок с натягом / М.Н. Ерохин // Вестник машиностроения. 2020. № 3. С. 41-44;
98. Ерохин, М.Н. Расчет предельного натяга в соединениях «Вал-манжета» / М.Н. Ерохин, О.А. Леонов, Ю.В. Катаев, О.М. Мельников, под общ. ред. В.Ю. Лавриненко // Москва: Московский государственный областной университет, 2019. С. 311-315;

99. Житомирский, В.К. Уплотнения. / В.К. Житомирский // М.: Машиностроение, 1964. С. 154;
100. Журавлева, С.Н. Влияние силовых факторов на обеспечение гарантированной герметизации манжетных уплотнений для вращающихся валов / С.Н. Журавлева, П.Е. Распопова // Новые материалы и технологии в машиностроении. 2022. № 36. С. 18-22;
101. Журавлева, С.Н. Исследование влияния внутренних силовых факторов на характер изменения мощности трения в манжетном уплотнении / С.Н. Журавлева // Новые материалы и технологии в машиностроении. 2021. № 34. С. 21-25;
102. Задорина, Н.А. Обеспечение качества сборки высокоточных изделий на основе метода индивидуального подбора деталей / Н.А. Задорина, В.В. Непомилуев // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2020. № 4. С. 152-157;
103. Задорожний, Р.Н. Анализ материалов деталей, работающих в агрессивных средах перерабатывающих производств / Р.Н. Задорожний, Е.Ю. Кудряшова, И.В. Романов // Технический сервис машин. 2024. Т. 62, № 1. С. 86-93. DOI 10.22314/2618-8287-2024-62-1-86-93;
104. Иванов, А.И. Основы взаимозаменяемости и технические измерения / А.И. Иванов // М.: Колос, 1975. С. 493;
105. Игнаткин, И.Ю. Способ восстановления изношенной поверхности вала редуктора в соединении «вал-манжета» с применением ремонтной втулки и полимерных материалов / И.Ю. Игнаткин, А.В. Дроздов // Вестник ФГБОУ ВО «МГАУ им. В.П. Горячкина». 2019. № 6(94). С. 40-45. DOI 10.34677/1728-7936-2019-6-40-45;
106. Ионов, П.А. Определение номинальных значений размеров и допускаемых отклонений ответственных деталей агрегатов зарубежной техники / П.А. Ионов, П.В. Сенин, С.В. Пьянзов [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 4. С. 520-538. DOI 10.15507/2658-4123.032.202204.520-538;

107. Карпузов, В.В. Основы подтверждения соответствия : учеб. пособие / В.В. Карпузов // Москва : РГАУ-МСХА, 2016. С. 159 ; ISBN 978-5-9675-1559-0;
108. Касавченко, Е.В. Исследование и разработка методов повышения надежности уплотнительных узлов тракторов «Кировец» при капитальном ремонте: Дис. канд. тех. наук. / Е.В. Касавченко // Л. Пушкин: ЛСХИ, 1980. С. 196;
109. Комиссар, А.Г. Уплотнительные устройства опор качения: Справочник / А.Г. Комиссар // М.: Машиностроение, 1980. С. 192;
110. Коморницкий-Кузнецов, В.К. Исследование фрикционных характеристик уплотнений вращающихся валов: Автореф. дис. канд. техн. наук / В.К. Коморницкий-Кузнецов // М.: МИИСП, 1973. С. 19;
111. Кондаков, Л.А. Рабочие жидкости и уплотнения гидравлических систем / Л.А. Кондаков // Москва : Машиностроение, 1982. С. 217;
112. Кондаков, Л.А. Уплотнения и уплотнительная техника. Справочник / Л.А. Кондаков, А.И. Голубев, В.Б. Овандер [и др.], под общ. ред. Голубева А.И. Кондакова Л.А. // М., Машиностроение. 1986. С. 464;
113. Кононенко, А.П. Уплотнительные устройства машин и машиностроительного оборудования / А.П. Кононенко, Ю.Н. Голубов // М. Машиностроение, 1984. С. 104;
114. Краев, М.В. Гидродинамические радиальные уплотнения высокооборотных валов / М.В. Краев // Москва: Машиностроение, 1976. С. 104;
115. Кряжков, В.М. Надежность и качество сельскохозяйственной техники / В.М. Кряжков. // Москва : Агропромиздат, 1989. 334 с. : ил.; 22 см.; ISBN 5-10-000319-7. С. 39;
116. Леонов, О.А. Дефектация валов и шестерен с позиции обеспечения качества соединений при ремонте редукторов сельхозмашин / О.А. Леонов, Н.Ж. Шкаруба, Ю.Г. Вергазова // Агроинженерия. 2022. Т. 24. № 4. С. 48-52. DOI 10.26897/2687-1149-2022-4-48-52;
117. Леонов, О.А. Исследование влияния параметров макрогеометрии на герметичность соединений вала с манжетой / О.А. Леонов, Н.Ж. Шкаруба, Л.А.

Гринченко [и др.] // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2023. № 6. С. 40-47. DOI 10.31857/S0235711923060111;

118. Леонов, О.А. Методика комплектования деталей соединений «Вал-уплотнение» при ремонте / О.А. Леонов, Н.Ж. Шкаруба, Ю.Г. Вергазова, Г.А. Нестеркин // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 4. С. 70-75. DOI 10.26897/2687-1149-2023-4-70-75;

119. Леонов, О.А. Методы и средства контроля качества обработки гильз цилиндров на ремонтных машиностроительных предприятиях / О.А. Леонов, Н.Ж. Шкаруба, Ю.Г. Вергазова, П.В. Голиницкий, У.Ю. Антонова // Вестник машиностроения. 2020. № 6. С. 40-45;

120. Леонов, О.А. Нормирование допускаемой погрешности и выбор средств измерения при контроле отклонения формы и расположения поверхностей / О. А. Леонов, Н.Ж. Шкаруба, Л.А. Гринченко // Агроинженерия. 2021. № 2(102). С. 51-57. DOI 10.26897/2687-1149-2021-2-51-57;

121. Леонов, О.А. Нормирование погрешности косвенных измерений при приёмо-сдаточных испытаниях двигателей / О.А. Леонов, Н.Ж. Шкаруба // Измерительная техника. 2022. № 8. С. 23-27. DOI 10.32446/0368-1025it.2022-8-23-27;

122. Леонов, О.А. Обеспечение качества ремонта унифицированных соединений сельскохозяйственной техники методами расчета точностных параметров: Дис. докт. техн. наук. / О.А. Леонов // М.: ФГОУ ВПО МГАУ, 2004. С. 324;

123. Леонов, О.А. Обеспечение точности расположения осей валов редукторов методом компенсации / О.А. Леонов, Н.Ж. Шкаруба, Л.А. Гринченко // Вестник машиностроения. 2024. Т. 103, № 11. С. 917-920. DOI 10.36652/0042-4633-2024-103-11-917-920;

124. Леонов, О.А. Свид. 2018610898 Российская Федерация. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. Программа для расчета расчет вероятностных характеристик распределения размеров деталей после разбраковки

/ О.А. Леонов, Н.Ж. Шкаруба // №2017662148; рег. 19.01.2018, Реестр программ для ЭВМ. С. 1;

125. Леонов, О.А. Создание цифровой модели процесса комплектации и сборки для ремонтного производства / О. А. Леонов, Н. Ж. Шкаруба, Л. А. Гринченко, Д. А. Пупкова // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2023. № 2(70). С. 458-466. DOI 10.32786/2071-9485-2023-02-54;

126. Леонов, О.А. Цифровая модель процесса комплектации и сборки при ремонте двигателей / О.А. Леонов, Н.Ж. Шкаруба, Ю.Г. Вергазова, Л.А. Гринченко // Сельский механизатор. 2024. № 5. С. 39-40. DOI 10.47336/0131-7393-2024-5-38-39-40-44;

127. Лепешкин, А.В. Гидравлические и пневматические системы / А.В. Лепешкин, А.А. Михайлин // М.: Академия, 2013. С. 336 с;

128. Логиновас, А.К. Долговечность подвижных уплотнений судовых механизмов. / А.К. Логиновас // Л.: Судостроение, 1976. С. 48

129. Логиновас, А.К. Исследование износа манжетного уплотнения вращающегося вала / А.К. Логиновас // Каучук и резина. 1971. № 3. С. 26-29;

130. Мельников О.М. Совершенствование уплотнительных устройств подшипниковых узлов сельскохозяйственной техники / О.М. Мельников, С.П. Казанцев, И.Ю. Игнаткин [и др.] // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 3. С. 68-72. DOI 10.26897/2687-1149-2022-3-68-72;

131. Мельников, О.М. Влияние браслетной пружины на контактную нагрузку в соединении «Вал-манжета» / О.М. Мельников, Н.В. Серов, А.Г. Гамидов [и др.] // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 4. С. 76-80. DOI 10.26897/2687-1149-2023-4-76-80;

132. Мельников, О.М. Влияние фторорганических соединений на физико-механические свойства резины для манжетных уплотнений сельскохозяйственной техники / О.М. Мельников // Вестник ФГБОУ ВО «МГАУ им. В.П. Горячкина». 2018. № 3(85). С. 42-46. DOI 10.26897/1728-7936-2018-3-42-46;

133. Мельников, О.М. Оценка показателей качества деталей и соединения «вал-манжета» / О.М. Мельников, С.П. Казанцев, О.В. Чеха // Вестник ФГБОУ ВО "МГАУ им. В.П. Горячкина". 2019. № 5(93). С. 8-13. DOI 10.34677/1728-7936-2019-5-8-13;

134. Мельников, О.М. Работоспособность соединений «вал-манжета» и повышение их надежности. / О.М. Мельников // Агроинженерия. 2018. № 2(84). С. 50-54. DOI 10.26897/1728-7936-2018-2-50-54;

135. Мельников, О.М. Совершенствование уплотнительных устройств подшипниковых узлов сельскохозяйственной техники / О.М. Мельников, С.П. Казанцев, И.Ю. Игнаткин [и др.] // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 3. С. 68-72. DOI 10.26897/2687-1149-2022-3-68-72;

136. Мельников, П.А. Повышение надежности работы манжетных уплотнений за счет оптимизации микрорельфа шейки вала / П.А. Мельников, А.Н. Пахоменко // Фундаментальные исследования. 2013. № 10-5. С. 1005-1009;

137. МИ 2083–90 ГСИ. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей. М.: Изд-во стандартов, 1991. С. 11

138. Миф, Н.П. Модели и оценка погрешности механических измерений / Миф Н.П. // М.: Изд-во стандартов, 1976. С. 144;

139. Муравьев, Д.В. Обеспечение точности сборки приспособления для контроля соосности моторно-осевых подшипников локомотивов методами размерного анализа / Д.В. Муравьев, К.В. Артюхов // Известия Транссиба. 2022. № 4(52). С. 48-57;

140. Мухаметшина А.И. Влияние состава резины манжет на их работоспособность / А.И. Мухаметшина, И.В. Буторин, Г.Д. Нурлыева [и др.] // Автомобильная промышленность. 2015. № 2. С. 34-36;

141. Новицкий, П.В. Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зограф // Ленинград : Энергоатомиздат. 1991. С. 301; ISBN 5-283-04513-7. С. 38;

142. Польский, Е.А. Повышение надежности изделий машиностроения за счет совершенствования точностного анализа размерных цепей / Е.А. Польский,

С.В. Сорокин // Научные технологии в машиностроении. 2022. № 6(132). С. 38-48. DOI 10.30987/2223-4608-2022-6-38-48;

143. Попов В.Н. Исследование работоспособности и выбор рациональных способов восстановления деталей уплотнительных узлов сельскохозяйственных тракторов: Дис. канд. техн. наук. / Попов В.Н. // Л. Пушкин: ЛСХИ, 1975. С. 191;

144. Пучков, П.В. Повышение износостойкости валов дифференциалов за счет применения технологии алмазного выглаживания / П.В. Пучков, В.П. Зарубин, В.В. Киселев [и др.] // Современные научные технологии. Региональное приложение. 2022. № 4(72). С. 55-61. DOI 10.6060/snt.20227204.0008;

145. РД IDEF0-2000 «Методология функционального моделирования IDEF0» : официальное издание принят Постановлением Госстандарта России от 2000 г. : ИПК Издательство стандартов, 2000. С. 75;

146. Резиновые уплотнения вращающихся валов. Каталог справочник. М.: ЦНИИ нефтехим, 1980;

147. Сенин П.В., Расчетно-теоретический анализ размерных цепей при восстановлении посадочного гнезда под бурт гильзы по глубине двигателей Д-245, Д-260 / П.В. Сенин, Н.В. Раков, А.В. Смольянов, А.М. Макейкин // Инженерные технологии и системы. 2020. Т. 30. № 2. С. 188-199;

148. Сковородин, В.Я. Долговечность сопряжений деталей отремонтированной сельскохозяйственной техники (на примере сельскохозяйственных тракторов): Дис. д-ра техн. наук. / В.Я. Сковородин // Л. Пушкин: ЛСХИ, 1985. С. 284;

149. Суханов, В.А. Исследование деформаций и повреждений V-образных блоков цилиндров и совершенствование технологии их ремонта с целью повышения послеремонтного ресурса (на базе двигателя ЗИЛ–130) : Дис. канд. техн. наук / В.А. Суханов // МИИСП. Москва. 1980. С. 223;

150. Тараховский, А.Ю. Анализ применимости фторопласта в конструкциях современных уплотнений силовых гидроцилиндров / А.Ю.

Тараховский, И.И. Бабилов // Автоматизированное проектирование в машиностроении. 2020. № 8. С. 29-31. DOI 10.26160/2309-8864-2020-8-29-31;

151. Тимирязев, В.А. Достижение точности замыкающего звена методом групповой взаимозаменяемости / В.А. Тимирязев, М.З. Хостикоев, В.Н. Коноплев [и др.] // СТИН. 2019. № 1. С. 2-5;

152. Тодер, И.А. Формирование рациональной геометрии полиуретановых манжет для уплотнений опор прокатных валков / И.А. Тодер, В.А. Толстых // Тяжелое машиностроение. 2011. № 2. С. 42-47;

153. Уорд, И. Механические свойства твердых полимеров /И. Уорд // М.: Химия, 1975. С. 357;

154. Филипович, О.В. Имитационная модель селективной сборки трех элементов с сортировкой по оцениваемым значениям / О.В. Филипович // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2022. № 1. С. 14-17. DOI 10.36652/0202-3350-2022-23-1-14-17;

155. Филипович, О.В. Модель процесса одновариантной однопараметрической селективной сборки двух элементов с учетом погрешностей измерения при их сортировке / О.В. Филипович // Автоматизация и измерения в машино- приборостроении. 2023. № 3(23). С. 93-101;

156. Филипович, О.В. Определение количества комплектов при селективной сборке двух элементов с учетом влияния погрешности измерения / О.В. Филипович, Г.В. Невар, Н.А. Валошина, В.О. Филипович // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2023. № 3. С. 105-109. DOI 10.36652/0202-3350-2023-24-3-105-109;

157. Харламов, Ю.А. Размерный анализ технологических процессов восстановления деталей машин / Ю.А. Харламов, А.П. Жильцов, Д.А. Вишневский, А.В. Бочаров // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2021. № 5(734). С. 37-47. DOI 10.18698/0536-1044-2021-5-37-47.

158. Хрусталеv, А.А. Уплотнение вращающихся валов / А.А. Хрусталеv, В.А. Булки, Ю.А. Дулатов // Казань.: КХТИ, 1978. С. 39;

159. Цепи размерные. Методы суммирования векторных погрешностей Рекомендации / Всесоюз. науч.-исслед. ин-т по нормализации в машиностроении. Москва : ВНИИНМаш, 1976. С. 54;

160. Чернавский С.А. Подшипники скольжения / С.А. Чернавский // М.: Машгиз, 1963. С. 242;

161. Черноиванов, В.И. Инновационные методы повышения послеремонтной надежности сельскохозяйственной техники и инвестиционной привлекательности ремонтно-обслуживающих предприятий в АПК: Монография / В.И. Черноиванов, Р.Ю. Соловьев, А.К. Ольховацкий, В.П. Лялякин. Под общ. ред. В.И. Черноиванова // М.: ГНУ ГОСНИТИ, 2012. С. 499;

162. Чигиринский, Ю.Л. К вопросу о необходимости создания цифровых двойников технологических процессов механической обработки деталей машин / Ю.Л. Чигиринский, А.Л. Плотников, И.В. Фирсов, А.А. Жданов // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2024. № 3(286). С. 37-41. DOI 10.35211/1990-5297-2024-3-286-37-41;

163. Чигрик, Н.Н. Способ сборки равного количества деталей одноименных промежуточных и крайних размерных групп / Н.Н. Чигрик // Технология машиностроения. 2023. № 6. С. 37–47;

164. Шец, С.П. Интенсивность изнашивания манжет в трибосопряжении типа «вал-уплотнение» / С. П. Шец // Вестник Брянского государственного технического университета. 2009. № 2(22). С. 9-12;

165. Шкаруба, Н.Ж. Влияние погрешностей измерения на результаты разбраковки при дефектации деталей машин / Н.Ж. Шкаруба // Тракторы и сельхозмашины. 2016. № 2. С. 41-43;

166. Шкаруба, Н.Ж. Обоснование допускаемой погрешности измерений при контроле отклонений формы и расположения поверхностей деталей / Н.Ж. Шкаруба, О.А. Леонов // Вестник машиностроения. 2020. № 12. С. 42-45. DOI 10.36652/4633-0042-2020-12-42-45;

167. Шкаруба, Н.Ж. Разработка комплексной методики выбора средств измерений линейных размеров при ремонте сельскохозяйственной: диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук / Н.Ж. Шкаруба // Москва, 2006. С. 156;

168. Шкаруба, Н.Ж. Совершенствование метрологического обеспечения ремонтного производства агропромышленного комплекса. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Н.Ж. Шкаруба // РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева. Москва, 2019. С. 274;

169. Шкаруба, Н.Ж. Современные организационные подходы к метрологическому обеспечению ремонтного производства / Н.Ж. Шкаруба // Вестник ФГБОУ ВО «МГАУ им. В.П. Горячкина». 2013. № 3(59). С. 41-44;

170. Якимов, И.М. Комплексный подход к моделированию сложных систем в системе VRwin-Arena / А.П. Кирпичников, В.В. Мокшин, Г.В. Костюхина, Т.А. Шигаева // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 6. С. 287-292;

171. Якимов, И.М. Структурное моделирование бизнес-процессов в системах BPMN EDITOR, ELMA, RUNAWFE / И.М. Якимов, А.П. Кирпичников, В.В. Мокшин [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17, № 10. С. 249-256;

172. Яковлев, С. А. Технологическое обеспечение качества электромеханической обработки деталей при ремонте сельскохозяйственных машин : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Яковлев Сергей Александрович, 2023. С. 423;

173. Яковлев, С.Н. Экспериментальное исследование износа манжетного уплотнения вращающегося вала / С.Н. Яковлев // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2019. № 2. С. 99-105. DOI 10.1134/S0235711919020160;

174. Яковлев, С.Н. Экспериментальное определение долговечности полиуретанового манжетного уплотнения / С.Н. Яковлев, В.Л. Мазурин // Вестник машиностроения. 2019. № 4. С. 33-37.

ПРИЛОЖЕНИЕ



www.agromash.com

Общество с ограниченной
ответственностью «Завод «АГРОМАШ»»
(ООО «Завод «АГРОМАШ»»)

ИНН 2456012447
КПП 213001001
ОГРН 1082456000461

428028, г. Чебоксары,
пр. Тракторостроителей,
д.101, кабинет 114А

Тел.: +7 8352 50-43-33
8 800 700 10 976
e-mail: agromash@yandex.ru

12.03.2025 № АМ-УСХ/163
на № _____ от _____

АКТ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЫ

Настоящий акт составлен о внедрении результатов законченной научно-исследовательской работы «Обеспечение качества сборки соединений при ремонте машин методами цифровизации и размерного анализа», выполненной в ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева на кафедре метрологии, стандартизации и управления качеством института механики и энергетики имени В.П. Горячкина. Авторы работы: д.т.н., профессор Леонов О.А., д.т.н., профессор Шкаруба Н.Ж., аспирант, ассистент Гринченко Л.А.

Результатами законченной научно-исследовательской работы являются разработанные методические рекомендации, включающие в себя:

1. Совершенствование методики размерного анализа для случаев составления и расчета: размерной цепи для соединения «вал-уплотнение», где предложено подразделять звенья на две категории – статические отклонения от соосности и динамические – в виде радиального биения; размеров компенсаторов для приведения отклонения от соосности соединяемых с помощью муфты валов редукторов в регламентируемые технической документацией пределы.

2. Расчеты, проведенные на примере выходного вала КПП (фланца) показали, что размерная цепь образуется из девяти звеньев, пять из которых являются отклонениями от соосности, а четыре – радиальным биением. В первоначальном новом состоянии формируется запас точности, как по параметру суммарной соосности, так и по параметру суммарного радиального биения. В процессе эксплуатации будет наблюдаться изнашивание подшипника качения в виде увеличения рабочего радиального зазора, и начнутся утечки смазки при достижении отклонения от соосности 0,095 мм при неизменном радиальном биении в 0,055 мм.

3. Компьютерную программу для расчета суммарного допуска в виде скалярного отклонения от соосности звена размерной цепи, формируемого посадкой с зазором.

Результаты исследований рекомендованы к использованию при ремонте поверхностей валов под уплотнение при проведении ремонтных работ для сборочных единиц сельхозмашин, выпускаемых ООО «Завод «АГРОМАШ»».

Генеральный директор

Р.А. Семенов