

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

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена на кафедре метрологии, стандартизации и управления качеством ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева».

Научный руководитель

Шкаруба Нина Жоровна,
доктор технических наук, доцент, профессор
кафедры метрологии, стандартизации и управления
качеством ФГБОУ ВО «Российский
государственный аграрный университет – МСХА
имени К. А. Тимирязева»

Официальные оппоненты:

Яковлев Сергей Александрович
доктор технических наук, доцент, профессор
кафедры технологии производства и ремонта
машин ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный
аграрный университет имени П. А. Столыпина»

Задорожний Роман Николаевич

кандидат технических наук, ведущий научный
сотрудник – руководитель ЦКП «Нано-центр»
ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный
центр ВИМ»

Ведущая организация

ФГБОУ ВО «Рязанский государственный
агротехнологический университет имени
П. А. Костычева»

Защита состоится «19» июня 2025 года в 10:00 на заседании диссертационного совета 35.2.030.03 на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», по адресу: 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 19, тел: 8 (499) 976-17-14.

Юридический адрес для отправки почтовой корреспонденции (отзывов): 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке имени Н. И. Железнова ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» и на сайте Университета www.timacad.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Н.Н. Пуляев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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. 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. Естественно, 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.

Масштабность исследования 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. Большой вклад в развитие теории и практики технического обслуживания и ремонта сельскохозяйственных машин, повышения их надежности внесли такие ученые, как А.А. Аникин, А.Н. Батищев, В.Н. Бугаев, Е.Л. Воловик, В.А. Деев, О.Н. Дидманидзе, М.Н. Ерохин, С.П. Казанцев, Ю.А. Конкин, В.Е. Кряжков, В.В. Курчаткин, С.С. Некрасов, А.В. Поляченко, Г.К. Потапов, Е.А. Пучин, М.Ф. Сагач, А.И. Сидоров, В.Я. Сквородин, Н.Ф. Тельнов, В.И. Цыпцин, С.С. Черепанов, В.И. Черноиванов, М.А. Халфин и др. ученые. В разработку методик расчета отклонений размеров деталей и соединений сельхозмашин большой вклад внесли В.М. Белов, Ф.Х. Бурумкулов, И.Г. Голубев, З.С. Дагис, М.Н. Ерохин, А.И. Иванов, П.А. Карепин, А.А. Куликов, В.В. Карпузов, П.П. Лезин, П.П. Лельчук, О.А. Леонов, В.П. Лялякин, В.М. Михлин, А.Г. Степанов, Л.К. Чеплан и др. ученые. Но вопросы применения методов взаимозаменяемости при восстановлении поверхности вала соединения «вал – уплотнение» решены еще не полностью.

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. Основные положения и результаты исследований осуждены и одобрены на:

национальной научно-практической конференции с международным участием, посвященной 80-летию Ульяновского государственного аграрного университета имени П.А. Столыпина (г. Ульяновск, УлГАУ, 2022 г.);

научно-практической конференции «Чтения академика В.Н. Болтинского» (г. Москва, РГАУ-МСХА, 2023 г.);

IV Всероссийской научно-технической конференции с международным участием (г. Тула, ТулГУ, 2023 г.);

Международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 180-летию со дня рождения К.А. Тимирязева (г. Москва, РГАУ-МСХА, 2023 г.);

Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых (г. Москва, РГАУ-МСХА, 2023 г.);

научно-практической конференции «Чтения академика В.Н. Болтинского» (г. Москва, РГАУ-МСХА, 2024 г.).

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 наименований и приложением на 1 странице. Объём диссертации – 142 страницы, поясняется 37 таблицами и 27 рисунками.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформирована цель и задачи исследований, изложена научная новизна и практическая значимость работы, а также основные положения диссертации, выносимые на защиту.

В первой главе «Состояние вопроса, цели и задачи исследования» проведен анализ инструментов цифрового моделирования применяемых на ремонтных производствах. Рассмотрено моделирование бизнес процессов различного уровня с применением нотаций IDEF0, BPMN. Определены, цели и задачи размерного анализа, виды размерных цепей. Необходимость составления и расчета размерных цепей обусловлена сложностью нормирования точности отдельных сборочных единиц и соединений, а также тем, что их функциональные параметры можно определить только после сборки с помощью методов расчета размерных цепей.

Анализ влияния погрешности измерений на качество комплектации и сборки показал, что отклонения от соосности оказывают значительное влияние на эксплуатационные показатели двигателя, и приводят к появлению дополнительных статических и динамических нагрузок, ускоряющих износ и усталостные разрушения.

В результате анализа факторов, влияющих на надёжность соединений «вал-уплотнение» составлена классификация уплотнительных устройств и резиновых армированных манжет, применяемых в сельском хозяйстве. Определены показатели данных манжет, и определены предельные значения показателей для различных групп резины и диаметров резиновых армированных манжет. Наиболее частыми отказами, возникающими у уплотнительных соединений выявлены отказы, вызванные механическим износом деталей и внутренним износом резины.

Во второй главе «Теоретические основы обеспечения качества сборки соединений при ремонте машин методами цифровизации и размерного анализа» в ходе анализа процесса комплектации и сборки при ремонте КПП разработаны цифровые модели процесса комплектации и сборки КПП в нотациях IDEF0 и BPMN (Рисунки 1 и 2).

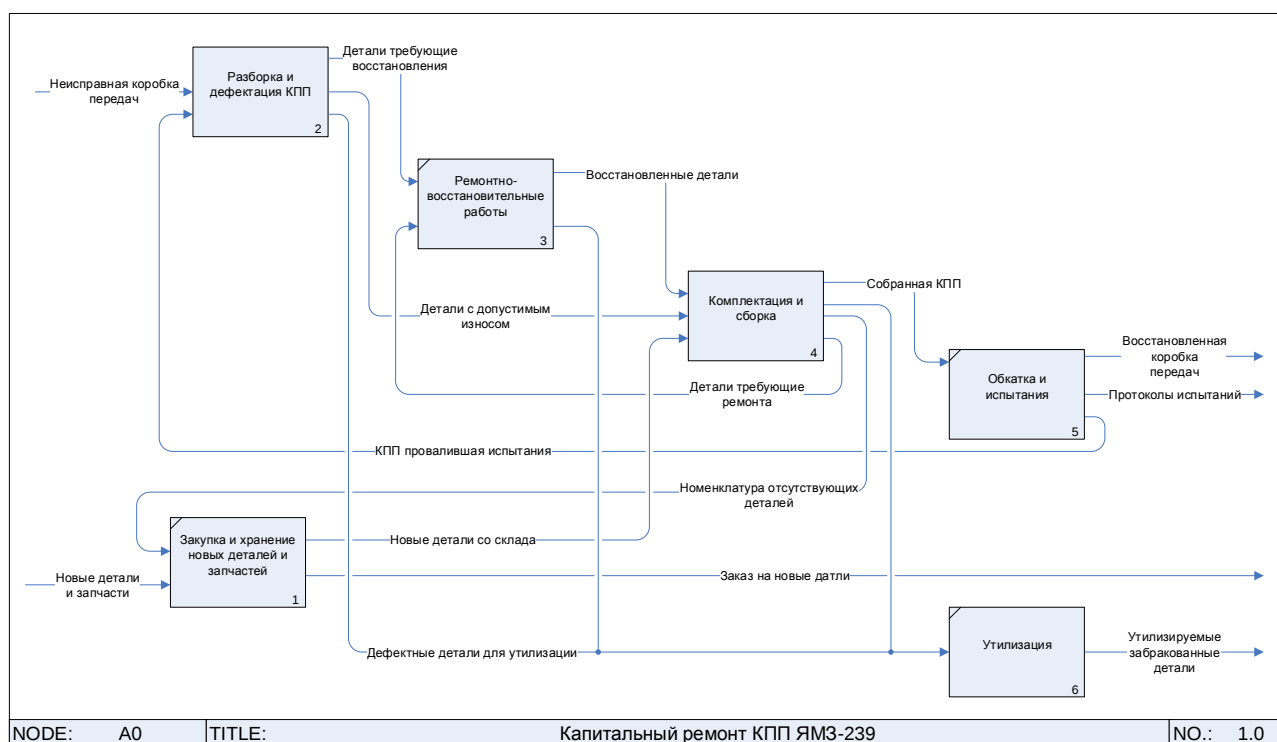


Рисунок 1 –Цифровая модель процесса ремонта КПП в нотации IDEF0

Построенные модели могут использоваться для имитационного моделирования процессов, для чего необходимо наличие данных относящихся к ресурсам производства, таких как: стоимость деталей и комплектующих используемых при сборке, временные затраты на проведение операции процесса, количество применяемых вспомогательных материалов, заработная плата рабочих и другие количественные характеристики, связанные с ресурсной базой, а также статистических характеристик процесса связанных с

распределением вероятностей переменных процесса, например: оценки распределения случайных событий, законов распределения случайных величин, доверительных вероятностей случайных событий.

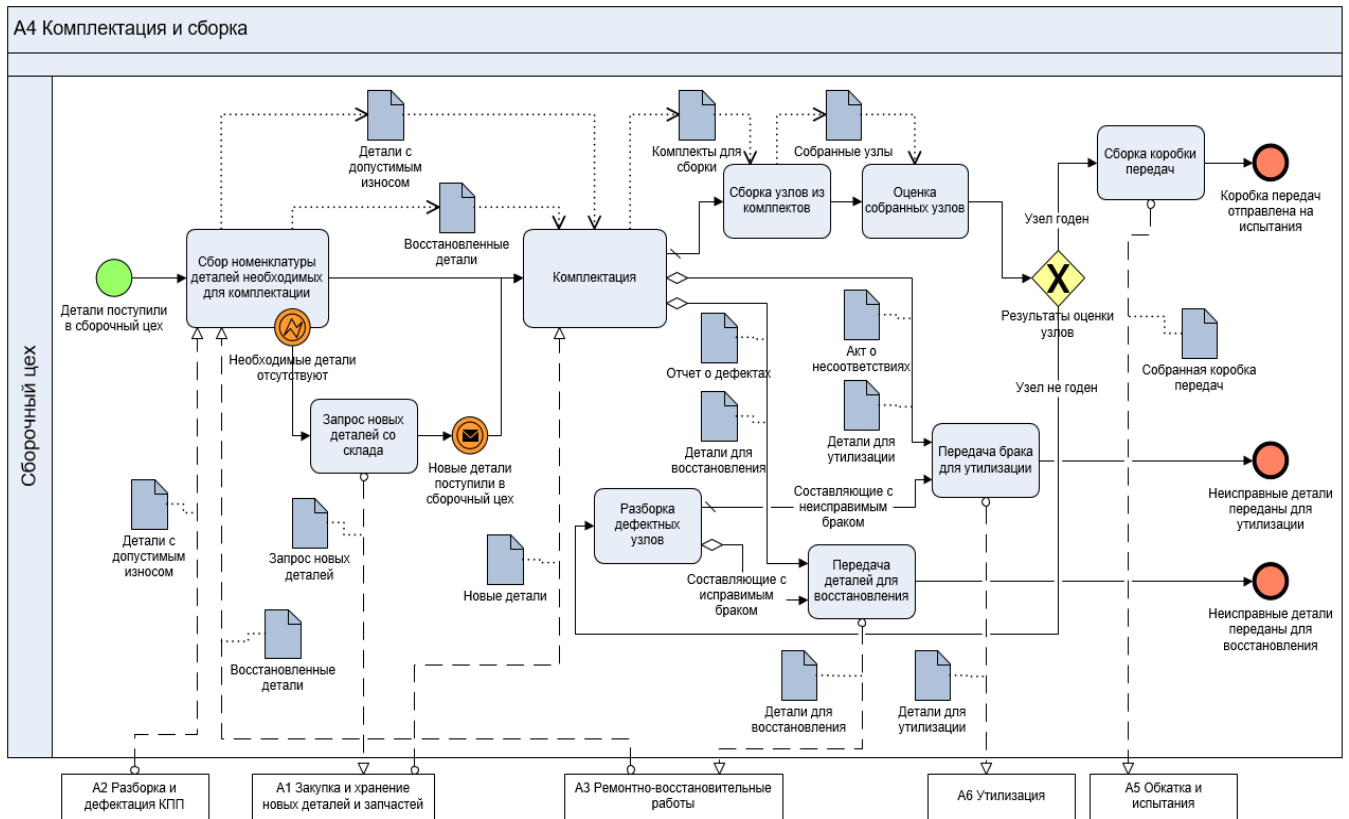


Рисунок 2 – Цифровая модель процесса комплектации и сборки КПП в нотации BPMN

Реализация имитационной модели на ремонтном предприятии открывает возможности для управления порядком сборочных циклов, основываясь на состоянии предприятия и потребностях заказчика.

С целью обеспечения качества сборки соединений валов с манжетами усовершенствована методика расчета суммарного отклонения от соосности Δ_c , в которой предложено разделить звенья на две категории – статические отклонения от соосности и динамические – в виде радиального биения, так как в стандарте на резиновые армированные манжеты нормируются два параметра – отклонение от соосности и радиальное биение вала относительно манжеты. Соблюдение этих параметров важно для обеспечения долговечности работы соединения.

Суммарное радиальное биение $T_{\Sigma rv}$, как геометрическую сумму векторных звеньев в виде динамической составляющей, можно рассчитать по формуле:

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

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

Суммарное статические отклонения от соосности $T_{\Sigma c}$, включает в себя две составляющие в виде суммарного допуска звеньев размерной цепи в виде зазора $T_{\Sigma cs}$ и суммарного допуска векторных звеньев размерной цепи $T_{\Sigma cv}$ и вычисляется по формуле:

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

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)

Статические векторные звенья – это звенья, смещающие ось вала относительно манжеты в виде отклонения от соосности без динамического эффекта, их суммарный допуск $T_{\Sigma cv}$ вычисляется как:

$$T_{\Sigma cv} = \frac{0,75}{\lambda_{\Delta cv}} \sqrt{\sum_{i=1}^n k_{cvi}^2 T_{cvi}^2}, \quad (3)$$

Звенья в виде зазоров образуются посадками и имеют свою методику расчета показателей точности и коэффициенты, поэтому их следует рассчитывать отдельно. Суммарный допуск звеньев в виде зазора $T_{\Sigma cs}$ рассчитывается по формуле:

$$T_{\Sigma cs} = \frac{1}{\lambda_{\Sigma cs}} \sqrt{\sum_{i=1}^m k_{csi}^2 \lambda_{csi}^2 T_{cs}^2}, \quad (4)$$

где m – число i -х звеньев в виде зазора; T_{cs} – допуск звена размерной цепи в виде зазора i -х звеньев; k – передаточное отношение.

Допуск звена размерной цепи в виде зазора T_{cs} определяется как:

$$T_{cs} = 2S + T_s, \quad (5)$$

где S – средний зазор; T_s – допуск посадки с зазором.

В свою очередь для расчета среднего зазора S и допуска посадки T_s используются формулы:

$$S = 0,5((EC - ec) + (\alpha_D \cdot T_D - \alpha_d \cdot T_d) - \alpha_s \cdot T_s), \quad (6)$$

$$T_s = \frac{0,5}{\lambda_s} \sqrt{\lambda_D^2 T_D^2 + \lambda_d^2 T_d^2}, \quad (7)$$

где T_D и T_d – допуски отверстия и вала, образующих соединения с зазором; EC и ec – средние отклонения диаметров отверстия и вала; α_D , α_d , α_s – коэффициенты относительной асимметрии рассеяния размеров вала и зазоров в посадке; λ_D , λ_d , λ_s – коэффициенты относительного рассеяния соответствующих размеров.

Один из способов обеспечения качества сборки является применение компенсаторов. Методы размерного анализа позволяют определить

необходимые размеры и количество компенсаторов. Компенсатор необходимо включать в размерную цепь тех случаях, когда расчетное значение допуска конечного размера превосходит номинальное. В таком случае наибольший размер компенсатора Y_{max} рассчитывается по формуле:

$$Y_{kmax} = Y_k + em_k + \frac{0,5T_k}{|k_k|}, \quad (8)$$

где Y_k – номинальный размер компенсатора; em_k – среднее отклонение для компенсатора; T_k – допуск компенсатора; k_k – коэффициент приведения компенсатора.

Чтобы компенсатор мог обеспечить необходимую точность замыкающего звена, необходимо чтобы его значение среднего отклонения соответствовало разности между номинальным и расчетным значениями средний отклонений замыкающего звена, с учетом коэффициента приведения:

$$em_k = \frac{em_{\Sigma} - em_{\Sigma}^{'}}{k_k}, \quad (9)$$

где em_{Σ} – номинальное значение среднего отклонения замыкающего звена; $em_{\Sigma}^{'}$ – расчетное значение среднего отклонения замыкающего звена.

Расчетное значение среднего отклонения замыкающего звена $em_{\Sigma}^{'}$ рассчитывается с учетом точностных характеристик всех звеньев расчетной цепи по формуле:

$$em_{\Sigma}^{'} = \sum_{i=1}^n (k_i(em_i + \alpha_i T_i)) - \alpha_{\Sigma} T_{\Sigma}, \quad (10)$$

где α_{Σ} и T_{Σ} – соответственно коэффициент относительной асимметрии рассеяния размеров и допуск замыкающего звена; k_i , em_i , α_i и T_i – соответственно коэффициент приведения, среднее отклонение, коэффициент относительной асимметрии рассеяния размеров и допуск составляющих звеньев цепи.

Для условий набора одинаковых компенсаторов – прокладок, толщина одной прокладки – h , определяют в соответствии с неравенством (11), количество прокладок – m , в соответствии с неравенством (12):

$$h \leq \frac{T}{|k_k|}, \quad (11)$$

$$m \geq \frac{Y_{kmax}}{h}. \quad (12)$$

Для условий набора прокладок разной толщины, сначала рассчитывается толщину самой тонкой прокладки – h_1 . Толщина самой толстой прокладки – h_m , определяется по неравенству (13). Толщина остальных прокладок рассчитывается по прогрессии (14), так чтобы, их сумма была приблизительно равна Y_{kmax} .

$$h_m \geq 0,5Y_{kmax}, \quad (13)$$

$$h_n \approx 2h_{n-1}. \quad (14)$$

В третьей главе «Методика экспериментальных исследований» приведено описание объектов и методы их исследований. В качестве объекта исследования выбрано соединение выходного вала (в виде фланца) с манжетой 1.2–100×125–12 коробки передач двигателя ЯМЗ-239.

Параметры точности фланцев и манжет 1.2–100×125–12 выходного вала (фланца) коробки передач ЯМЗ-239 представлены в Таблице 1.

Таблица 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 ^{-2,0} _{-3,0}	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. 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.

Для измерения диаметров концов валов выбрана скоба рычажная СРП 100-0,001, её метрологические характеристики представлены в Таблице 2.

Таблица 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	±0,07	75-100	0,001	±0,0014

На основании разработанной методики составления и расчета размерной цепи для соединения «вал – уплотнение» составлен алгоритм расчета допуска звена размерной цепи в виде зазора (Рисунок 3).

На базе разработанной методики и представленного алгоритма на языке программирования Python разработаны компьютерные программы расчета допуска звена размерной цепи в виде зазора. Пользовательский интерфейс компьютерных программ представлен на Рисунке 4.

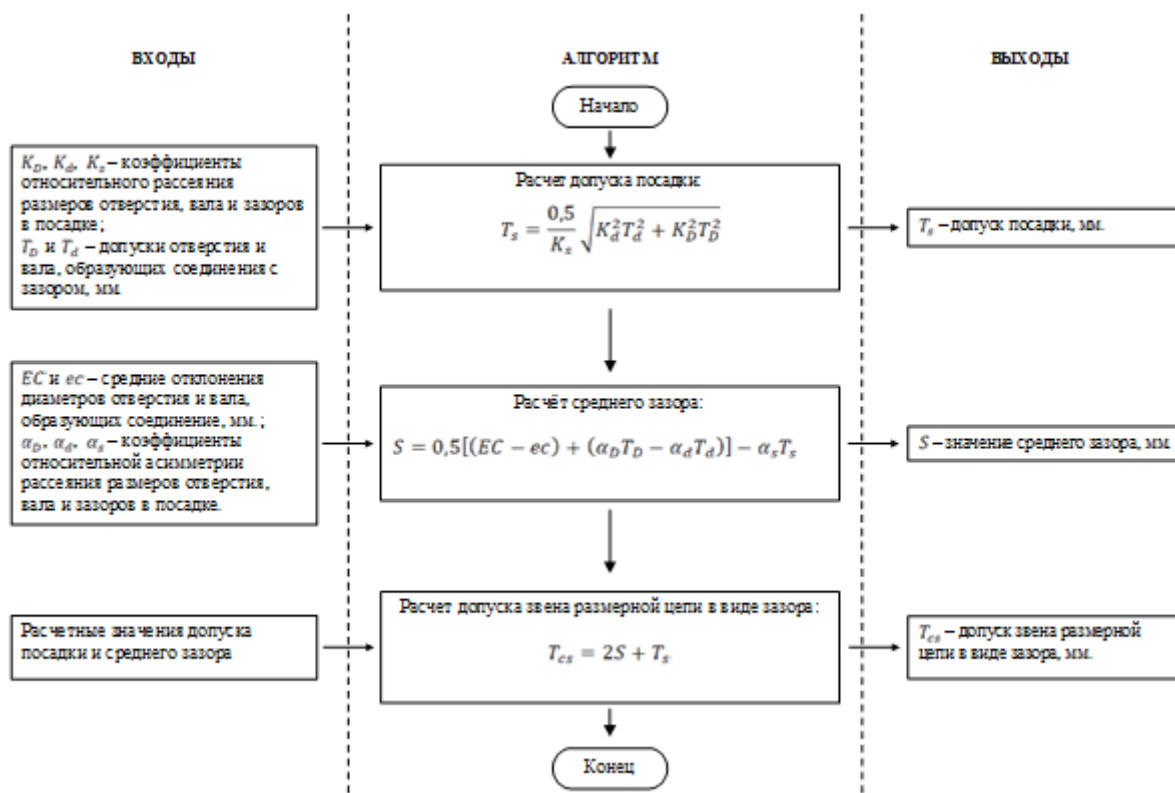


Рисунок 3 – Алгоритм расчета допуска звена размерной цепи в виде зазора

The screenshot shows a window titled "Расчет допуска звена размерной цепи в виде зазора". It contains several input fields for the following parameters:

- Введите TD (допуск отверстия, мкм):
- Введите Td (допуск вала, мкм):
- Введите EC (среднее отклонение размеров отверстия, мкм):
- Введите ec (среднее отклонение размеров вала, мкм):
- Введите α_D (коэффициент относительной асимметрии рассеяния размеров отверстия):
- Введите α_d (коэффициент относительной асимметрии рассеяния размеров вала):
- Введите α_s (коэффициент относительной асимметрии рассеяния зазоров в посадке):

At the bottom, there is a button labeled "Рассчитать".

Рисунок 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.

В четвертой главе «Результаты исследований и их анализ» проведена апробация результатов теоретических исследований обеспечения качества сборки методами размерного анализа.

Анализ рассеяния натягов в соединении манжет с валами выходного конца фланца КПП ЯМЗ-239 (Рисунок 5) 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.

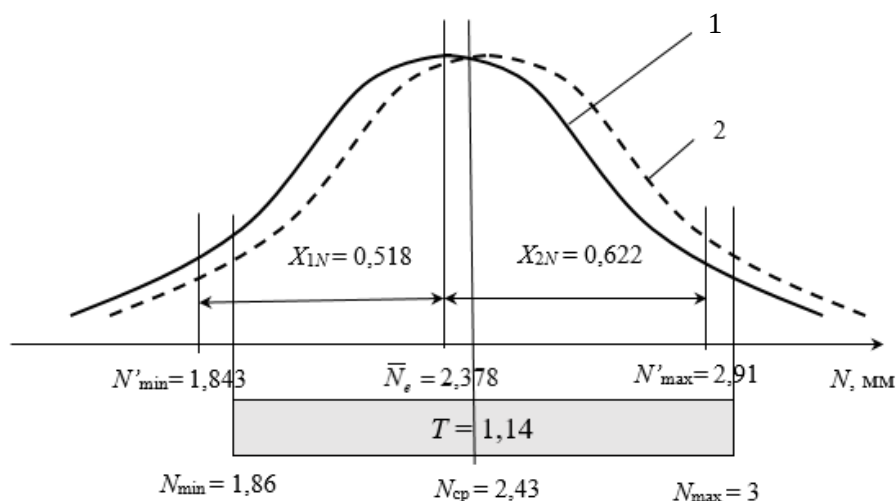


Рисунок 5 – Схема к расчету брака при сборке соединения «манжета-вал»:

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

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.

С целью решения проблем, возникающих из-за утечек смазочного материала из уплотнений, составлена и решена размерная цепь для исследуемого соединения с использованием методики, разработанной во второй главе. Размерная цепь соединения выходного конца фланца КПП ЯМЗ с манжетой составлена из девяти звеньев (Рисунок 6).

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. На основе формул представленных во втором разделе проведены расчеты допусков звеньев в виде зазоров. Результаты расчета представлены в Таблице 3.

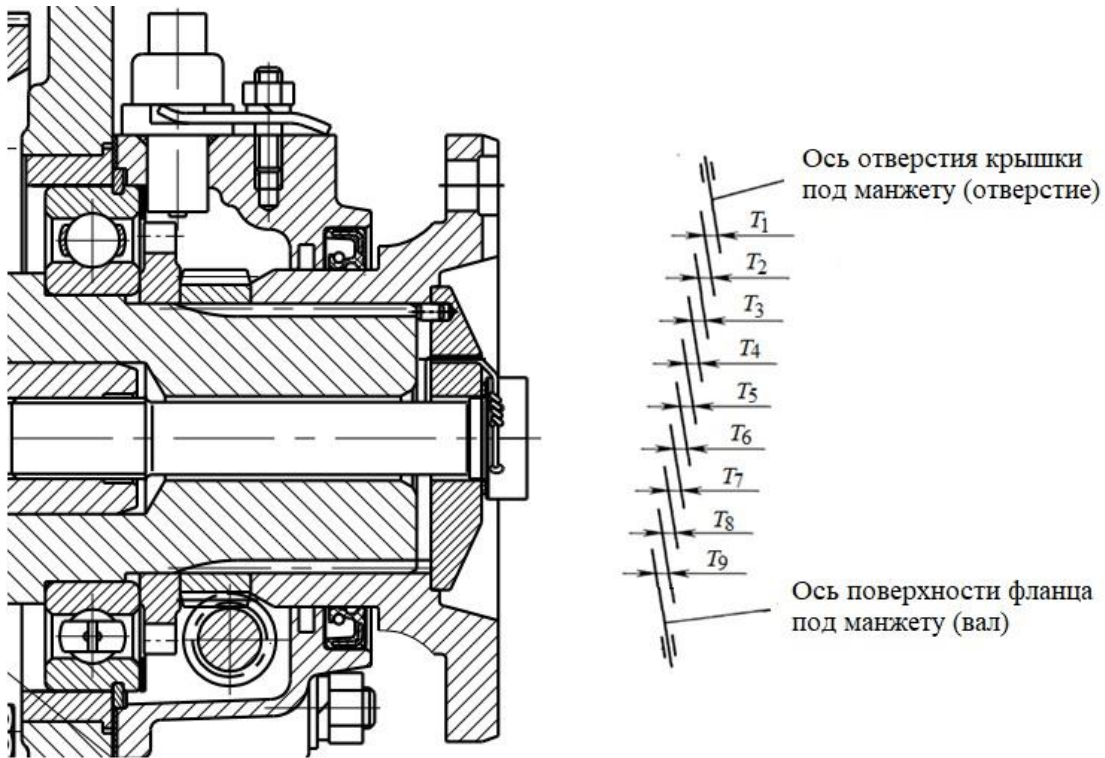


Рисунок 6 – Размерная цепь выходного конца вала (фланца) КПП ЯМЗ-239:

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

Таблица 3 – 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	

На основе данных нормативной и конструкторской документации, а также в результате проведенных измерений выявлены характеристики остальных звеньев полученной размерной цепи. Они представлены в Таблице 4.

Таблица 4 – 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

Результаты расчета параметров размерной цепи выходного конца вала КПП ЯМЗ-239 относительно манжеты представлены в Таблице 5.

Таблица 5 – 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

Из таблицы 5 видно, что суммарное радиальное биение составляет 0,0546 мм, а суммарное отклонение от соосности составляет 0,0624 мм, что не превышает допустимые предельные величины по ГОСТ 8752-79 и ГОСТ 8752-79, запас прочности в таком случае составит: по радиальному биению 2,75 мм; по отклонению от соосности 2,4 мм. Однако в результате действия радиального биения в виде 0,055 мм радиальный зазор в подшипнике будет увеличиваться быстрее и 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.

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.

Разработанная методика расчета размеров и числа компенсаторов была апробирована на примере расчета соединения валов редукторов картофелеуборочного комбайна КПК-2-01.

Размерная цепь соединения валов редукторов Н.094.44.000-323 и Н.090.20.000-121 с помощью цепной муфты представлена на Рисунке 7.

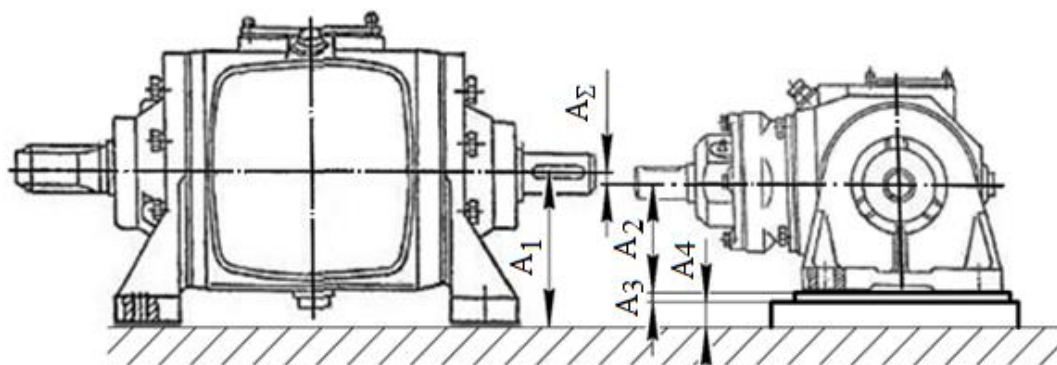


Рисунок 7 – Размерная цепь:

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

Характеристики звеньев, установленных в результате анализа нормативной и конструкторской документации, представлены в Таблице 6.

Исходя из допустимых отклонений рассеяний от оси вращения вала до опорной поверхности редукторов $A_1 = 150_{-0,5}$ мм и $A_2 = 100_{-0,5}$ видно, что значения допусков этих размеров значительно превосходят допуск замыкающего звена $A_\Sigma = 0 \pm 0,25$ мм, что обуславливает необходимость применения метода компенсации. Результаты расчета параметров компенсатора по методики, приведенной во втором раздел представлены в Таблице 7.

Таблица 6 – Характеристики звеньев размерной цепи редукторов Н.094.44.000-323 и Н.090.20.000-121

Параметр	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

Таблица 7 – Результаты расчетов параметров размерной цепи редукторов Н.094.44.000-323 и Н.090.20.000-121

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 $Y_{K\max}$, 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 $A_3^{\min}$	$2,42^{+0,5}$

Как видно из Таблицы 7 в качестве компенсатора возможно использовать: набора из четырех прокладки толщиной 0,8 мм или набор разных прокладок, то из трёх прокладок толщиной: 0,45 мм, 0,91 мм, 1,82 мм.

В диссертации решены также вопросы, связанные с повышением долговечности соединений манжет с валами путем использования метода неполной взаимозаменяемости, что приемлемо именно для мелкосерийного ремонтного производства.

Для увеличения среднего натяга в соединении вала с манжетой использовался метод селективной сборки по двум группам. В Таблице 8 представлены параметры точности фланцев и манжет 1.2–100×125–12 выходного вала коробки передач ЯМЗ-239, на котором был апробирован данный метод.

Таблица 8 – 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	*

Для разбиения манжет на две группы, определена граница, соответствующая середине поля допуска и определяющаяся через среднее

отклонение ES . В результате расчетов составлена комплектующая таблица для соединения валов с манжетами (Таблица 9).

Таблица 9 – Комплектующая 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 9, 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.

При этом диапазон натягов будет составлять от 2,36 мм до 3,0 мм в обоих случаях, что позволит повысить ресурс соединения выходного вала коробки передач ЯМЗ-239 с манжетой на 2400 мото-часов.

В пятой главе «Технико-экономическая оценка результатов исследований» определен экономический эффект от применения цифровых средств измерений при контроле фланца КПП и от внедрения технологического процесса восстановления валов установкой ремонтной втулки для коробки передач силовых агрегатов ЯМЗ.

При выборе цифровых средств измерений для контроля размеров фланца КПП после восстановления необходимо контролировать не только диаметр фланца, а еще отклонение формы, в виде отклонения от цилиндричности, в частном случае, проявляемая как овальность или огранка. Допускаемая погрешность средства измерений для контроля отклонения формы определяется по формуле:

$$\pm \Delta_{\text{lim}} \leq \frac{2\varepsilon}{k\sqrt{2}} \quad (15)$$

Исходя из условий для измерений подходили два средства измерений: скоба рычажная цифровая (СРЦ-125-0,001) и штангенциркуль цифровой (ШЦЦ-125-0,01). Результаты анализа годового экономического эффекта от применения каждого из них приведены в Таблице 10.

Несмотря на то, что СРЦ-125-0,001 дороже 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.

Таблица 10 – Исходные данные и результаты расчетов годовой экономической 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	

При оценке экономического эффекта от внедрения технологического процесса восстановления валов установкой ремонтной втулки, проведено сравнение рассчитанной себестоимости процесса восстановления поверхности под манжету (Таблица 11) со стоимостью нового фланца.

Таблица 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, при цене нового фланца 7 тыс. р., и затрат 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.

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 -0,5мм 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...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 (15).

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. Исследование параметров рассеяния натягов в соединении выходного конца вала КПП ЯМЗ с манжетой / О. А. Леонов, Н. Ж. Шкаруба, Ю. Г. Вергазова, **Л.А. Гринченко** // Агроинженерия. – 2025. – Т. 27, № 2. – С. 70-76.

5. Анализ точности обработки поверхностей соединения фланца с манжетой коробки передач ЯМЗ / **Л.А. Гринченко** // Сельский механизатор. – 2025. – № 3. – С. 36-37. – DOI 10.47336/0131-7393-2025-3-36-37.

6. Расчет суммарного отклонения от соосности выходного вала коробки передач относительно уплотнения / О. А. Леонов, Н. Ж. Шкаруба, Ю. Г. Вергазова, **Л.А. Гринченко** // Вестник машиностроения. – 2025. – Т. 104, № 4. – С. 269-274. – DOI 10.36652/0042-4633-2025-104-4-269-274.

Публикации в изданиях, индексируемых в международных цитатно-аналитических базах данных

1. 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.

Публикации в других научных изданиях

1. 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.

2. 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.

3. Показатели качества резиновой армированной манжеты валами / **Л.А. Гринченко** // Сборник статей конференции. – Москва: РГАУ - МСХА им. К.А. Тимирязева, 2023. – С. 167-171.

4. Контроль соосности валов редукторов картофелеуборочного комбайна КПК-2-01 методом компенсации / **Л.А. Гринченко** // Чтения академика В. Н. Болтинского : Сборник статей конференции 23–24 октября 2024 года. – Москва: ООО «Сам Полиграфист», 2024. – С. 139-144.

5. 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.

Авторские свидетельства, патенты, лицензии

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024619708 Российская Федерация. «Расчет ремонтного размера вала под резиновую армированную манжету» : № 2024618294 : заявл. 16.04.2024 : опубл. 25.04.2024 / Г. А. Нестеркин, **Л. А. Гринченко**, О. А. Леонов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева».