

На правах рукописи

ГОЛИНИЦКИЙ ПАВЕЛ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ

ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ОПОР СКОЛЬЖЕНИЯ СОЧЕТАНИЕМ
ТОЧНОСТНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ
ДЕТАЛЕЙ СОЕДИНЕНИЯ

Специальность 4.3.1. Технологии, машины и оборудование
для агропромышленного комплекса

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена на кафедре метрологии, стандартизации и управления качеством Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева».

- Научный консультант:** **Леонов Олег Альбертович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой метрологии, стандартизации и управления качеством ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева».
- Официальные оппоненты:** **Ерофеев Михаил Николаевич**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории цифровых методов управления жизненным циклом изделий машиностроения, отдел «Трение, износ, смазка. Трибология», ИМАШ РАН
Величко Сергей Анатольевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технического сервиса машин ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва»
Тимашов Евгений Петрович, доктор технических наук, доцент, доцент инженерного факультета ФГБОУ ВО «Белгородский ГАУ».
- Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева»

Защита состоится «18» июня 2026 г. в 10 часов 00 минут 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./факс: +7 (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 «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 35.2.030.03,
кандидат технических наук, доцент

Николай Николаевич Пуляев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Машиностроение и ремонтное производство являются ключевыми отраслями, от которых зависят и другие сектора экономики, в том числе и аграрный. В Российской Федерации по итогам на 10 июля 2025 г. наблюдается разнонаправленная динамика по темпам обновления парка сельскохозяйственной техники по сравнению с предыдущим годом, так тракторов зарегистрировано 387,4 тыс. ед. что на 4,1 тыс. ед. больше, зерноуборочных комбайнов 135,5 тыс. ед. (на 2,1 тыс. ед. больше), кормоуборочных комбайнов 12,3 тыс. (на 103 ед. меньше). Доля техники старше 10 лет по тракторам снизилась до 55,13% (в 2023 году - 56,02%), по зерноуборочным комбайнам - до 44,77% (в 2023 году - 45,62%), по кормоуборочным комбайнам - до 43,23% (в 2023 году - 44,73%).

Несмотря на в целом положительную динамику на темп обновления техники, по-прежнему сказывается уход иностранных производителей сельскохозяйственного машиностроения и запасных частей. Данные факторы повышают важность как собственного производства техники, так и поддержания её в рабочем состоянии.

Основным элементом сельскохозяйственной техники является двигатель внутреннего сгорания, от которого зависит её производительность. Одним из крупнейших российских производителей дизельных двигателей и комплектующих является Ярославский моторный завод, имеющий в своей продуктовой линейке как рядные, так и V-образные двигатели разной мощности. Отличительной особенностью данных двигателей является их ремонтпригодность, позволяющая обеспечить длительный срок службы при соблюдении требований завода-изготовителя. Развитие техники и применение технологий «Индустрии 4.0» дает возможности ремонтным предприятиям приблизиться к параметрам новых деталей, но не предлагает технологически готовых решений, позволяющих заложить основу к переходу «Индустрии 5.0».

Данная работа посвящена совершенствованию точностных и технологических методов восстановления деталей, образующих соединение, включая использование элементов цифровой среды, с целью рационального повышения долговечности соединений в условиях мелкосерийного ремонтного производства.

Степень разработанности поставленных проблем.

Наибольший вклад в развитие теории точности машин в прошлом веке внесли В.П. Булатов, И.Г. Фридендер, А.П. Баталов и др. из Санкт-Петербургского института проблем машиноведения РАН. Существенный вклад в теорию и практику взаимозаменяемости деталей машин в 1970...1980-х годах внесли профессора: А.И. Якушев, И.В. Дунин-Барковский и А.И. Иванов. Несмотря на повышение точности современного металлорежущего оборудования в настоящее время не наблюдается активных научных исследований в области точности, отвечающих современным требованиям машиностроительных предприятий.

В настоящее время имеется достаточно большое количество исследований, в которых рассмотрены различные процессы восстановления изношенных поверхностей деталей. В работах ведущих ученых, занимающихся технологиями восстановления машин - Ачкасова К.А., Батищева А.Н., Воловика Е.Л., Ерохина М.Н., Згирского И.И., Литовченко Н.Н., Луневского И.Н., Лялякина В.П., Орлова Б.Н., Поляченко А.В., Потапова Т.К., Пучина Е.А., Семенова Е.И., Степанова В.А., Стрельникова В.В., Таратуты А.И., Тельнова Н.Ф., Черновола М.И., Черноиванова В.И., Шнырева А.П. и др. – в их исследованиях представлены основные теоретические и практические разработки, применение которых в ремонтном производстве сокращает затраты на производимый ремонт, а также снижает объёмы использования новых запасных частей в результате повышения износостойкости деталей.

Вопрос повышения долговечности объединением точностных и технологических методов в условиях современного производства изучен недостаточно, отсутствует единый подход к формированию цифровой среды на машиностроительных предприятиях ремонтного профиля, а также оценка её влияния на показатели точности соединений.

Цель и задачи исследования. Цель исследования состоит в разработке способов и методов обеспечения норм точности при ремонте во взаимодействии со способами восстановления, позволяющих увеличить ресурс соединения с зазором.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **основные задачи:**

выявить влияние отклонений формы и расположения сопрягаемых деталей на минимальную толщину масляного слоя, обеспечивающего несущую способность, для определения наименьшего зазора в посадке с учетом коэффициента запаса надежности;

разработать теоретическую модель выбора рациональных способов восстановления отверстия и вала, образующих соединение, при заданном ресурсе и вероятности безотказной работы с учетом параметров точности и стоимости, обеспечивающих необходимую параметрическую надёжность, на основании чего определить наиболее целесообразные способы восстановления деталей соединения с зазором;

теоретически обосновать возможность применения рационального способа восстановления бронзовых втулок путем обжата по критерию сохранения геометрической устойчивости втулок, получить математические выражения зависимости геометрических параметров деформирующей матрицы от величины изнашивания внутренней поверхности и требуемого диаметра втулки;

провести практические эксперименты и апробировать технологию восстановления внутренней поверхности бронзовой втулки методом обжата с последующим электроконтактным напеканием наружной поверхности

втулки металлическими порошками, выбрать и рекомендовать производству виды финишной обработки получаемых поверхностей втулки;

выбрать статистические методы оценки качества и провести анализ точности обработки поверхностей валов под втулки;

разработать методику применения комплекса цифровых технологий с целью реализации цифрового подбора валов и отверстий для формирования соединений с требуемым зазором;

оценить влияние цифровых технологий на временные потери, ошибки, связанные с человеческим фактором, трудоёмкость ключевых производственных процессов;

провести сравнительную оценку аналоговых и цифровых средств измерений исходя из числа неправильно принятых и неправильно забракованных деталей;

рассчитать экономическую эффективность предлагаемых решений.

Объект исследования. Параметры подвижных соединений с зазором в сборочных единицах и их влияние на долговечность.

Предмет исследования. Точностные методы и технологические способы восстановления деталей, образующих соединение «вал – втулка», позволяющие увеличить ресурс.

Методы исследований. Для решения поставленных задач использовались моделирование, наблюдение, методы функциональной классификации, сравнительного и структурного анализа, элементы теорий: точности, жидкостного трения, пластического деформирования и спекания металлических порошков. Создание цифровой процессной модели ремонтного предприятия производилось с использованием нотаций: IDEF0, BPMN и EPC. Обработка экспериментальных данных производилась согласно методам теории вероятностей и математической статистики с применением стандартных и специально разработанных алгоритмов.

Достоверность результатов исследования.

В теоретических исследованиях достоверность результатов обеспечена изучением и анализом ранее выполненных работ в области взаимозаменяемости и нормирования точности, применения цифровых инструментов и восстановления деталей.

В экспериментальных исследованиях достоверность результатов расчетов гарантирована применением стандартных методик сбора и обработки данных и использованием современного программного обеспечения.

Научная новизна работы.

Получена математическая зависимость, позволяющая определить величину минимального зазора в подшипнике скольжения по критерию обеспечения наименьшей толщины масляного слоя с учетом микро- и макрогеометрии деталей, образующих соединение.

Разработана теоретическая модель, позволяющая осуществить рациональный выбор способов восстановления двух сопрягаемых деталей,

входящих в соединение с зазором, с учетом параметров надежности, точности и стоимости обработки.

Разработан метод цифрового подбора диаметров валов и втулок, позволяющий достичь гарантированного наименьшего зазора и наибольшего запаса на износ в соединении.

Получены математические выражения по расчету геометрических параметров деформирующей матрицы в зависимости от величины изнашивания внутренней поверхности втулки без потери её геометрической устойчивости.

Разработан комплексный подход к применению цифровых инструментов на ремонтном предприятии, объединённых в единую информационную среду (ЕИС).

Определены задачи и требования к применяемым цифровым инструментам в рамках ЕИС.

Практическая значимость работы.

Разработаны и внедрены технологические решения, позволяющие осуществлять объёмное обжатие втулок с целью формирования внутреннего отверстия под вал ремонтного размера с последующим восстановлением наружной поверхности под номинальный размер методом электроконтактного напекания стальных порошков на бронзовое основание, а также реализована технология обработки внутренних поверхностей втулок заданного размера в пределах $\pm 0,002$ мм.

Разработана и внедрена цифровая маркировка деталей для применения в условиях мелкосерийного ремонтного производства, позволяющая автоматизировать подбор пар трения по критерию обеспечения наибольшего запаса на износ.

Разработаны и внедрены рекомендации по проведению имитационного моделирования процессов ремонтного производства.

Разработаны и апробированы рекомендации по замене аналоговых средств измерений на цифровые.

Разработана и внедрена система принятия решений о необходимости проведения ремонта, ориентированная на достижение наибольшего остаточного ресурса соединения.

Разработаны рекомендации по применению метода цифрового подбора.

Реализация результатов исследования.

Результаты исследований используются в учебном процессе, в частности, в разработанном автором учебнике «Проектирование процессов предприятий АПК», изложены новые подходы к организации ЕИС на ремонтном предприятии. Основные положения работы используются при чтении лекций и проведении практических занятий по дисциплинам «Метрология», «Методы и средства измерений», «Информационные технологии в управлении качеством и защита информации», «Цифровые технологии проектирования бизнес процессов в АПК», «Цифровая поддержка процессов испытаний и контроля качества техники» направлений 35.03.06

«Агроинженерия», 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства», 35.04.06 «Агроинженерия».

Результаты исследований приняты к внедрению на: ФГУП «НАМИ», ООО «Завод Агромаш», ООО «Авангард сервис», ООО «Оптимум авто».

Результаты исследования рекомендованы Министерством сельского хозяйства Российской Федерации организациям, осуществляющим ремонт сельскохозяйственной техники и оборудования для расширения номенклатуры восстанавливаемых деталей.

Положения, выносимые на защиту:

комплексный подход к достижению наибольшей долговечности соединения с зазором, реализуемый путем сочетания точностных и технологических параметров, формируемых при восстановлении посадки двух сопрягаемых деталей;

теория расчета наименьшего зазора в подвижном соединении с учетом отклонений формы и расположения присоединяемых поверхностей;

методика цифрового подбора пар трения для обеспечения наибольшего запаса на износ в условиях ремонтного производства;

модель выбора рационального способа восстановления двух деталей, входящих в соединение, с учетом параметров надежности, точности и стоимости её обеспечения;

технологии и инструменты восстановления бронзовых втулок комбинированным методом, позволяющим сохранить характеристики внутренней и наружной поверхности втулки;

методика применения цифровой модели процессов в условиях мелкосерийного ремонтного производства;

система прослеживаемости деталей вовремя движения по производственному процессу;

система принятия решений при дефектации и контроле валов;

методика оценки влияния замены аналоговых средств измерений на цифровые.

Степень достоверности и апробации результатов.

Основные положения и результаты диссертационного исследования обсуждены и одобрены на научных конференциях Всероссийского и международного уровня. Среди них:

Семинар «Чтения академика В. Н. Болтинского» (г. Москва, 2026 г.); Семинар «Чтения академика В. Н. Болтинского» (г. Москва, 2025 г.); Семинар «Чтения академика В. Н. Болтинского» (г. Москва, 2024 г.); Международная межвузовская научно-техническая конференция студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых «Реинжиниринг и цифровая трансформация эксплуатации транспортно-технологических машин и робототехнических комплексов» (г. Москва, 2023 г.); Международная научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 180-летию со дня рождения К.А. Тимирязева (г. Москва, 2023 г.); Семинар «Чтения академика В. Н. Болтинского» (г. Москва, 2023 г.); IV Всероссийская научно-техническая

конференция с международным участием «Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении» (Тула, 2023 г.); Семинар «Чтения академика В. Н. Болтинского» (г. Москва, 2022 г.); III Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении» (Тула, 2022 г.); Международная научно-практическая конференция «Наука: опыт, проблемы, перспективы развития» (Красноярск, 2021 г.); VIII международная научная конференция «Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности» (Казань, 2021 г.); Международная научная конференция профессорско-преподавательского состава, посвященная 155-летию РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева (Москва, 2020 г.); Международная научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённой 160-летию В.А. Михельсона (Москва, 2020 г.); International scientific conference «Metrological support of innovative technologies - ICMSIT-2020» (Krasnoyarsk, 2020 г.); II Всероссийская научно-техническая конференция «Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении» (Тула, 2020 г.); Международная научная конференция, посвященная 125-летию со дня рождения В.С. Немчинова (Москва, 2019 г.); Международная научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённой 150-летию А.В. Леонтовича (Москва, 2019 г.); Всероссийская научно-техническая конференция «Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении» (Тула, 2019 г.); Национальная научно-практическая конференция «Тенденции инженерно-технологического развития агропромышленного комплекса» (Рязань, 2019 г.); Международная научно-технической конференция, посвящённая 150 -летию факультета «Машиностроительные технологии» и кафедры «Технологии обработки материалов» МГТУ им. Н. Э. Баумана. (Москва 2019 г.)

Публикации.

Основные положения и результаты диссертационного исследования опубликованы в 46 научных трудах общим объемом 43,51 п.л., в том числе, в трех учебно-методических пособиях, в 35 статьях (12 из них – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ для публикации материалов диссертаций), имеется 8 авторских свидетельств, патентов.

Структура и объем диссертационной работы.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы, включающего 176 наименований, в том числе 8 на иностранном языке, и приложения на 15 страницах. Объем диссертации – 264 страниц машинописного текста. Диссертационная работа проиллюстрирована 132 рисунками и поясняется 48 таблицами.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, а также научная новизна и практическая значимость научных результатов.

В первой главе рассмотрены вопросы повышения надёжности сопряжений с зазором, особенности конструкции соединений с толстостенными подшипниковыми втулками, технологии восстановления изношенных тел вращения, и применения цифровых технологий на ремонтных предприятиях.

Повышение долговечности посадок с зазором применением отдельных методов не позволяет достичь значительного результата. В связи с этим возникает необходимость использования комплексного подхода, включающего: параметры деталей, входящих в соединение, точностные методы, возможности оборудования, стабильность технологических процессов, способы восстановления. Для реализации данного подхода также требуется применение единой информационной среды (рис. 1).

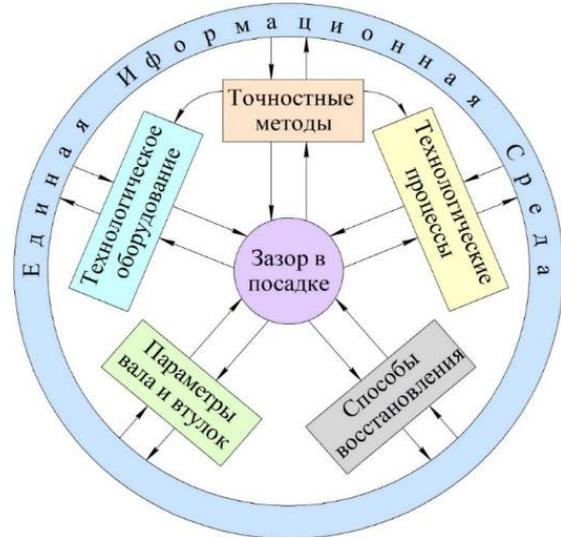


Рисунок 1 – Комплексный подход к достижению наибольшей долговечности соединения с зазором

Исходя этого, зазор в посадке, а следовательно, и запас на износ будет описываться функцией:

$$S = f(x_m, x_t, x_s, x_p, x_o), \quad (1)$$

где: x_m – возможности точностного метода; x_t – точность и стабильность технологического процесса; x_s – точность способа восстановления; x_p – изменение параметров вала и втулок в процессе восстановления; x_o – точность технологического оборудования.

В большинстве отечественных сборочных единицах при использовании подшипников скольжения образуется система «корпус – втулка – вал» от параметров каждого элемента которой будет зависеть ресурс механизма в целом. Использование толстостенных втулок позволяет скорректировать параметры корпуса и упростить систему до «втулка – вал». Типовым примером подобной конструкции может служить соединение «втулка – распределительный вал» широко распространённого V - образного дизельного автотракторного двигателя ЯМЗ – 236.

Для восстановления втулок подшипников применяют различные методы, наиболее рациональными являются пластическая деформация и электроконтактное напекание металлических порошков. При восстановлении валов применяют различные методы нанесения материалов на изношенную поверхность с последующей механической обработкой, но наиболее

распространёнными является обработка под ремонтный размер, а при его отсутствии – замена на новый.

Цифровые технологии на ремонтных предприятиях применяются локально, не образуя единой информационной среды (ЕИС). Для формирования ЕИС требуется сбор и хранение информации о технологических процессах в цифровом виде достоверность которых невозможно обеспечить без применения процессного подхода, организации прослеживаемости и эффективности контрольно-измерительных процедуры.

Реализация данных мероприятий повышает эффективность предприятия и позволяет использовать более совершенные технологии, повышающие послеремонтный ресурс соединений.

Во второй главе рассмотрены вопросы, связанные с обеспечением зазора в соединении «распределительный вал – втулка» и теоретические основы по восстановлению рабочих поверхностей бронзовой втулки комбинированным методом.

Надежность жидкостного трения между валом и втулкой определяется толщиной масляного слоя в месте их наибольшего сближения при этом должно соблюдаться следующие условие:

$$h_{min} > h_{кр}, \quad (2)$$

где h_{min} – толщина масляного слоя; $h_{кр}$ – критическая толщина масляного слоя для реальных подшипников, учитывающая влияние технологических факторов.

Оптимальный зазор в соединении «вал – втулка» можно определить, как:

$$S_{opt} = \sqrt{\frac{\mu\omega}{p}} \cdot D \cdot \sqrt{C_{Rz}}, \quad (3)$$

где μ – динамическая вязкость масла; ω – угловая вязкость; p – среднее давление; D – внутренний диаметр втулки; C_{Rz} – коэффициент несущей способности масляного слоя, соответствующий относительному зазору.

Тогда максимальное значение наименьшей толщины масляного слоя можно определить, как:

$$h_{min(opt)} = \frac{S_{opt}}{2} (1 - \chi). \quad (4)$$

Получение значение должно соответствовать условию (1), добавив в которое минимальный зазор (S_{min}), оно примет вид:

$$S_{min} \geq h_{min(opt)} > h_{кр}. \quad (5)$$

Исходя из этого минимальный зазор в соединении «вал – втулка» должен быть не менее максимального значения наименьшей толщины масляного слоя.

Для получения посадок с зазором применяются методы полной и не полной взаимозаменяемости. В крупносерийном сборочном производстве наибольшее распространение получили методы полной взаимозаменяемости и селективная сборка, но наибольшей точностью обладает индивидуальный

подбор, который легко организуется в мелкосерийном и единичном ремонтном производстве.

Основой для метода полной взаимозаменяемости является размерный анализ, позволяющий определить номинальный размер замыкающего звена, который для соединения «распределительный вал – втулка» будет являться зазором, определяемый в общем виде как:

$$A_{\Delta} = S = \sum_{i=1}^{n-1} \xi A_i, \quad (6)$$

где ξ – передаточное отношение, характеризующее влияние отклонений размеров составляющих звеньев на размер замыкающего звена ($\xi = +1$ для увеличивающих звеньев и $\xi = -1$ для уменьшающих звеньев в том случае, когда звенья размерной цепи расположены линейно и параллельно); A_i – размер i -го составляющего звена.

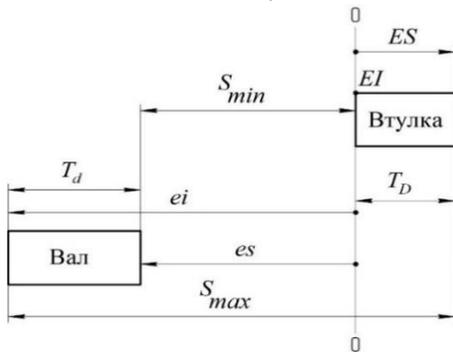


Рисунок 1 – Схема полей допусков соединения при применении полной взаимозаменяемости

Осуществление сборки на основе взаимозаменяемости позволяет при относительной простоте сборки обеспечить необходимую точность соединения.

Схема полей допусков соединения при применении метода полной взаимозаменяемости представлена на рисунке 1.

Для уменьшения зоны рассеивания зазора без повышения требований к оборудованию и технологии обработки применяют селективную сборку допуск замыкающего звена (зазор) при этом будет определяться как:

$$T_{zz} = \frac{1}{k_z} \sqrt{\sum_{i=1}^{i=n-1} \xi_i^2 k_{gi}^2 T_{gi}^2}, \quad (7)$$

где k_z – коэффициент относительного рассеивания распределения для замыкающего звена; ξ_i – передаточное отношение i -го составляющего звена размерной цепи ($\xi_i = +1$ для увеличивающих звеньев и $\xi_i = -1$ для уменьшающих звеньев); k_{gi} – коэффициент относительного рассеивания распределения внутри группы i -го составляющего звена.

При увеличении групп селекции происходит уменьшение группового допуска и зоны рассеивания зазоров, но возрастает риск отсутствия подходящей пары. Исходя из этого для повышения собираемости соединения «распределительный вал – втулка» целесообразно использовать две группы селекции, тогда схема расположения полей допусков примет вид, представленный на рисунке 2.

Сущность метода цифрового подбора заключается в формировании размера компенсирующей детали относительно размера базовой.

В качестве базовой выбирают деталь более сложную в изготовлении для достижения требуемого уровня точности, компенсирующая деталь должна иметь меньшее рассеивание получаемых размеров и большой запас на механичную обработку позволяющий компенсировать отклонения.

На рисунке 3 показан случай, при котором действительная зона рассеивания размеров (ω) отверстия значительно меньше его допуска (T), что позволяет использовать его в качестве компенсирующей детали.

Исходя из этого зона рассеивания размеров отверстия может смещаться в рамках своего допуска тем самым компенсировать отклонение вала и сохранить зазор (S_{min}). Важным этапом данного метода является определение требуемого размера компенсирующей детали относительно действительного размера базовой, который в общем виде для соединения «вал – втулка» определяется как:

$$D_k = (d \pm \Delta_\Sigma) + S_{min}, \quad (8)$$

где: d – диаметр вала; Δ_Σ – суммарная погрешность средства измерения

Выразив из выражения (7) минимальный зазор получим:

$$S_{min} = D_k - (d \pm \Delta_\Sigma), \quad (9)$$

Для данного случая номинальный размер замыкающего звена составит:

$$A_\Delta = S_{min}. \quad (10)$$

Поскольку при изготовлении неизбежно возникают отклонения, а полученный зазор должен быть больше минимального то выражение (10) примет вид:

$$A_\Delta = S_{min} + IT_k, \quad (11)$$

где: IT_k – допуск на изготовления компенсирующей детали.

Учитывая равенство между начальным зазором ($S_{нач}$) и размером замыкающего звена при цифровой сборке объединив выражения (9) и (11), получим:

$$S_{нач} = D_k - (d \pm \Delta_\Sigma) + IT_k. \quad (12)$$

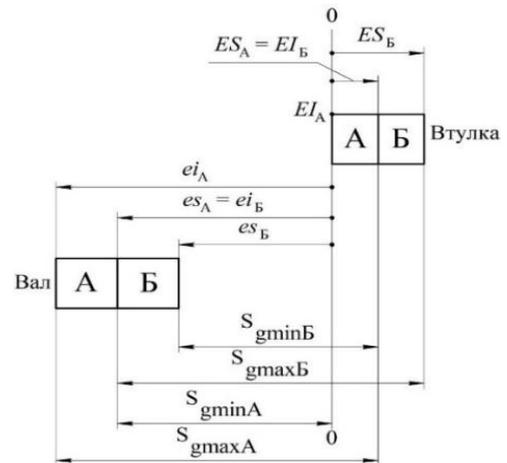


Рисунок 2 – Схема расположения полей допусков при селективной сборке

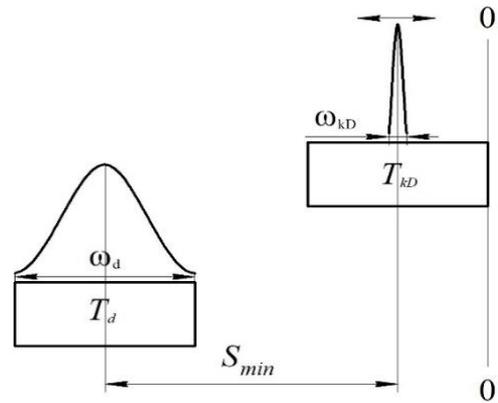


Рисунок 3 – Зоны рассеивания размеров и допуски отверстия и вала

Для многоопорных валов размеру каждой опорной шейки будет соответствовать свой размер втулки.

В соединении «распределительный вал – втулка» двигателя компенсирующей деталью будет являться последняя, поскольку за счет большой толщины стенки она позволяет осуществлять компенсацию в широком диапазоне. Более сложный, с точки зрения достижения требуемой точности, процесс расточки в настоящее время нивелируется за счет современного оборудования, позволяющего производить данную операцию с высокой точностью даже в сложных условиях.

Для выполнения компенсационной функции необходимо изменение допуска на размер втулки относительно метода полной взаимозаменяемости, схема расположения полей допусков представлена на рисунке 4.

На рисунке 5 представлено сравнение моделей формирования параметрического отказа в зависимости от поучаемых при применении точностных методов начального рассеивания зазора. Проведенный анализ моделей показал, что равные значения зон параметрического отказа $F(t)$ достигается при разных значениях наработки T , наибольшее – при цифровом подборе.

Применение метода цифрового подбора, гарантирующего минимальный зазор (S_{min}) не только требует использование цифровых технологий, но и выбрать оптимальный метод восстановления деталей, входящих в соединение.

Для построения модели позволяющей провести выбор оптимального метода восстановления i -го соединения исходя из стоимости и с учетом конструктивных допусков деталей, входящих в него, для вала примем количество способов восстановления – N , для отверстия – M соединений, которые соответственно, характеризуются затратами на восстановление Z_{dvi} и Z_{Dvi} . Сочетанием которых получится MN восстановленных соединений, которые будут иметь свои характеристики процесса старения $U_i(t)$ и $\sigma_{ui}(t)$ (рис.6).

Исходя из этого, наилучшим способом восстановления соединения «распределительный вал – втулка» с точки зрения минимизации затрат при условии обеспечения нормируемого ресурса безотказной работы получается при механической обработке опорных шеек вала под ремонтный размер, а для восстановления втулок наиболее рациональным является комбинированный метод, который включает объемное обжатие для уменьшения внутреннего диаметра с последующим напеканием металлического порошка для компенсации уменьшения наружного размера.

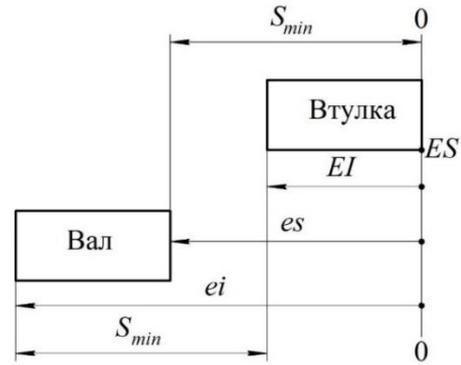


Рисунок 4 – Схема расположения полей допусков при цифровом подборе

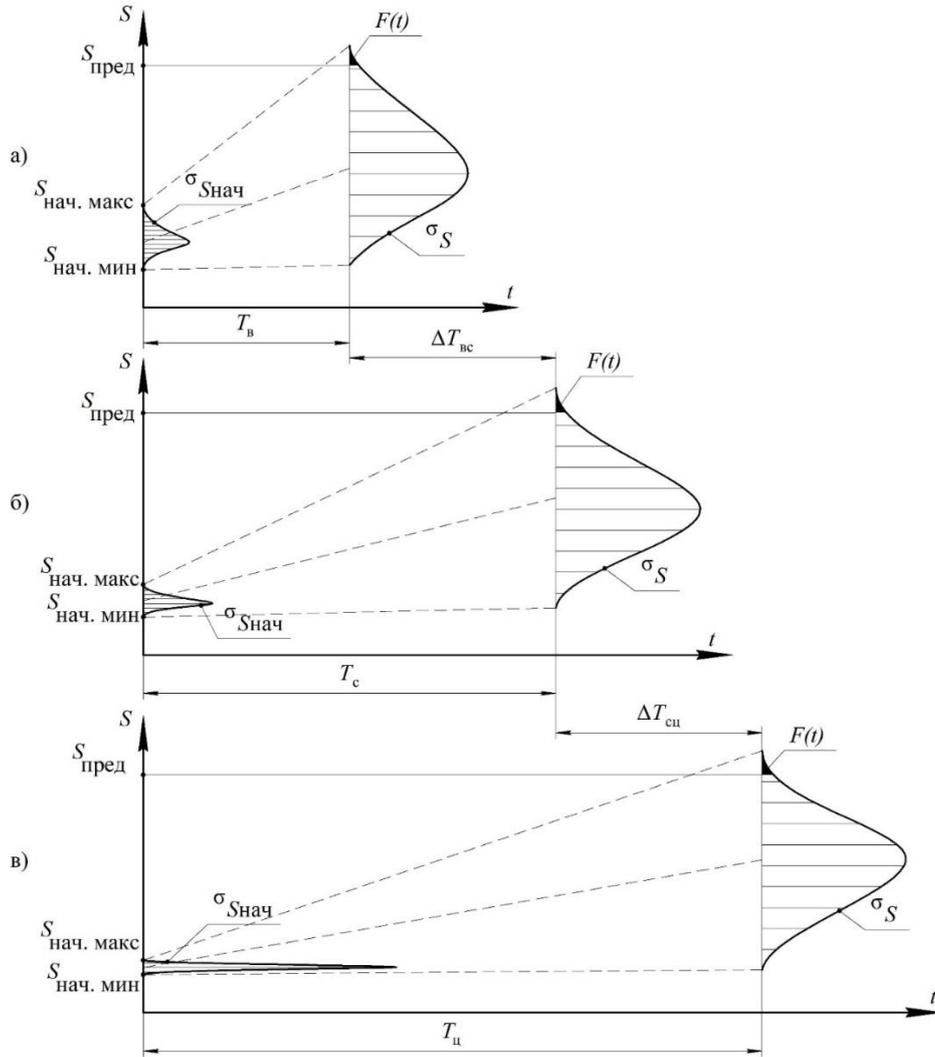


Рисунок 5 – Сравнение моделей формирования параметрического отказа при применении точностных методов: а- полной взаимозаменяемости, б- селективной сборки, в- цифрового подбора

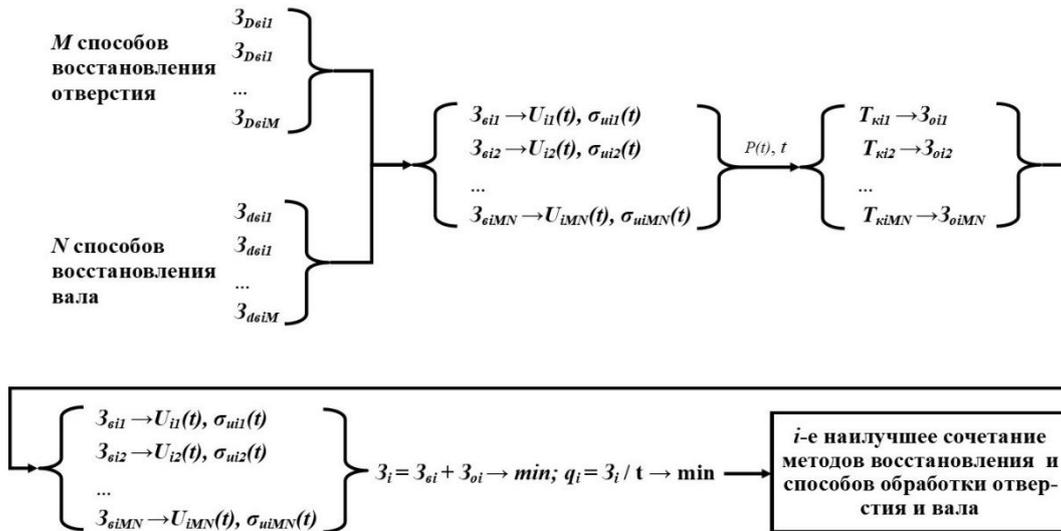


Рисунок 6 – Модель выбора рациональных способов восстановления отверстия и вала, образующих соединения, при заданном ресурсе и P(t)

При выполнении объёмного обжатия втулок из Бр.О5Ц5С5 необходимо предотвратить потерю устойчивости металла. На основе математических моделей (Кочкин В.А., Перлин И.Н., Губкин С.И., Емельяненко П.Т.), описывающих напряжения и деформации при объёмном обжатии полых цилиндрических деталей типа втулок, была принята формула, определяющая условие устойчивости при объёмном обжатии в зависимости от величины деформации Δ и угла конусности α матрицы с учетом разности втулок не более 5%:

$$\Delta = S/D_{\text{нар}} \geq 0,125 \operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \alpha / 2 / 6 \cdot \cos \alpha, \quad (13)$$

где: S – толщина стенки втулки, мм; $D_{\text{нар}}$ – наружный диаметр втулки, мм; α – угол заходной части обжимной матрицы, град.

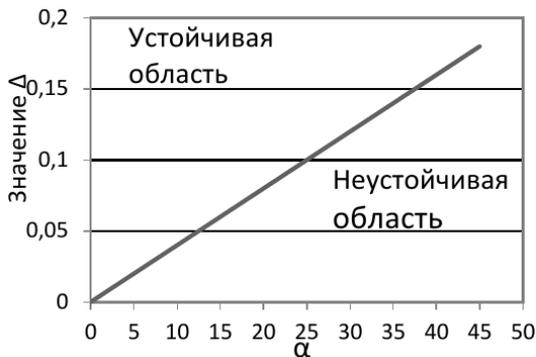


Рисунок 7 – зависимость между величиной α матрицы и Δ

Зависимость между величиной α матрицы и Δ , а также зона потери устойчивости, определенные согласно выражению 12 приведены на рисунке 7.

Поскольку износ внутренней поверхности втулки, согласно ремонтной документации, не превышает 0,4 мм, уменьшение внутреннего диаметра можно определить, как:

$$\Delta d_{\text{расч}} = U + П, \quad (14)$$

где U – величина изнашивания внутренней поверхности бронзовой втулки, мм; $П$ – припуск на механическую обработку для получения чертёжного размера внутреннего диаметра втулки.

Для повышения качества напечённого слоя применялась графитовая оболочка, которая обеспечивает равномерность нагрева и поддержание оптимального температурного диапазона в периоды напекания и охлаждения. Учитывая свойства спрессованного слоя, необходимое тепловое поле в зоне напекания порошка на деталь определяется выражением:

$$Q = \int_0^{\tau} \int_0^t \int_V i^2(\tau) \cdot \rho(V \cdot t) dt \cdot dt \cdot dV, \quad (15)$$

где i – плотность тока; ρ – сопротивление материала в исследуемом объеме (V); τ, t – координаты времени и температуры.

Решение данного выражения через параметр температуры напекания дает следующее выражение:

$$t_1(x, \tau) = \frac{W_1}{\lambda_1 \gamma_1} \theta(\eta, \tau) \left\{ \frac{\delta^2 - x^2}{2a_1} + \frac{k_{\eta} k_{\xi} \delta l_3}{\sqrt{a_1 a_2}} \cdot \left(1 - \frac{1}{B_i} \right) + W \cos \beta k_a - k_x \cdot l^{-\beta^2 F_{01}} \right\}, \quad (16)$$

где τ – длительность импульса тока; W – теплота, выделяемая в единицу времени в единице объема при прохождении тока через деталь; k – коэффициент, учитывающий отношение теплофизических свойств материала детали и напекаемого порошка.

В третьей главе приведена общая методика исследований влияния обжатия и параметров напекания стального порошка.

Проведен выбор: конструкции образца; оснастки и оборудования для проведения объемного обжатия; порошковых материалов; оборудования для проведения электроконтактного напекания; вспомогательного оборудования.

Приведена методика проведения исследований физико-механических свойств включающая: определение твердости; определение прочности сцепления напеченного слоя с поверхностью восстанавливаемой втулки; определение плотности напеченного слоя; определение износостойкости

Определены факторы, влияющие на параметры напекания стального порошка и основных параметров процесса электроконтактного напекания.

В четвертой главе приведены исследования влияния технологических параметров на восстановление бронзовых втулок.

При исследовании по определению рациональных конструктивных параметров обжимной матрицы при объемном деформировании втулок изготовленных из Бр.О5Ц5С5 был установлен предельный коэффициент обжатия, который является отношением среднего наружного диаметра втулки до и после обжатия в зависимости от угла заходной части (α) при коэффициентах трения $\mu=0,05$ и $0,075$ (рис. 8).

Исследования показали прямую зависимость изменения наружного и внутреннего диаметров втулок при объемном обжатии (рис. 9).

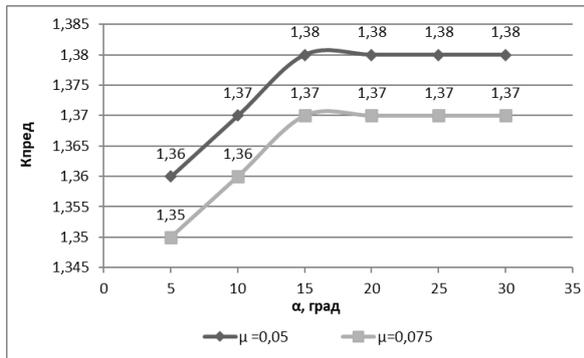


Рисунок 8 – Зависимость предельно допустимого коэффициента обжатия от угла заходной части обжимной матрицы

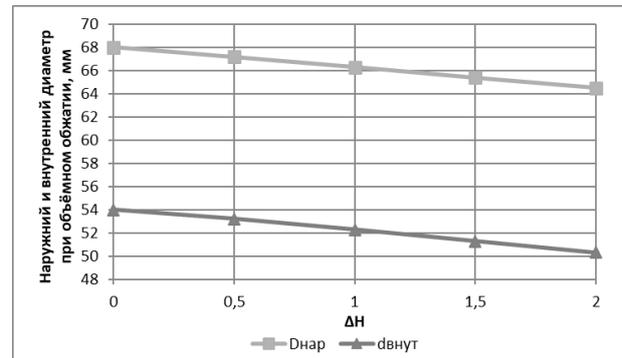


Рисунок 9 – Характер изменения наружного и внутреннего диаметров втулок при объемном обжатии

Результаты экспериментов по объемному обжиму втулок конструктивным параметром $\Delta = 0,08$ и углом заходной части матрицы (α) равным 15° представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты экспериментов по объемному обжиму втулок конструктивными параметрами $\Delta = 0,08$ и $\alpha = 15^\circ$

Усилие прессы Р, кг	Величина натяга ΔH , мм	Длина пояска L, мм
1650	2,0	11
1520	1,5	10
1250	1,0	8,3
950	0,5	6,3

При проведении исследований по определению прочности сцепления, твердости, плотности напечённого слоя, и износостойкости, были определены режимы напекания, включающие температуру, время и давление электродов.

Для порошка Н80Х13С2Р рациональным является режим (рис. 10): температура напекания 1160 ± 5 °С; давление электродов 20 МПа; время напекания 70 с. Для порошка ПХ-30 (рис. 11): температура напекания 1285 ± 5 °С (выдержка при температуре 1100 ± 5 °С в течение 110 с); давление электродов 25 МПа; время напекания 250 с.



Рисунок 10 – Режим напекания порошка ПР-Н80Х13С2Р на бронзовую втулку

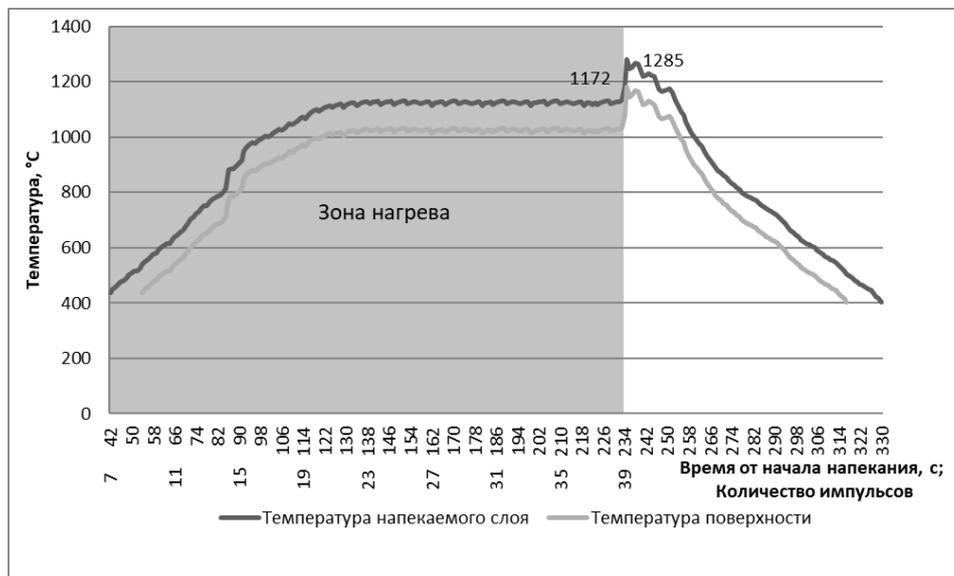


Рисунок 11 – Режим напекания порошка ПХ-30 на бронзовую втулку

Данные режимы позволяют при использовании водоохлаждаемого электрода обеспечить припекание металлического порошка (рис. 12, 13) без возникновения структурных изменений рабочей поверхности бронзовой втулки. (рис. 14, 15)

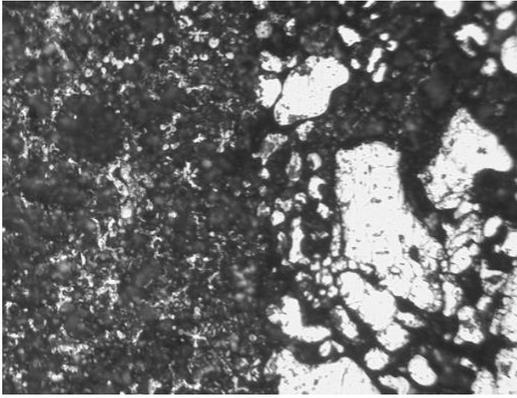


Рисунок 12 – Микроструктура
границного слоя восстановленной
втулки при напекании порошка
ПР-Н80Х13С2Р

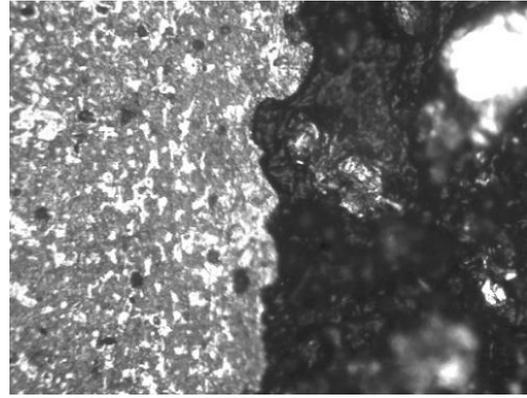


Рисунок 13 – Микроструктура
границного слоя восстановленной
втулки при напекании порошка
ПХ-30

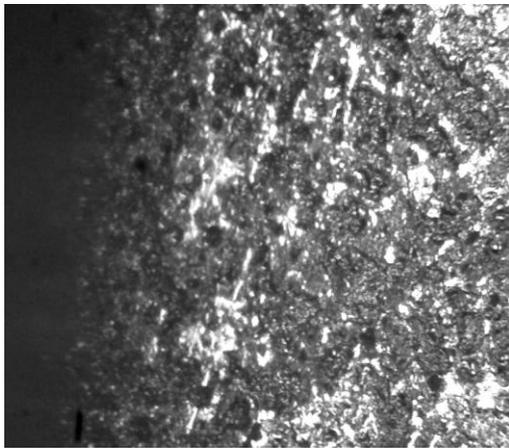


Рисунок 14 – Микроструктура рабочей
поверхности втулки после проведения
восстановления

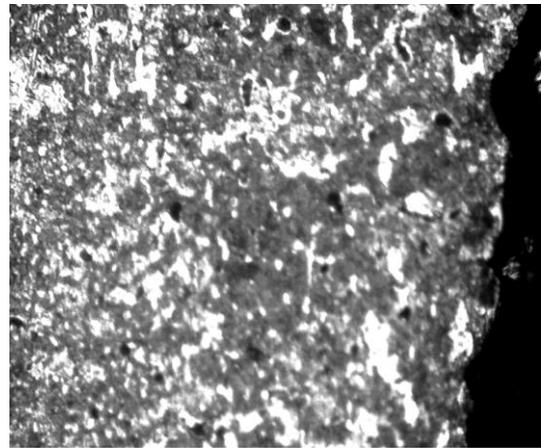


Рисунок 15 – Микроструктура
рабочей поверхности втулки после
проведения восстановления

В пятой главе рассмотрено комплексное применение цифровых технологий для повышения эффективности производственных процессов ремонтных предприятий и достижения необходимой точности.

Применение процессного подхода при использовании специализированного программного обеспечения позволяет создать цифровую процессную модель предприятия заложив основу для организации ЕИС.

Независимое программное обеспечение, получившее распространение в последнее время, позволяет использовать наиболее эффективные нотации, опираясь на потребности и задачи предприятия независимо от методологии. Так, для описания взаимодействия процессов верхнего уровня необходимого для руководящего состава предприятия, целесообразно использовать нотацию IDEF0 (рис. 16). Нотация IDEF0 имеет строгие правила, позволяющие быстро считывать информацию, но не обладает достаточной выразительностью для описания низкоуровневых процессов и проведения имитационного моделирования.

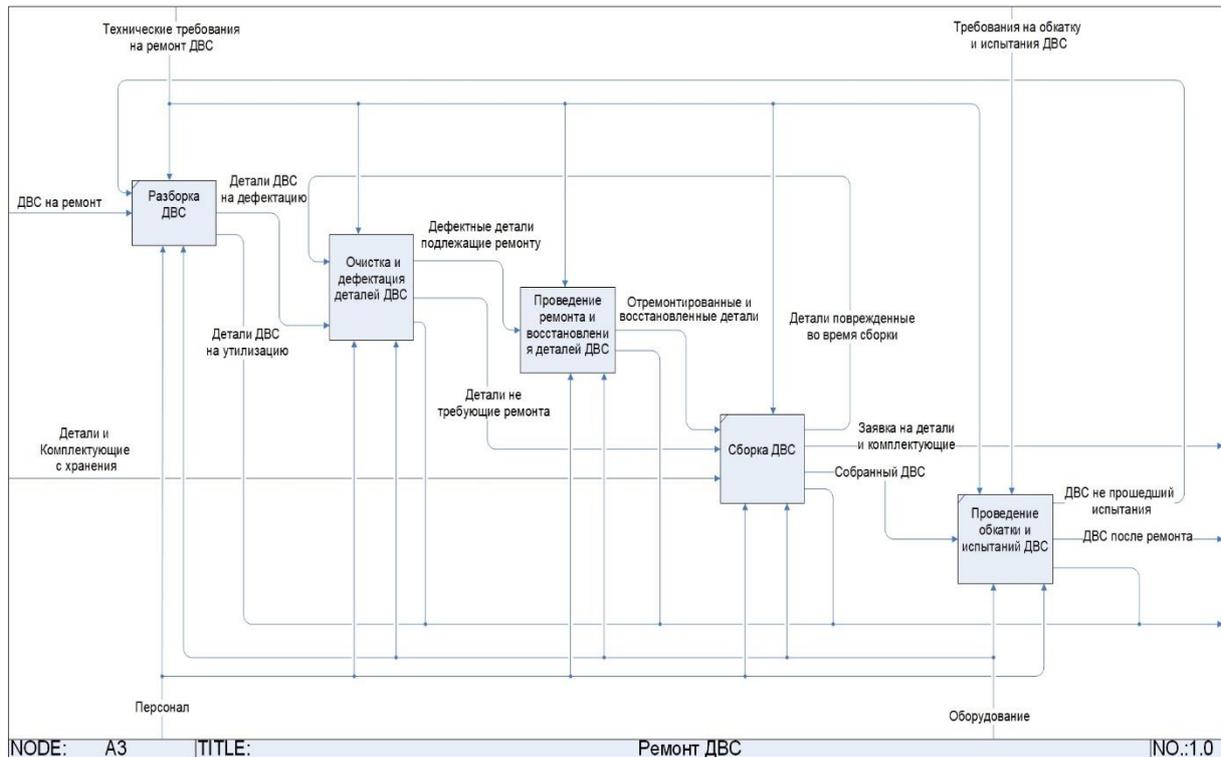


Рисунок 16 – Процесс ремонта ДВС в нотации IDEF0

Для оцифровки низкоуровневых процессов необходимо применять нотации, способные не только графически отобразить процесс, но и провести его имитационное моделирование для выявления узких мест. Многие программные продукты также поддерживают двухстороннюю связь с реальным процессом, позволяющим собирать данные в автоматизированном режиме, и быстро внедрять оптимизированный процесс. К числу этих нотаций можно отнести BPMN (Business Process Model and Notation). Одной из ключевых особенностей BPMN является использование дорожек, отражающих границы ответственности, что позволяет облегчить понимание сотрудниками своих должностных обязанностей. Модель процесса дефектации распределительного вала, построенного в BPMN представлена на рисунке 17.

Помимо этого, данная нотация поддерживает автоматизированное описание построенного процесса в формате XPDЛ, позволяющего передавать модель в неизменном виде между различным программным обеспечением. Кроме BPMN для описания процессов нижнего уровня можно использовать нотации EPC/ePEC (Event-Driven Process Chain/ extended Event-driven Process Chain).

Диаграмма процесса, построенного согласно EPC, всегда располагается вертикально с ветвлением в стороны относительно основного потока.

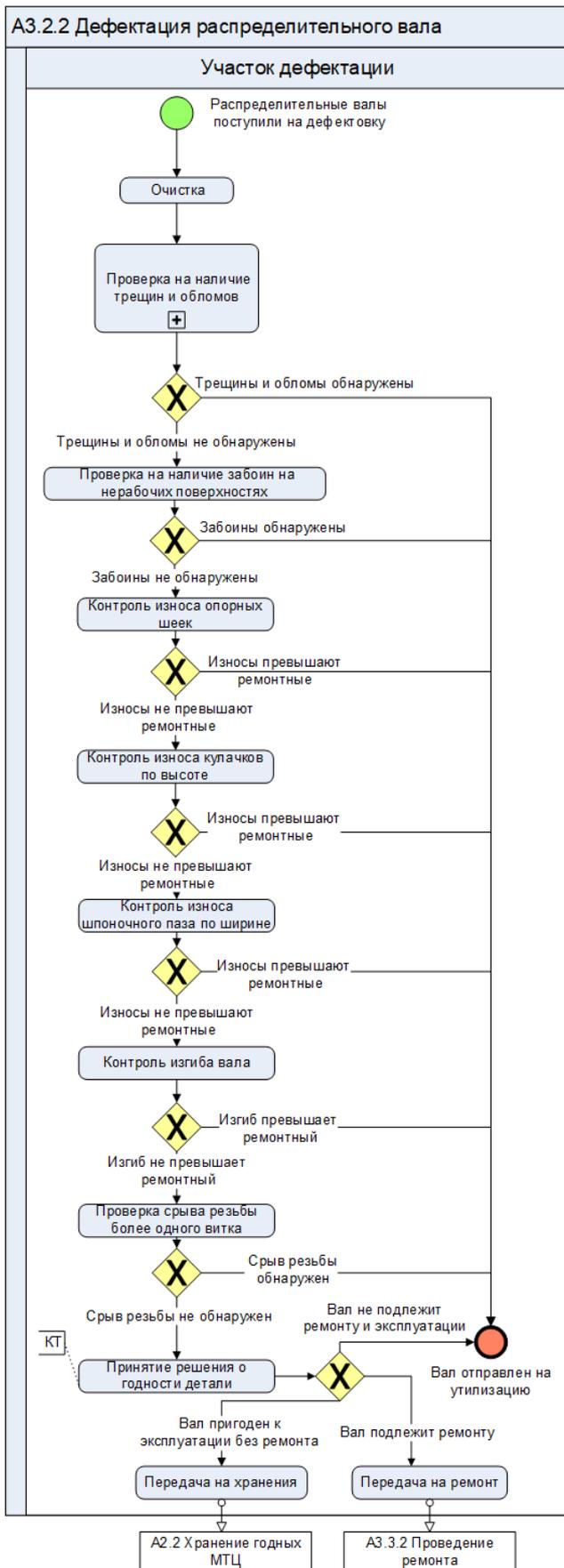


Рисунок 17 – Процесс дефектации распределительного вала в нотации BPMN

Процесс проверки на наличие трещин и обломов при дефектации распределительного вала, построенный в нотации EPC приведен на рисунке 18.

BPMN и EPC нотации обладают равными возможностями при описании и моделировании производственных процессов. При этом возможно проведение конвертации между ними, так диаграмма BPMN при преобразовании в EPC сохранит все атрибуты, в обратном направлении возможна незначительная потеря информации. Проведение сравнения показали, что при описании процесса для модели в BPMN потребуется на 40% меньше элементов в сравнении с EPC, но большее число артефактов.

Исходя из этого, диаграмма процесса в BPMN более проста для восприятия, но менее подробна, поэтому она хорошо подходит для описания низкоуровневых технологических процессов с большим числом подпроцессов и четкими границами ответственности.

Благодаря своей подробности, нотация EPC позволяет с высоким уровнем детализации описать ответственные процессы с малым числом задействованных лиц, фактически являясь отражением операционной карты.

Применение процессного подхода на основе цифровых технологий позволяет начать переход к автоматизированному мониторингу процессов.

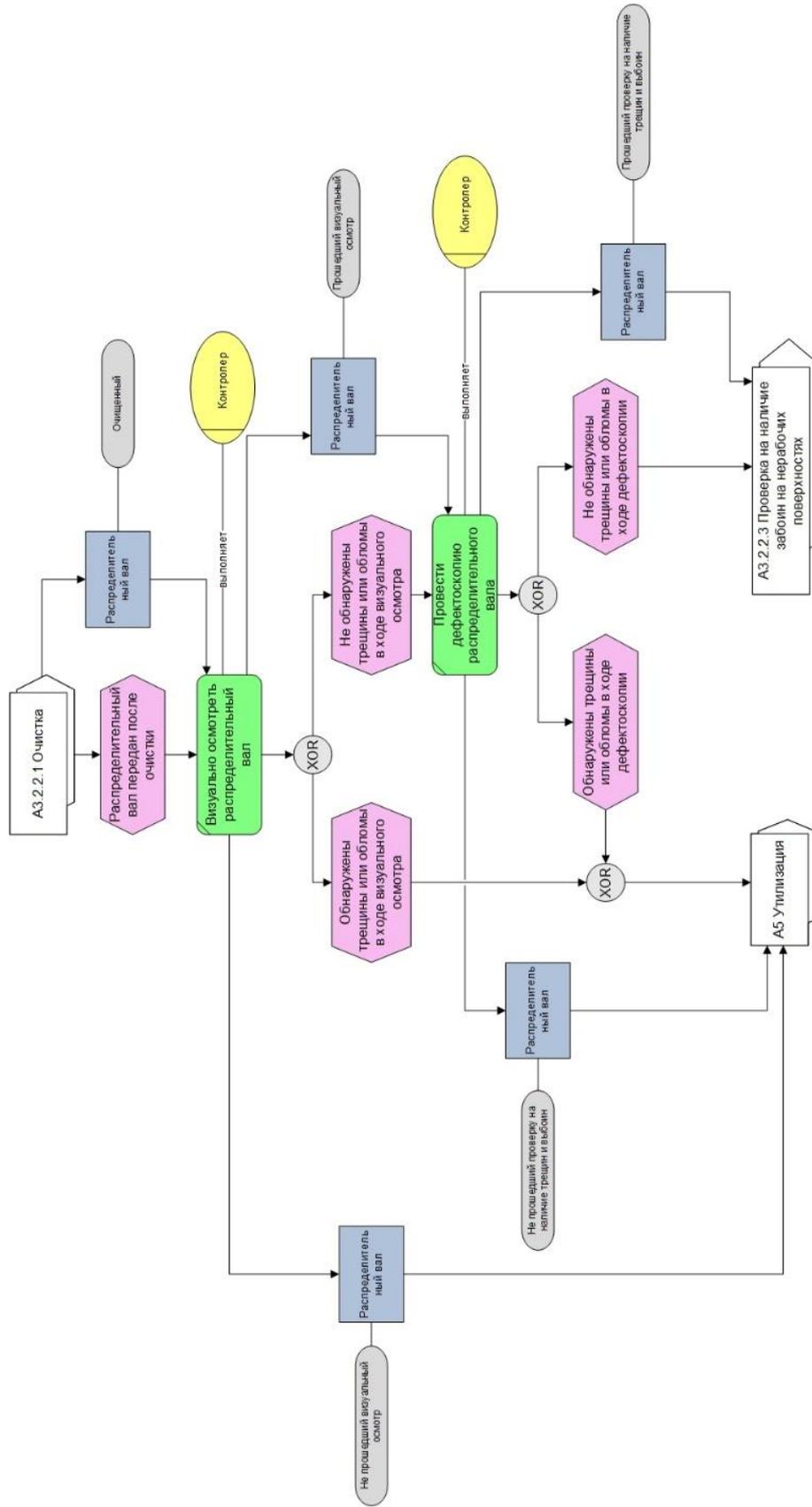


Рисунок 18 – Процесс проверки на наличие трещин и обломов при дефектации распределительного вала

Для организации эффективного мониторинга необходимо обеспечить прослеживаемость деталей во время движения по производственному процессу и соответствующей цифровой модели, для чего требуется введение их индивидуальной маркировки на основе QR или Data Matrix кодов.

Для маркировки можно использовать бирки, наклейки или наносить маркировку при помощи лазерной гравировки на нерабочие поверхности. Использование последнего метода позволяет сохранить её после сборки, что положительно скажется на работе с рекламациями, а также позволит уточнить остаточный ресурс деталей.

В зависимости от уровня развития цифровых технологий на предприятии существует два метода кодирования метки, так, при низком уровне развития, метка выступает в качестве носителя информации, а при более развитой цифровой среде данная маркировка выполняет роль точки входа и содержит адрес внутренней интернет-страницы.

При реализации первого варианта размер метки, содержащий QR – код, пропорционален хранящейся в ней информации и увеличивает её геометрические размеры, что затрудняет её размещение непосредственно на детали, а также повышает вероятность повреждения. Также не происходит непрерывного обновления информации, поэтому в этом случае нельзя говорить о полноценной системе прослеживаемости внутри предприятия. Применение меток в качестве носителя информации отличается относительной простотой внедрения, поскольку нужно ограниченное число специализированного оборудования, направленного на печать меток.

Для решения задачи непрерывного прослеживания деталей и регистрации изменения их параметров необходимо использовать маркировку как точку входа. Основой подобной системы выступает база данных, которая накапливает информацию и обновляется в режиме реального времени. Наравне с QR-кодом для реализации данного метода можно использовать метки с кодом Data Matrix преимуществом которых можно считать меньший размер и возможность создания прямоугольных меток (рис. 19), а также относительную простоту их нанесения на деталь при помощи гравировки, что может быть удобно на ремонтных предприятиях.



а)



б)



в)

Рисунок 19 – Закодированные метки (<http://10.50.2.10/info/21975>):

а – QR-код, б – квадратный код Data Matrix, в – прямоугольный код Data Matrix

К преимуществам использования QR-кодов можно отнести более высокую скорость считывания. Поскольку современное оборудование поддерживает оба метода кодирования стоимость внедрения будет одинаковой.

Применение машиночитаемой маркировки совместно с процессным подходом на основе цифровых технологий позволяет наладить автоматизированную систему прослеживаемости на предприятии.

Для полноценной работы ЕИС необходимо обеспечить сбор данных о параметрах деталей. Из-за особенностей ремонтных предприятиях невозможно применение полностью автоматизированных измерительных систем, для снижения рисков, связанных с человеческим фактором, ограничивается заменой аналоговых средств измерений на цифровые.

Несмотря на одинаковый диапазон измерений, метрологические характеристики цифровых и аналоговых средств измерений отличаются, поэтому необходимо провести оценку неправильно принятых и неправильно забракованных деталей. В таблице 2 представлены результаты расчета неправильно принятых и неправильно забракованных опорных шеек распределительных валов двигателей ЯМЗ-236 при контроле.

Таблица 2 – Результаты расчета неправильно принятых и неправильно забракованных опорных шеек распределительных валов двигателей ЯМЗ-236 при обработке под первый ремонтный размер

Параметр	Средство измерений	
	Цифровой микрометр dasqua 4410	Скоба рычажная СР-75
Контролируемый размер, d, мм	53,7 ^{-0,065} _{-0,105}	
Предельная погрешность СИ, Δ_{lim} , мкм	±2	±3,5
СКО погрешности измерения, σ_{met} , мкм	1	1,75
Коэффициент точности измерения, A_{met} , %	2,50	4,58
Количество неправильно принятых опорных шеек, m, %	0,4	0,8
Количество неправильно забракованных опорных шеек, n, %	0,8	1,1
Итого брака, %	1,2	2,9

Результаты сравнения аналогового и цифрового штангенциркуля для контроля кулачков распределительного вала двигателя ЯМЗ-236 приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты расчета неправильно принятых и неправильно забракованных изношенных кулачков распределительного вала двигателя ЯМЗ-236

Параметр	Средство измерений	
	Цифровой штангенциркуль dasqua 2000	ШЦ-I-125-0,1-1
Контролируемый размер, мм	42,0 ^{+0,15} _{-0,15}	
Предельная погрешность СИ, Δ_{lim} , мкм	±20	±100
СКО погрешности измерения, σ_{met} , мкм	6,7	16
Коэффициент точности измерения, A_{met} , %	5	25
Количество неправильно принятых кулачков, m, %	1,4	4,1
Количество неправильно забракованных кулачков, n, %	2,2	9,1
Итого брака, %	3,6	13,2

Контроль изгиба вала, согласно официальной ремонтной документации, осуществляется с помощью индикаторов. Результаты сравнения аналогового и цифрового индикатора приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты расчета неправильно принятых и неправильно забракованных распределительных валов двигателей ЯМЗ-236 из-за превышения изгиба

Параметр	Средство измерений	
	Цифровой индикатор dasqua 5900	ИЧ02 кл.0.
Допуск радиального биения, мм	0,04	
Предельная погрешность СИ, Δ_{lim} , мкм	± 3	± 4
СКО погрешности измерения, $\sigma_{мет}$, мкм	1,5	2
Коэффициент точности измерения, $A_{мет}$, %	7,5	10
Количество неправильно принятых валов, m, %	1,1	1,5
Количество неправильно забракованных валов, n, %	2,6	3,5
Итого брака, %	3,7	5

Контроль величины износа изношенных опор распределительного вала двигателя, рекомендуется осуществлять с помощью нутромера. Результаты сравнения аналогового и цифрового нутромера приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Результаты расчета неправильно принятых и неправильно забракованных изношенных опор распределительного вала двигателя ЯМЗ-236

Параметр	Средство измерений	
	Цифровой нутромер dasqua 4511	НИ 50-100
Контролируемый размер, D, мм	53,7 ^{+0,03}	
Предельная погрешность СИ, Δ_{lim} , мкм	± 5	± 10
СКО погрешности измерения, $\sigma_{мет}$, мкм	2,5	5
Коэффициент точности измерения, $A_{мет}$, %	8,3	16,7
Количество неправильно принятых втулок, m, %	1,6	2,8
Количество неправильно забракованных втулок, n, %	3,4	7,8
Итого брака, %	5	10,6

Таким образом, замена аналоговых средств измерений на цифровые не только позволяет автоматизировать сбор объективных данных, но и за счет улучшенных метрологических характеристик снизить количество неправильно принятых валов и опор на 26...66%, а неправильно забракованных – на 25...75%.

Переход на цифровые средства измерения совместно с автоматизированной системой прослеживаемости позволяет собирать статистику по каждой проводимой операции, что делает возможным оценить эффективности процессов и проводить их имитационное моделирование.

Проведение имитационного моделирования производственных процессов на ремонтных предприятиях требует особого подхода поскольку осложнено повторным использованием изношенных деталей. Наиболее ответственным процессом является дефектация поступивших на ремонт изношенных деталей.

В таблице 6 приведено время контроля без учета вспомогательных операций. Контроль осуществился после внедрения системы прослеживаемости и цифровых средств измерений.

Таблица 6 – Нормативное время проведения операций контроля

№ п/п	Вид контроля	Время проведения, с
1.	Проверка на наличие трещин и обломов	173
2.	Проверка на наличие забоин на нерабочих поверхностях	162
3.	Контроль износа опорных шеек	23
4.	Контроль износа кулачков по высоте	9
5.	Контроль износа шпоночного паза по ширине	3
6.	Контроль изгиба вала	36
7.	Проверка срыва резьбы более одного витка	3
Всего		409

Согласно исследованиям, до 35% распределительных валов выбраковываются во время дефектации, как не подлежащие ремонту, из них 50% из-за износа кулачков (2/3) и опорных шеек (1/3). Вероятность выбраковки по остальным причинам распределена относительно равномерно. Данная статистика собрана на основе обработки большого массива данных и может не соответствовать конкретным условиям, поэтому создание однозначной модели не представляется возможным.

Для решения проблемы адаптации под конкретные условия было создано две модели:

равномерное распределение вероятности обнаружения брака;

неравномерное распределение вероятности в соответствии со статистикой.

Имитационное моделирование контрольных операций процесса дефектации распределительного вала проводилось в программе Business Studio, диаграмма представлена на рисунке 17.

Для получения более объективных результатов имитационное моделирование проводилось для ста валов, также были введены следующие параметры:

количество проверенных валов равно целому числу;

количество валов, поступивших на проверку, равняется 100;

сумма валов, отправленных на ремонт и в утилизацию равна 100;

процент брака стремится к 35;

вероятность обнаружения дефекта снижается по мере прохождения операций.

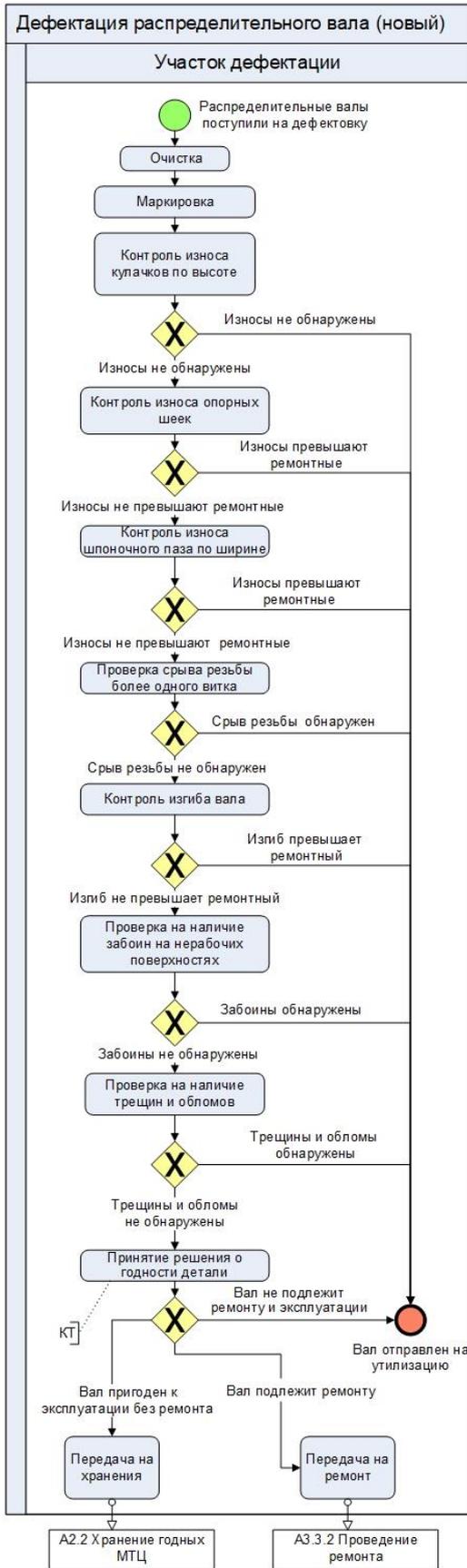


Рисунок 21 – Рациональный процесс дефектации распределительного вала

Сравнение времени дефектации 100 валов базового процесса представлено на рисунке 20. В результате сравнения полученных данных, более близкие результаты к реальному получены при неравномерном распределении.

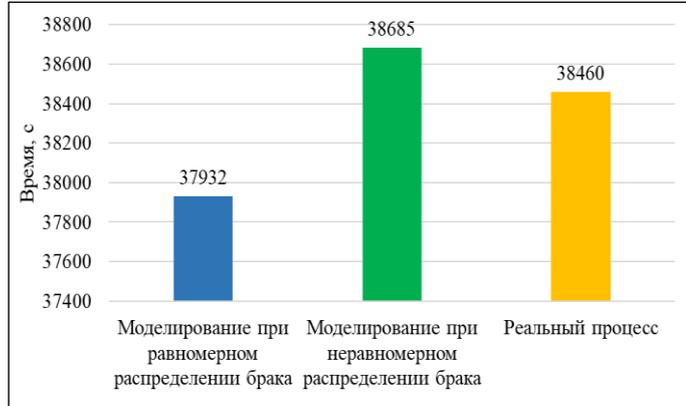


Рисунок 20 – Сравнение времени дефектации 100 валов базового процесса

Оптимизация процесса производилась исходя из процента выбракованных изделий и продолжительности операции (рис. 21). Диаграммы сравнения времени, полученного во время моделирования с реальным временем дефектации оптимизированного процесса, представлены на рисунке 20.

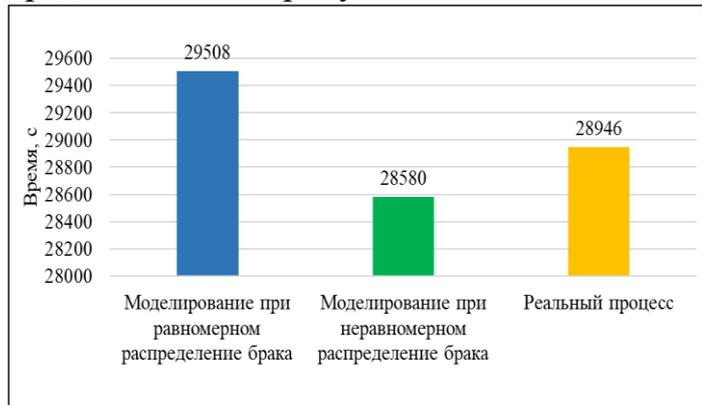


Рисунок 22 – Сравнение времени дефектации 100 валов оптимизированного процесса

Данные реального процесса для сравнения с полученными в результате моделирования снимались через 6 месяцев после внедрения для завершения адаптации сотрудников к новому процессу.

Моделирование показало снижение времени на проведение дефектации:
при равномерном распределении на 22%;
при неравномерном распределении на 26%

Поскольку расхождение между моделями и реальными данными процесса не превысила 5%, можно утверждать, что при правильном подходе необходимая точность достижима даже при процессах, связанных с высокой степенью неопределённости.

Правильность использования двух моделей процесса подтверждается реальным затраченным временем, находящимся в интервале между полученными при равномерном и неравномерном распределении. Применение данного подхода позволило провести улучшение процесса, сократив затрачиваемое время в 1,32 раза.

При проведении дефектации наиболее важным этапом является принятие решения о годности детали, в рамках которого устанавливается целесообразность проведения ремонта. При ремонте распределительных валов возникает необходимость в механической обработке трущихся поверхностей, таких как опорные шейки, поэтому на этапе дефектации нужно достоверно определить ремонтный размер вала после обработки.

Припуск на технологическую обработку детали зачастую назначают исходя из требований, не прибегая к расчетным методам, поскольку они более трудоёмки и требуют проведения дополнительных операций. Наиболее точным является метод определения припуска по фактическим данным, который при внедрении цифровых технологий, объединённых в рамках ЕИС, будет происходить в автоматизированном режиме.

Для определения фактического припуска на механическую обработку было выбрано 20 распределительных валов двигателя ЯМЗ-236, размеры опорных шеек до и после обработки под первый ремонтный размер представлены на рисунке 23 и 24 соответственно.

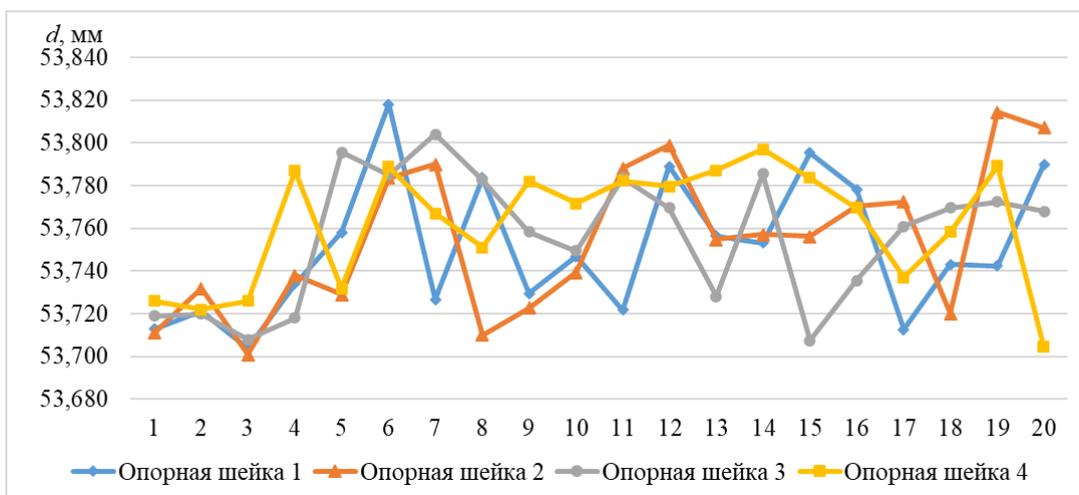


Рисунок 23 – Размеры опорных шеек распределительных валов до ремонта

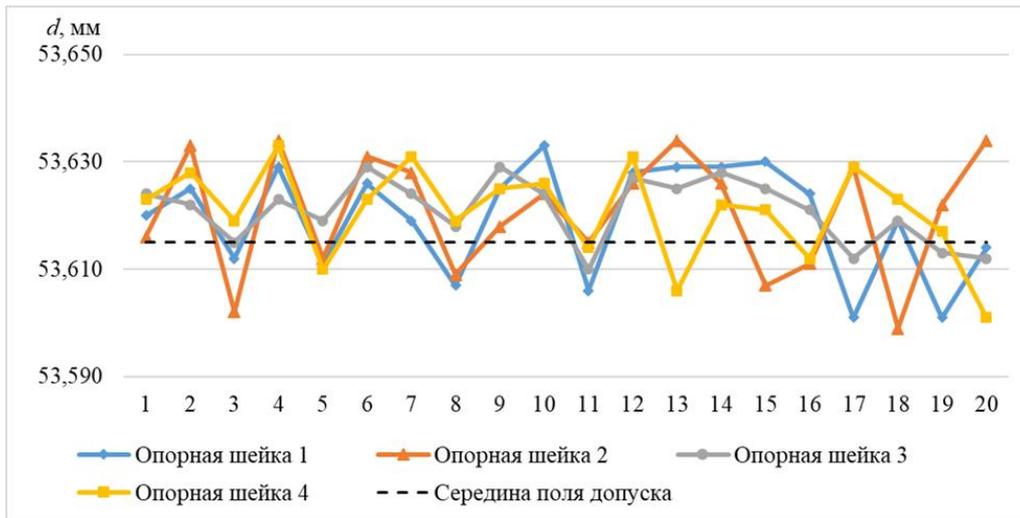


Рисунок 24 – Размеры опорных шеек распределительных валов после ремонта

Исходя из полученных данных, наибольший фактический припуск составил 0,192 мм, а для исключения вероятности перехода во второй ремонтный размер примем его равным 0,200 мм.

На начальном этапе применения цифровых технологий, или при их недостаточном развитии, в организации применение полностью автоматизированной системы принятия решения затруднительно, поэтому целесообразно использовать бальную систему, позволяющую решить возложенную задачу.

Для снижения вероятности ошибочного принятия решения введём коэффициент весомости степени дефектности K_d :

$$K_d = \frac{(\sum k_{id})}{n}, \quad (17)$$

где k_{id} – коэффициент влияния дефекта на результат ремонта; n – количество обнаруженных дефектов.

Значения k_{id} выбирались таким образом, чтобы исключить промежуточное состояние в принятии решения. В таблице 7 приведены значения k_{id} исходя из фактических данных конкретного предприятия.

Таблица 7 – Дефекты распределительного вала и значение k_{id}

Дефект	Значение k_{id}			
	2	4	8	16
Минимальный размер высоты кулачка	от 41,800 мм до 42,200 мм	от 41,400 мм до 41,799 мм	от 41,000 мм до 41,399 мм	Менее 41 мм
Минимальный размер опорной шейки	–	от 53,695 мм до 53,895 мм	от 53,395 мм до 53,694 мм	до 53,394 мм
Ширина шпоночного паза	–	–	–	Более 6,020 мм
Срыв резьбы M27x2 – 6g	–	1 виток	–	2 витка и более
Изгиб вала	до 0,05 мм	–	–	Более 0,05 мм
Забойны на нерабочих поверхностях	–	–	–	Наличие
Трещин или обломы	–	–	–	Наличие

При $K_d \leq 4$ остаточный ресурс распределительного вала не менее 80% и проведение ремонта целесообразно, при $K_d \geq 5$ остаточный ресурс составит 50%, и ремонт будет не целесообразен, если $K_d \geq 8$, то вал находится в критическом состоянии ремонту не подлежит. Помимо этого, необходимо учитывать себестоимость ремонта и новой детали. Если себестоимость ремонта превысит 30% от новой детали, а остаточный ресурс менее 80% то выполнять ремонт экономически не целесообразно.

Данный метод принятия решений не удобен для предприятий с более высокой степенью применения цифровых систем, поэтому для них возможно использование программного обеспечения на основе алгоритма, приведенного на рисунке 25, интерфейсом данного программного обеспечения является человеко-читаемая форма контрольного листка, пример которого приведен в таблице 8.

Таблица 8 – Человеко-читаемая форма контрольного листка

Цех: ремонта ДВС Участок: дефектации	Изделие: Распределительный вал ЯМЗ - 236 №28135 Операция: входной контроль Контроллер: Иванов Иван Николаевич	
Дефект	Данные контроля	Уровень дефектности
Трещин или обломы	Отсутствует	-
Забоины на нерабочих поверхностях	Отсутствует	-
Минимальный размер опорной шейки	53,892	1 PP
Минимальная высота кулачка	42,198	-
Износ шпоночного паза по ширине	Отсутствует	-
Изгиб вала	Отсутствует	-
Срыв резьбы М27х2 – 6g	Отсутствует	-
Затраты на проведение механической обработки		
Время механической обработки	45	мин
Стоимость восстановления	1200	Р
Стоимость новой детали	8000	Р
Остаточный ресурс	Не менее 80%	
Рекомендация	Обработка - 1PP	

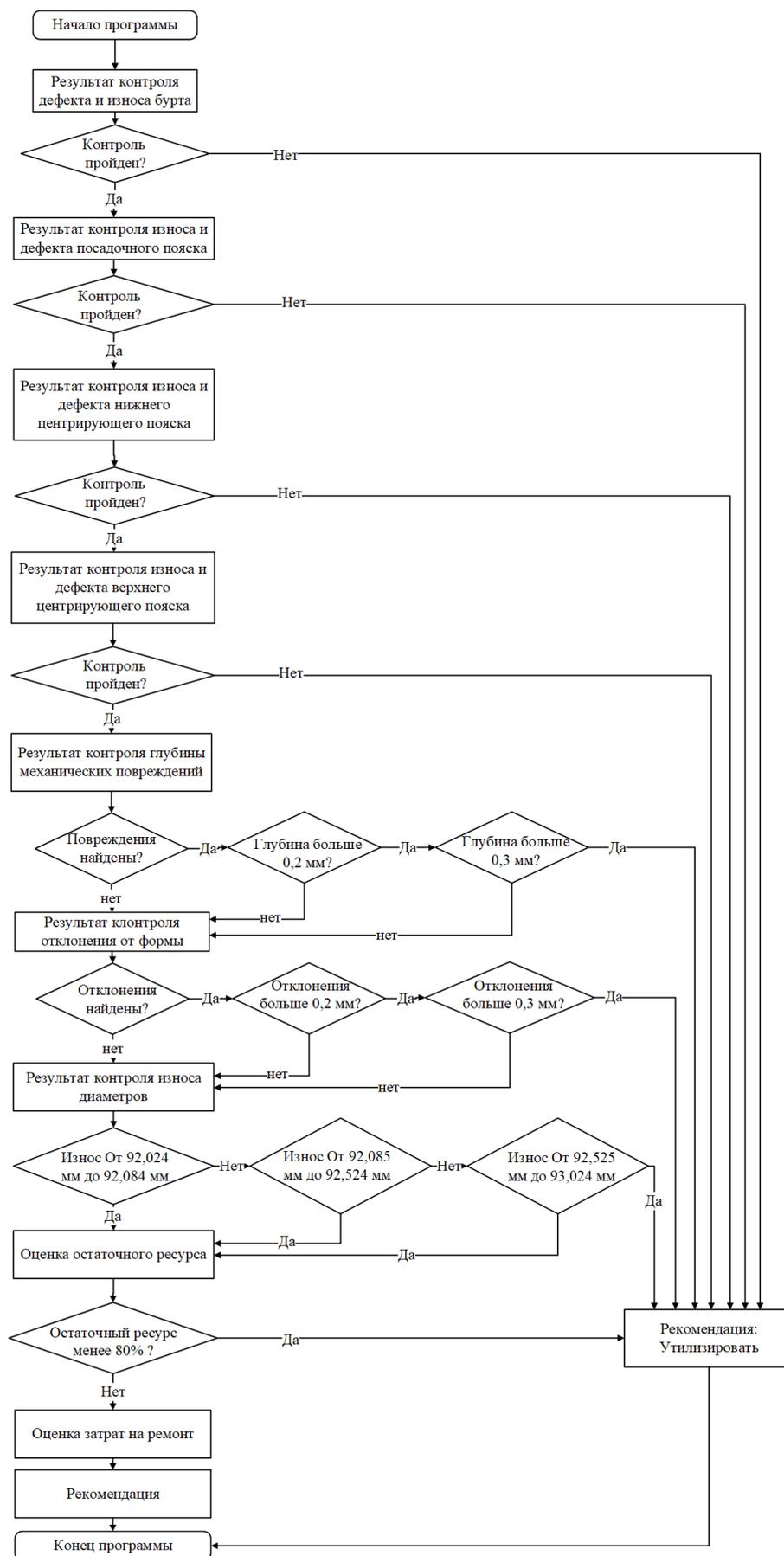


Рисунок 25 – Алгоритм программного обеспечения

Применение ЕИС позволяет проводить оценку эффективности процессов. Для оценки и контроля стабильности процесса, а также его управления, применяют X и R карты. Контрольные карты опорных шеек двадцати распределительных валов двигателя ЯМЗ-236 представлены на рисунке 26.

На X-карте (рис. 26, а), четыре из пяти последовательных точек расположены в одной зоне односигмовых границ, что указывает на действие неслучайной причины изменчивости, при этом данный процесс находится в статистически неуправляемом (нестабильном) состоянии согласно R-карте (рис. 26, б).

К ранее указанным факторам влияющих на разнородность результатов обработки также добавляется то, что глубина резания для всех опорных шеек назначается исходя из показателей самой изношенной, а не индивидуально для каждой. Стоит отметить, что у новых распределительных валов разноразмерность опорных шеек отсутствует, соответственно её не должно быть и у прошедших механическую обработку под ремонтный размер.

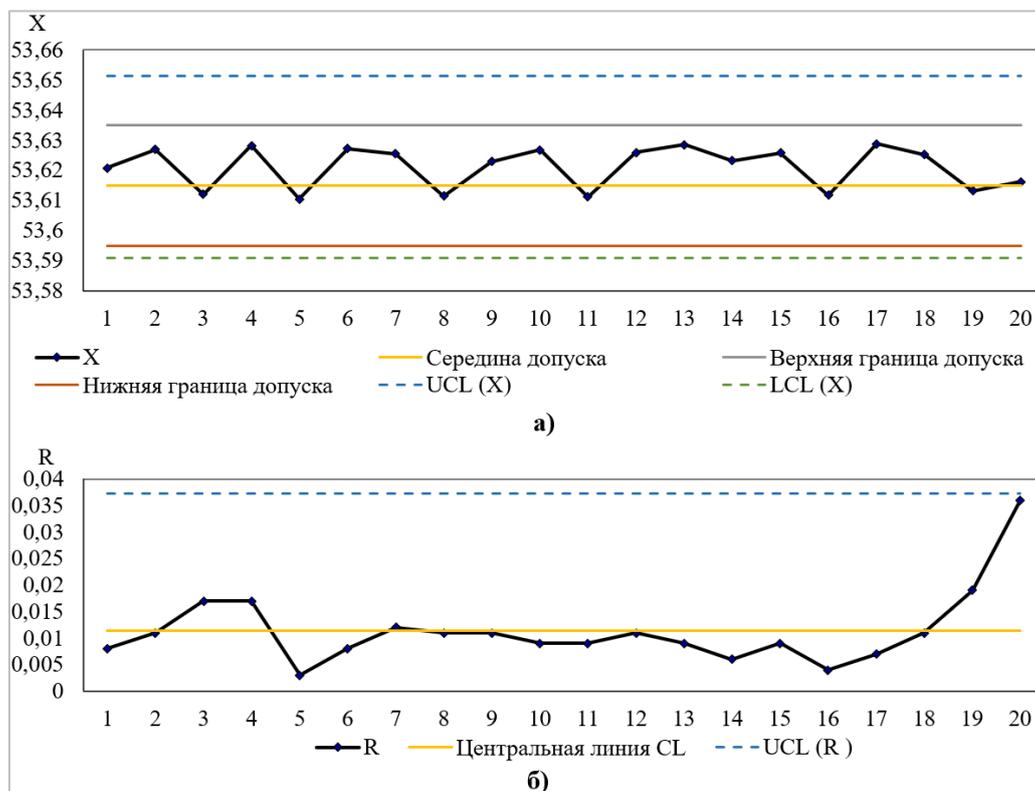


Рисунок 26 – Контрольные карты для обработанных под первый ремонтный размер опорных шеек распределительных валов двигателя ЯМЗ-236: а) X-карта; б) R-карта

Для более глубокого анализа построены диаграммы размаха (рис. 27 и 28).

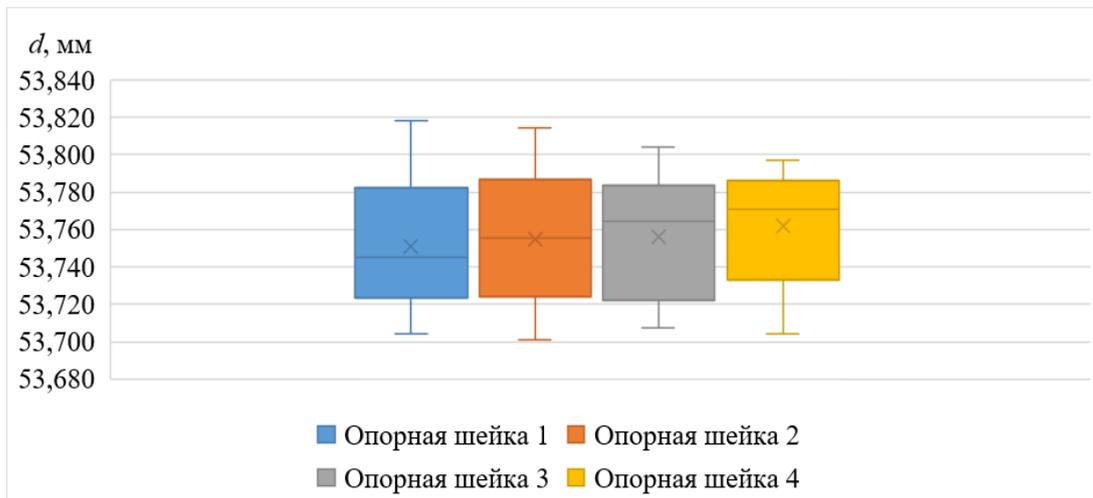


Рисунок 27 – Диаграммы размаха размеров опорных шеек распределительных валов до ремонта

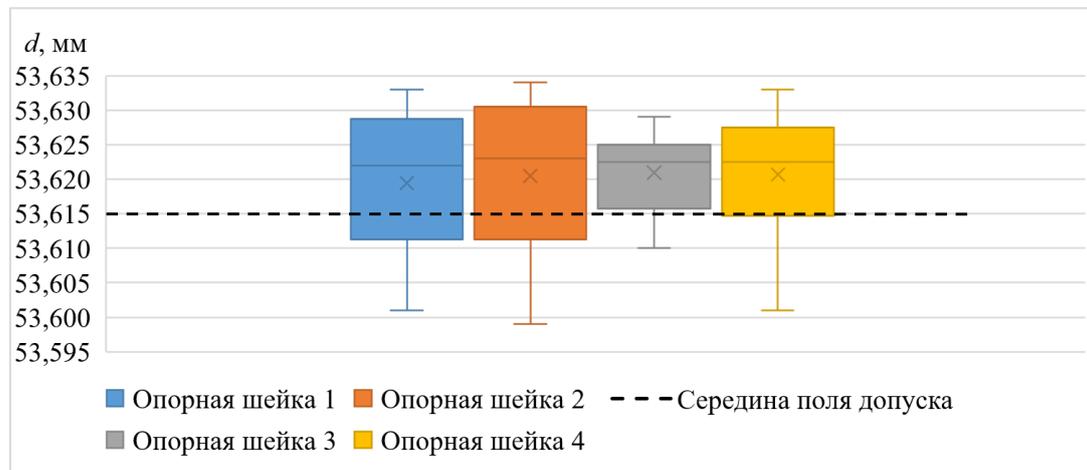


Рисунок 28 – Диаграммы размаха размеров опорных шеек распределительных валов после ремонта

В результате исследования выявлено, что износ опорных шеек имеет случайный характер, не позволяющий определить какую-либо закономерность. Проведение механической обработки уменьшает рассеивание размеров шеек валов при этом меняя их относительно случайным образом. Также необходимо отметить, что медиана выборки лежит ближе к верхней границе допуска, при этом происходит её выравнивание между опорными шейками. Данная тенденция говорит о стремлении избежать появления неисправимого брака в результате механической обработки, но при этом повышается вероятность появления исправимого брака. Сборка соединения позволяет несколько снизить влияние возникающих, в том числе и случайных отклонений, тем не менее это снижает послеремонтный ресурс системы ГРМ.

Согласно полученным данным, была скорректирована технология механической обработки и внедрена система оценки целесообразности проведения ремонта. Контрольные карты после проведения указанных мероприятий представлены на рисунке 29.

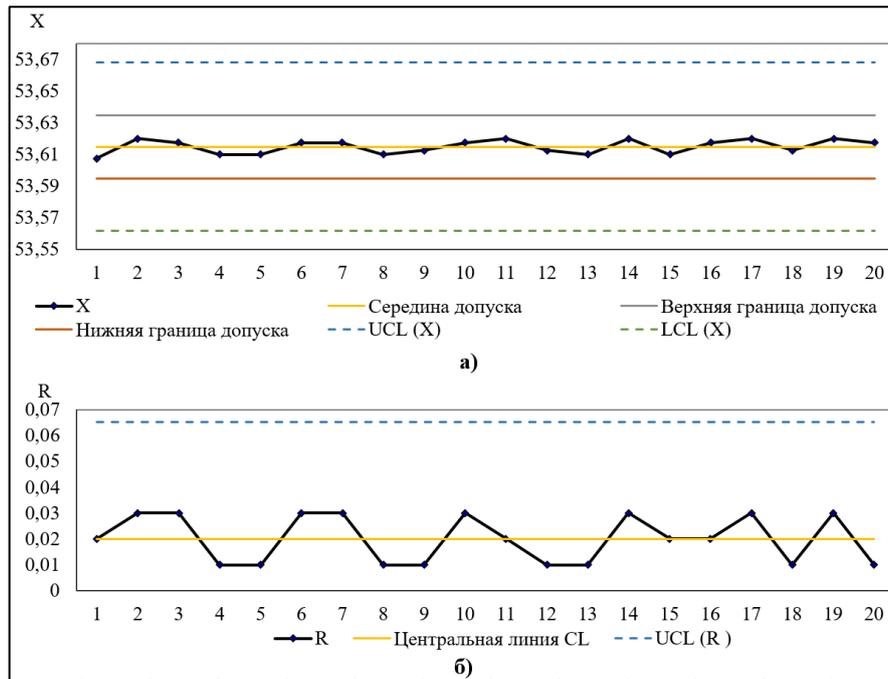


Рисунок 29 – Контрольные карты для обработанных под первый ремонтный размер опорных шеек распределительных валов двигателя ЯМЗ-236 после корректировки процесса: а) X–карта; б) R–карта

Согласно полученным картам, процесс механической обработки после корректировки находится в стабильном управляемом состоянии, что говорит о правильности и эффективности принятых мер.

Функционирующая ЕИС и стабильные процессы позволяет провести достоверную оценку точности соединения «распределительный вал – втулка» двигателя ЯМЗ-236 после проведения ремонта. Поскольку опорные шейки распределительного вала образуют пару трения с втулкой то их размеры стандартизированы (табл. 9).

Таблица 9 – Диаметры втулок и шеек распределительных валов двигателя ЯМЗ-236

Категории	Диаметр втулки, мм		Диаметр опорных шеек распределительного вала, мм	Зазор, мм
	Внутренний	Наружный		
Номинальный	$54^{+0,03}$	$68^{+0,12}_{+0,09}$	$54^{-0,065}_{-0,105}$	0,065... 0,135
1 ремонтный	$53,6^{+0,03}$		$53,7^{-0,065}_{-0,105}$	
2 ремонтный	$53,3^{+0,03}$		$53,4^{-0,065}_{-0,105}$	

Для получения работоспособного соединения, согласно требованиям представленных ранее точностных методов, требуется определить поля допусков для вала и отверстия. Схема полей допусков соединения при применении полной взаимозаменяемости представлена на рисунке 30.

Для реализации селективной сборки требуется изменить допуск размера вала, тогда схема расположения полей допусков примет вид, представленный на рисунке 31.

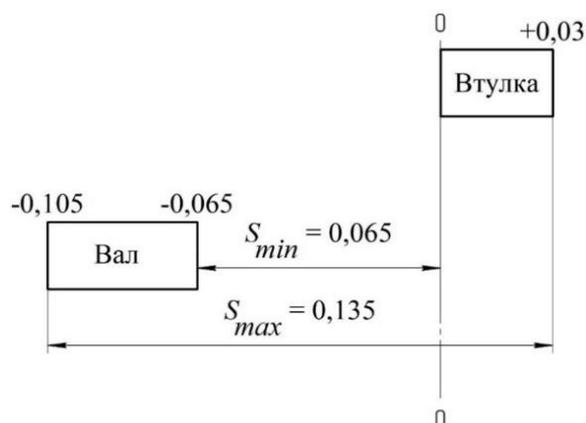


Рисунок 30 – Схема расположения полей допусков соединения «распределительный вал – втулка» при применении полной взаимозаменяемости

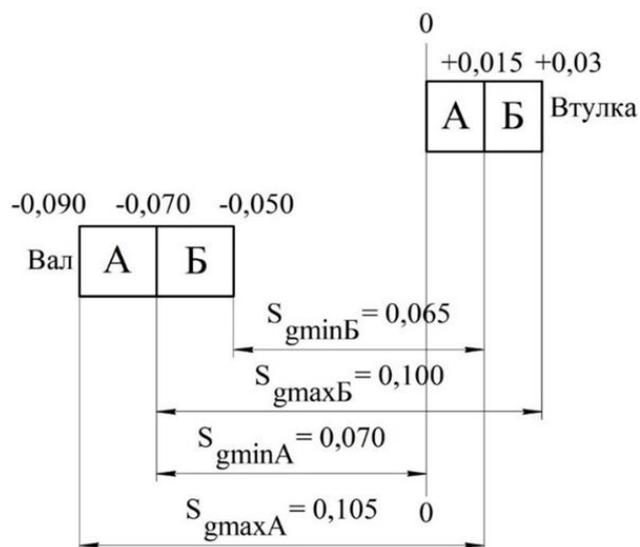


Рисунок 31 – Схема расположения полей допусков при селективной сборке соединения «распределительный вал – втулка» двигателя ЯМЗ-236

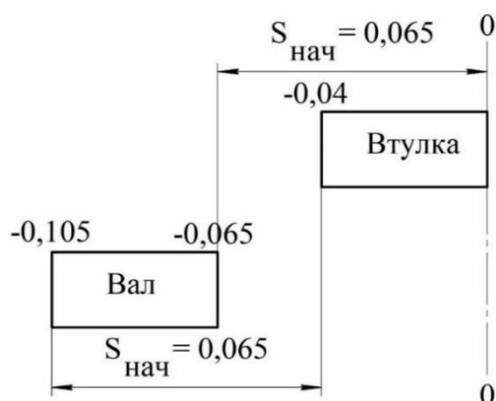


Рисунок 32 – Схема расположения полей допусков при цифровом подборе соединения «распределительный вал – втулка» двигателя ЯМЗ-236

Для выполнения компенсационной функции при применении цифрового подбора необходимо изменить допуск на размер втулки. Схема расположения изменённых полей допусков представлена на рисунке 32.

Для оценки влияния применения цифровых технологий на процесс механической обработки опорных шеек были отобраны двадцать пять распределительных валов двигателя ЯМЗ – 236, обработка производилась на шлифовальном станке класса точности П. Контроль размеров проводился ранее предложенными цифровыми средствами измерений.

В результате анализа рассеяния размеров опорных шеек распределительных валов, обработанных под первый ремонтный размер двигателя ЯМЗ-236, после внедрения цифровых технологий, установлено отсутствие как исправимого, так и неисправимого брака, при этом большая часть обработанных шеек валов находится в диапазоне 53,605...53,625 мм. Отсутствие брака в первую очередь связано с совершенствованием процесса дефектации, позволяющим отсеять распределительные валы, которые ремонтировать нецелесообразно.

Внедрение цифровых технологий при обработке опорных шеек распределительных валов, обработанных под первый ремонтный размер

двигателя ЯМЗ -236, согласно методу селективной сборки, позволило избежать возникновения брака, а также разделить валы согласно полученным размерам опорных шеек на две группы селекции.

Для исследования получаемых внутренних диаметров для каждого метода было отобрано 100 втулок. Обработка втулок для условий селективной сборки производилась на горизонтально-расточном станке с точностью 0,01 мм, для метода цифрового подбора использовался многоцелевой обрабатывающий центр с точностью 0,002 мм.

Выявлено, что при обработке втулок отсутствует как исправимый, так и неисправимый брак, что позволяет сделать вывод об эффективности предлагаемого технологического процесса. Применение цифровых технологий позволило обеспечить однозначное отнесение к группе селекции, а также предотвратить появление незавершённого производства, поскольку количество втулок соответствует количеству шеек в каждой группе селекции.

При использовании метода цифрового подбора установлено соответствие рассеивания размеров втулок и шеек валов, что подтверждает справедливость теоретических расчетов.

Для оценки долговечности соединения был проведен анализ полученных зазоров и запаса на износ.

При использовании метода полной взаимозаменяемости все зазоры находятся в диапазоне 0,065...0,135 мм, что соответствует допуску при этом запас на износ составит 0,105...0,175 мм. Разница в 70 мкм (40%) не позволит с высокой точностью прогнозировать остаточный ресурс соединения.

Фактически полученные зазоры при селективной сборке находятся в диапазоне 0,065...0,105 мм, уменьшение рассеивания свидетельствует об эффективности её применения при полном внедрении ЕИС. Применение данного метода позволило в 2 раза повысить минимальный запас на износ по сравнению с методом полной взаимозаменяемости, реальный запас на износ находится в диапазоне 0,135...0,175 мм.

При применении цифрового подбора наблюдается равенство между зоной рассеивания зазора и допуском на обработку разница при этом между наибольшим и наименьшим значением не более 5% (0,065...0,068 мм), она же сохранится и между значениями запаса на износ (0,172...0,175 мм).

Исходя из этого можно сделать вывод, что метод цифрового подбора позволяет обеспечить минимальный зазор (наибольший запас на износ) вне зависимости от размера опорной шейки распределительного вала при наличии должного запаса на обработку втулки, при этом данный метод предъявляет повышенные требования к сбору и обработке данных, полученных при контроле, поскольку от их качества будет зависеть конечный результат.

В шестой главе проведена технико-экономическая оценка предлагаемых технических и технологических решений, в результате которой выявлено, что себестоимость одной восстановленной втулки при использовании металлического порошка ПР-Н80Х13С2Р составляет 777,69 руб. для ПХ-30 – 758,53 руб., учитывая одинаковый ресурс новой и

восстановленной втулки, а также то, что стоимость новой втулки – 1650 руб., можно говорить об экономической целесообразности применения предлагаемой технологии восстановления.

В результате расчета экономической эффективности от применения цифровых средств измерений при дефектации распределительного вала и его сопряжения с втулкой было выявлено, что замена аналоговых средств цифровыми позволяет снизить потери, вызванные исправимым и неисправимым браком. При комплексном внедрении цифровых средств измерений экономия за срок эксплуатации достигнет 4 415 тыс. руб.

В результате проведенного расчёта экономической эффективности от увеличения срока службы соединения «распределительный вал – втулка» в установленных 1000 двигателях было выявлено, что увеличение срока службы соединения позволит снизить затраты на 3 015 тыс. руб., а амортизационные отчисления – 24 тыс. руб.

В заключении сформированы основные результаты диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщая проведенные исследования, можно сделать следующие выводы:

1. На основании анализа отклонений формы и расположения сопрягаемых деталей, образующих соединение в подшипнике скольжения, получена теоретическая зависимость для расчета минимальной толщины масляного слоя с целью обеспечения несущей способности. Также получено математическое выражение для определения наименьшего зазора в посадке в зависимости от минимальной толщины масляного слоя с учетом коэффициента запаса надежности несущей способности в подшипнике скольжения.

2. Разработана теоретическая модель выбора рациональных способов восстановления двух деталей, входящих в соединение, с учетом параметров точности и стоимости ее обеспечения. На основе анализа модели параметрического отказа соединения показано, что применение метода цифрового подбора пар трения, нацеленного на обеспечение гарантированного наименьшего зазора, позволяет достигнуть наибольшего запаса материалов на износ для условий мелкосерийного ремонтного производства. Наиболее целесообразно использовать данный метод при формировании соединений валов с втулками подшипников скольжения, в частности – для опорных шеек распределительных валов, где имеется возможность обрабатывать валы под ремонтный размер, а втулку восстанавливать путем обжата с восстановлением наружного диаметра и последующей обработки внутреннего и наружного диаметров до требуемых размеров.

3. Теоретически обосновано использование метода обжата при восстановлении бронзовых втулок по критерию сохранения геометрической устойчивости. Получены математические выражения и составлены рекомендации по расчету и выбору геометрических параметров

деформирующей матрицы в зависимости от величины изнашивания внутренней поверхности и требуемого диаметра втулки.

4. Проведены практические эксперименты и разработана технология восстановления внутренних поверхностей подшипников скольжения с износом до 0,8 мм, изготовленных из Бр.О5Ц5С5, путём объёмного обжата с последующим электроконтактным напеканием наружной поверхности втулки металлическими порошками ПХ-30 и ПР-Н80Х13С2Р с использованием охлаждаемого электрода и графитовой оболочки для предотвращения влияния высокой температуры на твердость и износостойкость внутренней поверхности бронзовой втулки. Финишную обработку внутреннего диаметра втулки с целью получения заданного размера рекомендовано проводить на многоцелевом обрабатывающем центре с зоной рассеяния $\pm 0,002$ мм.

5. Проведена оценка точности обработки опорных шеек распределительных валов под ремонтный размер с помощью диаграмм размаха, контрольных карт и графиков до и после применения элементов цифровизации, показано, что применение цифровых технологий приводит к значительному снижению исправимого и неисправимого брака, а также уменьшению реальной зоны рассеяния размеров после контроля.

6. Метод цифрового подбора пар трения – опорных шеек распределительных валов с втулками – реализован на базе процессной модели в нотациях IDEF0, BPMN и EPC. Применена машиночитаемая цифровая маркировка в виде QR-кода и Data Matrix, что позволило автоматизировать сбор данных и проводить мониторинг эффективности процессов. Анализ зазоров, полученных путем цифрового подбора в соединениях опорных шеек распределительных валов с втулками показал, что формируется почти двукратный запас материала на износ (0,172...0,175 мм) по сравнению с методом полной взаимозаменяемости (0,105...0,175 мм) и прослеживается равенство между зоной рассеяния зазоров в посадке и допуском на обработку шеек вала.

7. Использование цифровых технологий при выполнении операций дефектации и контроля позволяет снизить временные потери (в 1,32 раза) благодаря систематизации и моделированию собираемых данных, а на этапе принятия решения о целесообразности ремонта в значительной степени исключается влияние человеческого фактора, снижается трудоёмкость процесса дефектации, осуществляется эффективный мониторинг производственных процессов.

8. Проведена замена аналоговых средств измерений на цифровые, снизившая количество неправильно принятых и неправильно забракованных деталей на 25...75%.

9. В результате расчета экономической эффективности использования комбинированного метода восстановления втулок под опорные шейки распределительных валов выявлено, что себестоимость восстановления одной втулки будет в 2 раза ниже стоимости новой втулки. Экономическая эффективность от применения цифровых средств измерений будет равна 4 415

тыс. руб. Экономическая эффективность от увеличения срока службы исследуемых соединений за счет цифрового подбора пар трения составит 3 015 тыс. руб.

Рекомендации к производству

1. Для снижения вероятности возникновения ошибок при внедрении цифровых технологий предприятию рекомендуется использовать систему менеджмента качества на основе ГОСТ Р ИСО 9001.

2. На основе действующей системы менеджмента качества предприятию рекомендуется произвести оцифровку выходной продукции технологических процессов начиная с ключевых, непосредственно влияющих на качество отремонтированных сборочных единиц. Для оцифровки процессов необходимо использовать специализированное программное обеспечение, например, Business Studio. Для процессов верхнего уровня целесообразно использовать нотацию IDEF0, нижнего уровня BPMN, операционные карты – EPC.

3. Для контроля эффективности процессов необходимо организовать прослеживаемость деталей на предприятии, произведя их маркировку при помощи машиночитаемых меток Data Matrix или QR-код.

4. В рамках совершенствования контрольно-измерительных операций необходимо произвести замену аналоговых средств измерений на цифровые, имеющие лучшие метрологические характеристики и внесённые в реестр средств измерений, а также имеющие возможность передачи данных напрямую в компьютер.

5. Используя собранные данные, полученные в результате реализации этапов 2-4, можно приступить к созданию имитационной модели процесса путем добавления в оцифрованный процесс фактических параметров. Во избежание получения ошибочной информации в результате имитационного моделирования её нужно проводить для наилучшего и наихудшего случая, как для базового процесса, так и для оптимизированного.

6. При внедрении системы принятия решений на первом этапе целесообразно применить бальную оценку с развитием цифровых технологий на предприятии, перейдя к программному решению.

7. На основе контрольных карт необходимо организовать постоянный мониторинг стабильности процессов, а в случае, если процесс является в неуправляемом (нестабильном) состоянии, необходимо принять меры по его стабилизации.

8. Для снижения рассеивания величины зазора в соединении и увеличения запаса на износ необходимо использовать метод селективной сборки или цифрового подбора. Метод селективной сборки применяется при средней точности оборудования (0,01 мм), цифровой подбор требует применения высокоточного оборудования (0,002 и точнее) для обработки отверстий.

9. Для применения селективной сборки и цифрового подбора можно использовать втулки, прошедшие восстановление комбинированным методом, согласно следующим рекомендациям.

Контроль износа и подбор геометрии обжимной матрицы.

Проведение объёмного обжата.

Контроль размеров детали после проведения объёмного обжата - изменение наружного и внутреннего диаметров.

Подготовка детали к проведению электроконтактного напекания - очистка от масла (обезжиривание не требуется) и покрытие внутренней поверхности втулки высокотемпературной токонепроводящей краской.

Сборка графитовой оболочки - установка асбеста в нижней части графитовой оболочки, установка детали, засыпка стального порошка, установка верхней асбестовой прокладки, установка верхней части графитовой оболочки.

Монтирование графитовой оболочки на сварочную установку, состоявшее в установке графитовой оболочки на нижний электрод и плотном ее зажатии.

Производство нагрева деталей согласно следующим рекомендациям:

Для порошка H80X13C2P: температура напекания $1160 \pm 5^\circ\text{C}$; давление электродов 20 МПа; время напекания 70 с.

Для порошка ПХ-30: температура напекания $1285 \pm 5^\circ\text{C}$ (выдержка при температуре $1100 \pm 5^\circ\text{C}$ в течение 110 с) давление электродов 25 МПа; время напекания 250 с.

Охлаждение графитовой оболочки до температуры менее 400°C и производство ее разборки.

Осуществить контроль качества напечённого слоя.

Провести механическую обработку наружной поверхности втулки и отверстий для подачи масла.

Установить втулки в блок цилиндров согласно ремонтной документации на двигатель.

Провести обработку внутренней поверхности установленных втулок под требуемый диаметр согласно выбранному точностному методу.

Повести контроль параметров втулок после обработки.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Проведенные диссертационные исследования могут служить основой для дальнейшего развития системы управления производственными процессами предприятий технического сервиса на основе применения цифровых технологий.

Перспективными направлениями данной темы является:

1. Разработка системы управления предприятия технического сервиса на основе собираемых данных.

2. Адаптация и апробация технологии нанесения металлического порошка на бронзовую втулку методом селективного лазерного плавления (SLM).

3. Адаптация и апробация технологии нанесения металлического порошка на бронзовую втулку методом и прямого лазерного спекания металла (DMLS).

4. Адаптация и апробация предложенной методики для соединений «втулка – втулка».

5. Адаптация и апробация предложенной методики для соединений «корпус – втулка».

6. Адаптация и апробация предложенной методики по применению цифровых технологий для соединений с натягом.

7. Адаптация и апробация предложенной методики по применению цифровых технологий для переходных посадок.

8. Адаптация и апробация предложенной методики по применению цифровых технологий при подборе деталей по их весу.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК

1. **Голиницкий, П. В.** Обоснование целесообразности замены аналоговых средств измерений цифровыми на ремонтных предприятиях / П. В. Голиницкий, У. Ю. Антонова, Д. А. Пупкова // *Агроинженерия*. – 2026. – Т. 28, № 1. – С. 80-86.
2. **Леонов, О.А.** Оценка качества процесса обработки опорных шеек распределителей под ремонтный размер с помощью статистических инструментов контроля / О. А. Леонов, Г. Н. Темасова, **П. В. Голиницкий** [и др.] // *Агроинженерия*. – 2025. – Т. 27, № 6. – С. 75-81.
3. **Голиницкий, П. В.** Оценка целесообразности ремонта распределительного вала / П.В. Голиницкий, // *Сельский механизатор*. – 2025. – № 10. – С. 32-33.
4. **Леонов, О.А.** Повышение ресурса соединения с зазором методом цифрового подбора / О.А. Леонов, **П.В. Голиницкий**, Ю.Г. Вергазова, В.С. Бондарев // *Сельский механизатор*. – 2025. – № 10. – С. 34-36.
5. **Леонов, О.А.** Использование метода полной взаимозаменяемости при ремонте соединений опор с шейками распределительного вала / О.А. Леонов, **П.В. Голиницкий**, Ю.Г. Вергазова, В.С. Бондарев // *Сельский механизатор*. – 2025. – № 9. – С. 29-31.
6. **Голиницкий, П. В.** Использование цифровых технологий в обеспечении максимального запаса на изнашивание соединений с зазором / П. В. Голиницкий, О. А. Леонов, У. Ю. Антонова // *Вестник машиностроения*. – 2025. – Т. 104, № 8. – С. 650-656.
7. **Голиницкий, П. В.** Повышение ресурса соединения с зазором методом селективной сборки / П. В. Голиницкий, У. Ю. Антонова, В. С. Бондарев // *Сельский механизатор*. – 2025. – № 7. – С. 46-48.
8. Оптимизация процесса входного контроля распределительных валов при помощи имитационного моделирования / **П. В. Голиницкий**, У. Ю. Антонова, Э. И. Черкасова [и др.] // *Агроинженерия*. – 2025. – Т. 27, № 3. – С. 81-89.
9. QFD-анализ как основа качества запасных частей при ремонте / У. Ю. Антонова, Э. И. Черкасова, **П. В. Голиницкий**, Е. А. Петухов // *Сельский механизатор*. – 2024. – № 7. – С. 46-48.

10. **Голиницкий, П. В.** Цифровая маркировка запасных частей / П. В. Голиницкий, У. Ю. Антонова, Э. И. Черкасова // *Агроинженерия*. – 2024. – Т. 26, № 4. – С. 44-50.
11. Выбор средств измерений для дефектации коренных опор двигателя ЯМЗ / О. А. Леонов, **П. В. Голиницкий**, У. Ю. Антонова [и др.] // *Агроинженерия*. – 2022. – Т. 24, № 6. – С. 59-63.
12. **Голиницкий, П. В.** Выбор режимов напекания металлических порошков на основе никеля и железа при комбинированном методе восстановления бронзовых втулок / П. В. Голиницкий, И. Л. Приходько // *Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина"*. – 2018. – № 5(87). – С. 40-45.

Издания, индексируемые в международных наукометрических базах Web of Science и Scopus, приравненные к журналам перечня ВАК

1. **Golinitzkii, P. V.** Application of Digital Systems in Repair Enterprises / P. V. Golinitzkii, U. Yu. Antonova, E. I. Cherkasova // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. – 2025. – Vol. 54, No. 3. – P. 306-311.
2. Improvement of the Decision-Making System for Fault Detection of Cylinder Liners / **P. V. Golinitzkii**, U. Yu. Antonova, E. I. Cherkasova, L. A. Grinchenko // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. – 2024. – Vol. 53, No. 6. – P. 656-661.
3. Digitalization of Fault Detection in Crankshafts / **P. V. Golinitzkii**, U. Yu. Antonova, G. N. Terasova [et al.] // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. – 2024. – Vol. 53, No. 3. – P. 263-270.
4. Calculation of Fit Tolerance with Clearance to Increase Relative Wear Resistance of Joints / O. A. Leonov, N. Zh. Shkaruba, G. N. Terasova, **P. V. Golinitzkiy** [et al.] // *Journal of Friction and Wear*. – 2023. – Vol. 44, No. 3. – P. 171-177. – DOI 10.3103/S1068366623030054. – EDN WCXANG.
5. **Golinitzky, P. V.** Improving the Compression of Tin Bronze Bushes in Repair / P. V. Golinitzky, O. A. Leonov, N. Zh. Shkaruba // *Russian Engineering Research*. – 2022. – Vol. 42, No. 12. – P. 1234-1238
6. Matrix Geometry in Crimping of Bronze Bushings / **P. V. Golinitzkii**, O. A. Leonov, N. Z. Shkaruba, U. Y. Antonova // *Russian Engineering Research*. – 2021. – Vol. 41, No. 10. – P. 892-895.

Свидетельства о регистрации и патенты

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025619436 Российская Федерация. «Программа для автоматизации подбора пар соединения «поршень – гильза»»: заявл. 14.03.2025 : опубл. 16.04.2025 / **П. В. Голиницкий**, У. Ю. Антонова, Э. И. Черкасова [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева».

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024663185 Российская Федерация. «Цифровой контрольный листок» : № 2024661663 : заявл. 23.05.2024 : опубл. 05.06.2024 / **П. В. Голиницкий**, В. К. Зимогорский, У. Ю. Антонова, Э. И. Черкасова ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева».
3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023668303 Российская Федерация. Расчет предельных функциональных зазоров, обеспечивающих жидкостное трение в соединении : № 2023667455 : заявл. 21.08.2023 : опубл. 25.08.2023 / О. А. Леонов, **П. В. Голиницкий**, У. Ю. Антонова [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева».
4. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2022621345 Российская Федерация. Методы оценки качества : № 2022621222 : заявл. 27.05.2022 : опубл. 08.06.2022 / Г. Н. Темасова, О. А. Леонов, Н. Ж. Шкаруба, Ю.Г. Вергазова, **П.В. Голиницкий**, [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева».
5. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2022621385 Российская Федерация. Контрольные карты для анализа процесса : № 2022621193 : заявл. 27.05.2022 : опубл. 14.06.2022 / Г. Н. Темасова, О. А. Леонов, Н. Ж. Шкаруба, Ю.Г. Вергазова, **П.В. Голиницкий**, [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет МСХА имени К.А. Тимирязева».
6. Патент № 2750899 С1 Российская Федерация, МПК В23Р 6/02, В22F 7/00. Устройство для восстановления изношенных втулок скольжения из цветных сплавов : № 2020138833 : заявл. 26.11.2020 : опубл. 05.07.2021 / С. К. Тойгамбаев, О. Н. Дидманидзе, **П. В. Голиницкий**, [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева".
7. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021621718 Российская Федерация. Статистическое управление процессами : № 2021621604 : заявл. 30.07.2021 : опубл. 12.08.2021 / Г. Н. Темасова, О. А. Леонов, Н. Ж. Шкаруба, Ю.Г. Вергазова, **П.В. Голиницкий**, [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева».

8. Патент № 2751387 С1 Российская Федерация, МПК В23Р 6/02, В22F 7/00. Устройство для восстановления изношенных втулок скольжения из цветных сплавов : № 2020138831 : заявл. 26.11.2020 : опубл. 13.07.2021 / С. К. Тойгамбаев, О. Н. Дидманидзе, **П. В. Голиницкий**, [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева".

Публикации в других рецензируемых научных изданиях

1. Применение цифровых инструментов для совершенствования производственного процесса / **П. В. Голиницкий**, У. Ю. Антонова, Л. А. Гринченко, С. Ю. Видникевич // Компетентность. – 2023. – № 5. – С. 32–37.
2. Влияние цифровизации на эффективность технологических процессов современного производства / **П. В. Голиницкий**, Э. И. Черкасова, Ю. Г. Вергазова, У. Ю. Антонова // Компетентность. – 2021. – № 8. – С. 48–54.
3. **Голиницкий, П. В.** Применение IT–технологий при маркировке запасных частей сельскохозяйственной техники / П. В. Голиницкий, У. Ю. Антонова, К. И. Ханжиян // Компетентность. – 2019. – № 5. – С. 36–39.
4. **Голиницкий, П. В.** Разработка процедуры управления внутренней документацией для промышленного предприятия / П. В. Голиницкий, Ю. Г. Вергазова, У. Ю. Антонова // Компетентность. – 2018. – № 7(158). – С. 20–25.
5. **Голиницкий, П. В.** Совершенствование менеджмента качества на предприятиях АПК / П. В. Голиницкий, Ю. Г. Вергазова, У. Ю. Антонова // Компетентность. – 2018. – № 9–10(160–161). – С. 63–68.

Публикации в научных изданиях

1. **Голиницкий, П. В.** Анализ стабильности процесса обработки опорных шеек распределительных валов / П. В. Голиницкий, У. Ю. Антонова, Э. И. Черкасова // Чтения академика В. Н. Болтинского : сборник статей, Москва, 22–23 января 2025 года. – Москва: ООО «Сам Полиграфист», 2025. – С. 153-157.
2. **Голиницкий, П. В.** Оптимизация системы принятия решений при ремонте / П. В. Голиницкий, У. Ю. Антонова, Э. И. Черкасова // Чтения академика В. Н. Болтинского : Сборник статей научно-практической конференции, посвященный 90-летию Шарова Николая Михайловича, Москва, 23–24 октября 2024 года. – Москва: ООО «Сам Полиграфист», 2024. – С. 119-122.
3. **Голиницкий, П. В.** Выбор средств измерений для контроля качества обработки шеек распределительного вала двигателя ЗМЗ под ремонтный размер / П. В. Голиницкий, А. Н. Самордин, В. О. Леонов // Чтения академика В. Н. Болтинского : Сборник статей научно-практической конференции, посвященный 90-летию Шарова Николая Михайловича, Москва, 23–24 октября 2024 года. – Москва: ООО «Сам Полиграфист», 2024. – С. 123-127.

4. **Голиницкий, П. В.** Применение цифровых инструментов для повышения эффективности ремонтных предприятий / П. В. Голиницкий, У. Ю. Антонова, Э. И. Черкасова // Чтения академика В. Н. Болтинского : Сборник статей, Москва, 17–18 января 2024 года. – Москва: Российский государственный аграрный университет, ООО «Сам Полиграфист», 2024. – С. 241-244.
5. **Голиницкий, П. В.** Цифровой подход к построению производственных процессов / П. В. Голиницкий, Э. И. Черкасова, У. Ю. Антонова // Реинжиниринг и цифровая трансформация эксплуатации транспортно-технологических машин и робототехнических комплексов : Сборник статей Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых (г. Москва, 19-20 декабря 2023 г.), посвященной 100-летию со дня рождения ветерана Великой Отечественной Войны, заслуженного деятеля науки и техники, заслуженного изобретателя РФ, д.т.н., профессора Николая Федоровича Тельнова, Москва, 19–20 декабря 2023 года. – Москва: Российский государственный аграрный университет - Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева, 2024. – С. 457-460.
6. **Голиницкий, П. В.** Цифровизация метрологических процессов при контроле продукции / П. В. Голиницкий, У. Ю. Антонова // Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении : III Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием, Тула, 06–08 апреля 2022 года. – Тула: Тульский государственный университет, 2022. – С. 90-93.
7. Разработка алгоритма по выбору средств измерений для допускового контроля / У. Ю. Антонова, Ю. Г. Вергазова, **П. В. Голиницкий**, Д. О. Леонов // Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности : Сборник научных статей VI международной научной конференции, Казань, 29–30 июня 2021 года. – Казань: Общество с ограниченной ответственностью "КОНВЕРТ", 2021. – С. 151-153.
8. Вергазова, Ю. Г. Основные и вспомогательные процессы в СМК на машиностроительном предприятии по производству техники для АПК / Ю. Г. Вергазова, **П. В. Голиницкий** // Наука и образование: опыт, проблемы, перспективы развития : Материалы международной научно-практической конференции, Красноярск, 20–22 апреля 2021 года. Том 1 Часть 2. – Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2021. – С. 109-112.
9. **Голиницкий, П. В.** Расчет оптимальных показателей матрицы при проведении объемного обжата втулок / П. В. Голиницкий // Доклады ТСХА, Москва, 02–04 декабря 2020 года. Том ВЫПУСК 293 Часть III. – Москва: Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева, 2021. – С. 441-444.
10. Антонова, У. Ю. Элементы контроля качества в машиностроении и ремонтном производстве / У. Ю. Антонова, **П. В. Голиницкий** // П

- Всероссийская научно-техническая конференция «отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении» : сборник докладов II всероссийской научно-технической конференции, Тула, 08–09 октября 2020 года. – Тула: Тульский государственный университет, 2020. – С. 75-77.
11. **Голиницкий, П. В.** Возможность применения электроконтактного напекания для нанесения металлических порошков на бронзовые поверхности / П. В. Голиницкий // Материалы международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 160-летию В.А. Михельсона, Москва, 09–11 июня 2020 года. Том 2. – Москва: Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева, 2020. – С. 321-324.
 12. **Голиницкий, П. В.** Совершенствование маркировки машиностроительной продукции / П. В. Голиницкий, У. Ю. Антонова // Всероссийская научно-техническая конференция "Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении" : Сборник докладов, Тула, 23–25 октября 2019 года. – Тула: Тульский государственный университет, 2019. – С. 106-109.

Учебно-методические работы

1. **Голиницкий, П. В.** Проектирование процессов предприятий АПК : Учебник / П. В. Голиницкий, У. Ю. Антонова, Э. И. Черкасова. – Саратов : Амирит, 2024. – 193 с.
2. 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. – 172 с.
3. Системный анализ в управлении качеством : Учебник / **П. В. Голиницкий**, У. Ю. Антонова, Э. И. Черкасова [и др.]. – Саратов : Амирит, 2023. – 187 с.