

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

УДК 621.71:631.3.004.67

На правах рукописи

**ЗИМОГОРСКИЙ ВЛАДИСЛАВ КИРИЛЛОВИЧ**

**МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОНТРОЛЯ ОТВЕРСТИЙ  
БЛОКОВ ЦИЛИНДРОВ В РЕМОНТНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ**

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

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Леонов Олег Альбертович

Москва 2026

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	11
1.1 Метрологическое обеспечение машиностроительного и ремонтного производства.....	11
1.2 Анализ существующих методов выбора средств измерений.....	14
1.2.1 Выбор по коэффициенту уточнения (коэффициенту запаса точности).....	14
1.2.2 Выбор по допускам рабочих предельных калибров.....	15
1.2.3 Выбор по принципу безошибочности контроля.....	16
1.2.4 Выбор средств измерений по технико-экономическим показателям.....	17
1.2.5 Современный подход: технико-экономическая оптимизация по критерию минимизации суммарных потерь.....	17
1.2.6 Средства измерения при контроле и дефектации отверстий...21	
1.3 Анализ контрольно-измерительных средств, использующихся при метрологическом контроле отверстий в двигателях серии ЯМЗ-236/238 ..23	
1.4 Анализ средств измерений отверстий, применяемых при ремонте двигателей ЯМЗ.....	29
1.5 Выводы, цели и задачи исследований.....	35
2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ.....	37
2.1 Теоретические основы оценки погрешности средств контроля линейных размеров при ремонте машин.....	37
2.2 Теоретические основы оценки брака первого и второго рода при измерениях.....	42

2.3 Классификация брака в контексте объекта контроля типа «отверстие» .....	47
2.4 Связь вероятностной модели с параметрами разбраковки .....	54
2.5 Разработка методики выбора нутромеров для контроля отверстий блока цилиндров.....	57
2.6 Выводы.....	59
3 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	61
3.1 Методика обработки результатов прямых измерений при многократных наблюдениях .....	61
3.2 Алгоритм выбора средств измерений для контроля отверстий блока цилиндров.....	63
3.3 Методика измерения отверстий с помощью высокоточных средств измерений.....	65
3.4 Методика измерений с помощью индикаторного нутромера .....	67
3.5 Разработка компьютерной программы для обработки результатов многократных измерений .....	71
3.6 Выводы .....	75
4 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ .....	76
4.1 Исследование влияния погрешности хода измерительных головок на точность измерений .....	76
4.2 Обоснование рационального количества измерений для обеспечения точности при калибровке на ремонтном предприятии.....	81
4.3 Исследование метрологического обеспечения при контроле и дефектации коренных опор блока цилиндров ЯМЗ .....	86
4.4 Исследование метрологического обеспечения при контроле и дефектации отверстий втулок под шейки распределительного вала ЯМЗ .	94
4.5 Выводы .....	102

5 ТЕХНИКО ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	104
5.1 Теоретические основы расчета экономического эффекта от совершенствования метрологического обеспечения ремонтного производства.....	104
5.2 Расчет экономии от повышения точности измерений отверстий коренных опор при дефектации.....	105
5.3 Расчет экономического эффекта от повышения точности измерений отверстий отверстий втулок под шейки распределительного вала при дефектации.....	108
5.4 Выводы .....	110
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	111
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	114
ПРИЛОЖЕНИЕ. Акты внедрения результатов научно-исследовательской работы .....	126

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** По данным мониторинга департамента растениеводства, механизации и защиты растений Минсельхоза РФ более 38% всех отказов сельскохозяйственной техники приходится на долю двигателей внутреннего сгорания [18, 39, 49, 52, 66]. Базовой деталью в таких двигателях является блок цилиндров. При износе коренных опор под коленчатый вал и опор под распределительный вал происходит снижение давления в главной масляной магистрали, падение мощности, увеличивается расход топлива и смазки, повышается вероятность проворачивания вкладышей, увеличивается износ шеек коленчатого и распределительного валов и т.д [5, 6, 46, 55, 58, 63, 79, 81, 87, 80, 83].

При ремонте двигателей отверстия блока цилиндров подвергаются сплошной дефектации, и от качества проведенных работ зависит дальнейшая работа двигателя в целом после ремонта, так как, например, проворачивание вкладышей в результате пропуска бракованного блока на сборку приведет к отказу потребителя и гарантийному ремонту [18, 72, 57]. Или, наоборот, забракование годного блока цилиндров в результате наличия погрешности измерений приведет к покупке нового блока цилиндров в качестве запасной части. В обоих случаях происходит удорожание ремонта, а в первом – еще и формируются потери от простоя техники у потребителя [41, 45, 55, 56, 58, 66, 80, 87].

Данная работа посвящена метрологическому обеспечению контроля отверстий блока цилиндров в ремонтном производстве с позиции снижения рисков от неправильного забракования и неправильного принятия блоков цилиндров из-за наличия погрешности измерения у применяемых для этой цели нутромеров.

**Степень разработанности.** Большой вклад в исследования проблем эффективности и качества ремонта сельхозтехники внесли многие отечественные ученые, такие как Величко С.А., Голубев И.Г., Денисов В.А., Дидманидзе О.Н., Ерохин М.Н., Иванов А.И., Карепин П.А., Кряжков В.М., Кушнарев Л.И., Левшин А.Г., Леонов О.А., Михлин В.М., Пучин Е.А., Рыжков А.И., Сенин П.В., Тимохин

С.В., Фатхутдинов Р.А., Халфин М.А., Черноиванов В.И., Шкаруба Н.Ж. и др [49, 50, 54, 67, 80, 86, 87, 81, 39, 42].

Вопросы выбора критериев и практических рекомендаций по метрологическому обеспечению операций контроля в ремонтном производстве находятся в непрерывном улучшении, но часть из них решена не полностью [59, 37, 36, 35, 34, 33, 32, 89, 90, 11].

**Цель работы** – повысить качество контроля отверстий блока цилиндров двигателя ЯМЗ с помощью нутромеров.

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

1. Усовершенствовать методику и разработать алгоритм выбора нутромеров для контроля отверстий блока цилиндров в условиях ремонтного производства.

2. Разработать рекомендации по проведению оценки погрешности нутромеров путем многократных измерений образцовой меры, равной контролируемому размеру.

3. Выявить наиболее рациональные нутромеры для дефектации отверстий блока цилиндров – коренных опор и втулок распределительного вала по величинам оценки количества неправильно принятых и неправильно забракованных деталей.

4. Определить потери от ошибок первого и второго рода и рассчитать экономический эффект от использования более точного нутромера.

**Объект исследований.** Средства измерений для контроля отверстий блока цилиндров при ремонте.

**Предмет исследований.** Ошибки первого и второго рода при контроле отверстий блока цилиндров.

**Научная новизна.** Получены математические зависимости случайной погрешности измерений от числа наблюдений для трех видов нутромеров – с рычажной передачей, с клиновой передачей и трехточечного. На основании анализа зависимостей установлено, что достаточно проводить 25 измерений для достоверной оценки рассеяния погрешности нутромеров. Получены математические зависимости потерь от ошибок первого и второго рода, а также стоимости нутромеров от погрешности измерений. Установлено, что наиболее целесообразным для контроля

отверстий является использование самого высокоточного нутромера из всех имеющихся средств измерений.

**Теоретическая значимость** заключается в усовершенствовании методики выбора средств измерений применено к использованию нутромеров для дефекации и контроля отверстий в условиях ремонтного производства. Установлено преобладающее влияние погрешности универсальных средств измерений – нутромеров в виде ошибок контроля над стоимостью средств измерений.

**Практическая значимость работы** заключается в следующих результатах:

выявлено, что при контроле отверстий коренных опор  $\varnothing 116^{+0,021}$  и втулок распределительного вала  $\varnothing 54^{+0,03}$  блока цилиндров двигателя ЯМЗ-238 в общей величине суммарных издержек определяющее значение имеют потери, на величину которых оказывает стоимость блока цилиндров и трудоемкость работ по замене блока цилиндров на новый;

установлено, что наиболее целесообразным для контроля отверстий является использование нутромера типа НИ в комплекте цифровым индикатором, имеющим дискретность отсчета 0,1 мкм и погрешность измерения  $\pm 2$  мкм, либо нутромер с цифровым индикатором часового типа ИЧЦ при настройке по установочным кольцам с точностью отсчета 0,001 мм и погрешностью измерений  $\pm 3,5$  мкм.

проведена оценка экономической эффективности использования нутромеров в ремонтном производстве при контроле высокоточных отверстий блока цилиндров.

**Методология и методы исследований.** Для обработки экспериментальных данных применялись методы теории вероятностей и математической статистики, а также элементы теории метрологии и метрологического обеспечения производства.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Методика выбора нутромеров для контроля отверстий в ремонтном производстве, базирующаяся на анализе потерь от погрешности измерений и стоимости средств измерений.

2. Результаты выбора средств измерений для контроля отверстий блоков цилиндров - нутромер типа НИ в комплекте цифровым индикатором, имеющим дискретность отсчета 0,1 мкм и погрешность измерения  $\pm 2$  мкм, либо нутромер с

цифровым индикатором часового типа ИЧЦ при настройке по установочным кольцам с точностью отсчета 0,001 мм и погрешностью измерений  $\pm 3,5$  мкм.

3. Полученные зависимости для оценки брака первого и второго рода в виде потерь от неправильного забракования и принятия блоков цилиндров от погрешности измерений нутромерами с разными индикаторными головками.

**Достоверность результатов исследований.** Исследования проводились в соответствии с современными математическими и метрологическими методиками, описанными в действующих нормативных документах и стандартах ГОСТ 8.051-81 и РД 50-98-86. Результаты исследований, опубликованные в независимых источниках, согласуются с данными полученными другими учеными, и прошли апробацию в печати.

**Реализация результатов работы.** Результаты диссертационной работы внедрены в практическую деятельность на предприятии технического сервиса ООО «Оптимум авто» и заводе – изготовителе сельскохозяйственной техники ООО «Завод «Агромаш».

**Личный вклад автора в решение поставленных задач** заключается в постановке задач исследований, участие в проведении теоретических и экспериментальных исследований, расчете и интерпретации полученных результатов, подготовке публикаций по выполненной работе.

**Апробация результатов исследований.** Основные положения диссертационной работы доложены, обсуждены и одобрены на конференциях:

Чтения академика В. Н. Болтинского : Сборник статей, Москва, 22–23 января 2025 года. – Москва: ООО «Сам Полиграфист», 2025;

Наука, технологии, общество: Экологический инжиниринг в интересах устойчивого развития территорий (НТО-VI-2025) : сборник научных статей по материалам VI Всероссийской (национальной) научной конференции, Красноярск, 06–07 ноября 2025 года. – Красноярск: Общественное учреждение "Красноярский краевой Дом науки и техники Российского союза научных и инженерных общественных объединений", 2025. – DOI 10.47813/nto.6.2025.1001;

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.

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.

Реинжиниринг и цифровая трансформация эксплуатации транспортно-технологических машин и робото-технических комплексов : Сборник статей Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, Москва, 19–20 декабря 2023 года. – Москва: Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева, 2023.

Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении : IV Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием: сборник докладов, Тула, 18–20 апреля 2023 года. – Тула: Тульский государственный университет, 2023.

Чтения академика В. Н. Болтинского, Москва, 25–26 января 2023 года. Том 2. – Москва: ООО «Сам полиграфист», 2023.

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. 312-314.

Сборник трудов, приуроченных к 75-ой Всероссийской студенческой научно-практической конференции, посвященной 150-летию со дня рождения

Е. А. Богданова, Москва, 14–17 марта 2022 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Мегаполис", 2022. – С. 52-53.

Чтения академика В. Н. Болтинского, Москва, 25–26 января 2022 года. Том Часть 2. – Москва: ООО «Сам полиграфист», 2022.

**Публикации.** Научные результаты диссертации опубликованы в виде 9 научных работ, из этих работ 2 статьи в Scopus и 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка используемых 91 источников литературы, и 1 приложения. Объем диссертационной работы – 127 страниц, 28 таблиц и 33 рисунка.

# **1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ**

## **1.1 Метрологическое обеспечение машиностроительного и ремонтного производства**

Современное состояние агропромышленного комплекса Российской Федерации определяется стратегическими документами, среди которых ключевое место занимает «Стратегия развития сельскохозяйственного машиностроения России на период до 2030 года» [4, 39, 87, 88]. Согласно этому документу, к указанному сроку доля отечественных производителей сельскохозяйственной техники на внутреннем рынке должна составить не менее 80%, а объём производства – увеличиться в денежном выражении в три раза [87, 88]. Достижение этих целей невозможно без обеспечения высокого качества не только новой, но и восстановленной техники, поскольку ресурс отремонтированных машин в среднем составляет лишь 40–80% от ресурса новых [64, 50, 45, 72]. При этом отказы техники в период полевых работ приводят к значительным экономическим потерям для сельхозпроизводителей, что подчеркивает критическую важность качества ремонтного производства [80, 87, 52, 49, 75, 91].

Одним из ключевых факторов, определяющих качество ремонта, является уровень метрологического обеспечения (МО) [11]. Как справедливо отмечает О.А. Леонов [53], «между качеством продукции и качеством измерений существует непосредственная связь» [87, 88]. На предприятиях, где измерительное дело налажено, качество продукции и услуг, как правило, оказывается выше. И, наоборот, там, где качество измерений не отвечает метрологическим требованиям, нельзя ожидать высокого уровня качества продукции [87, 88]. Эта взаимосвязь особенно актуальна для ремонтного производства, где от точности измерений зависит не только соответствие деталей техническим требованиям, но и надёжность всего агрегата в процессе эксплуатации [17].

В последние годы в отечественной практике наблюдается переход от функционального к процессному подходу в управлении качеством и метрологическим обеспечением [14, 30, 40, 88, 54, 75, 91]. Этот подход, закреплённый в стандартах ГОСТ Р ИСО 10012-2008 «Системы менеджмента измерений. Требования к измерительным процессам и измерительному оборудованию» [31] и ГОСТ Р ИСО 9001-2015 «Системы менеджмента качества. Требования» [38], рассматривает МО как совокупность взаимосвязанных процессов, управляемых по циклу PDCA (Plan–Do–Check–Act) [87, 88]. В докторской диссертации Н.Ж. Шкарубы предложена функциональная модель системы управления метрологическим обеспечением измерений (СУМОИ) на основе нотации IDEF0, что позволяет системно подходить к совершенствованию измерительных процессов на ремонтных предприятиях [87, 88]. Эта модель включает пять групп процессов высшего уровня: планирование СУМОИ, управление ресурсами, метрологическое обеспечение измерений, оценка результатов деятельности и анализ с целью улучшения [87, 88, 11].

Несмотря на наличие нормативной базы и научных разработок [87, 45, 56, 81], на практике ремонтные предприятия АПК сталкиваются с рядом организационных и технических проблем. Среди них можно выделить: низкий уровень методического обеспечения, недостаточную квалификацию кадрового состава, несоответствие структуры метрологической службы современным требованиям, недофинансирование, несоответствие погрешностей рекомендуемых средств измерений контролируемым допускам, а также применение средств измерений и контроля без метрологического подтверждения пригодности [41, 80, 87, 88, 11]. Эти проблемы особенно обостряются при контроле ответственных параметров, таких как линейные размеры отверстий в корпусных деталях двигателей, от точности которых напрямую зависит надёжность и долговечность агрегата [5, 67, 68, 17].

Особую сложность представляет метрологическое обеспечение косвенных измерений, которые широко применяются при ремонте двигателей

[15]. К таким измерениям относятся контроль мощности, массы деталей при комплектовании шатунно-поршневой группы, а также определение отклонений формы и расположения поверхностей (овальности, конусообразности) [8, 87, 88, 47, 44]. В отличие от прямых измерений, погрешность косвенных измерений зависит не только от характеристик, используемых СИ, но и от методики расчёта искомой величины. Например, овальность определяется как половина разности наибольшего и наименьшего диаметров детали, что формально является косвенным измерением [87, 88]. В технической документации на ремонт двигателей часто отсутствуют рекомендации по выбору СИ для таких измерений и не нормирована допускаемая погрешность, что приводит к произвольному выбору оборудования и снижению достоверности контроля [13, 21, 48, 66, 70, 84, 87].

Анализ технологического процесса ремонта двигателей позволил выявить ключевые точки формирования экономических потерь, связанных с погрешностью измерений [74, 87, 88]. К ним относятся:

дефектация деталей: ошибки при сортировке деталей на годные, требующие ремонта и негодные;

контроль после восстановления: ошибки при двустороннем допусковом контроле отремонтированных деталей;

входной контроль новых запасных частей: ошибки при комплектовании деталей, узлов и агрегатов;

приемо-сдаточные испытания: ошибки при контроле мощности и других параметров отремонтированного двигателя.

На каждом из этих этапов погрешность измерений может привести к двум типам ошибок: ошибке первого рода (неправильному забракованию годной детали) и ошибке второго рода (неправильному принятию бракованной детали) [50, 51, 58]. Экономические последствия этих ошибок различны. Ошибка первого рода ведёт к необоснованным затратам на восстановление или замену годной детали. Ошибка второго рода, в свою очередь, может привести к гораздо более серьёзным последствиям: выходу из строя агрегата

на этапе обкатки или даже в процессе эксплуатации у конечного потребителя, что влечёт за собой затраты на гарантийный ремонт, штрафы, рекламации и утрату репутации предприятия [52, 88].

Таким образом, уровень метрологического обеспечения измерений на предприятии напрямую влияет на качество продукции и услуг. В связи с этим, совершенствование метрологического обеспечения, особенно в части рационального выбора средств измерений для контроля критически важных параметров, таких как размеры отверстий в двигателях, является актуальной задачей, от решения которой во многом зависит качество и конкурентоспособность отечественных ремонтных предприятий АПК.

## **1.2 Анализ существующих методов выбора средств измерений**

Выбор СИ является комплексной задачей, на решение которой влияет множество факторов: метрологические характеристики (пределы измерений, цена деления, предельная погрешность), конструктивные особенности объекта контроля, требования к точности, объем производства, квалификация персонала и, конечно, экономические показатели [3, 13, 86, 84, 77, 67, 68]. Существующие методы можно условно разделить на несколько групп.

### **1.2.1 Выбор по коэффициенту уточнения (коэффициенту запаса точности)**

Этот метод является одним из самых распространенных и простых. Его суть заключается в сравнении точности СИ и точности изготовления (или восстановления) контролируемой детали [12, 9, 80, 17, 37]. Коэффициент уточнения  $k_T$  определяется как отношение допуска на изготовление  $T$  к нормативной погрешности измерения  $[\Delta_{\text{изм}}]$  [11]:

$$k_T = \frac{T}{2[\Delta_{\text{изм}}]} \quad (1.1)$$

Значения  $k_T$  варьируются от 1,5 до 10. Для ответственных параметров рекомендуется использовать верхнюю границу, для менее важных – нижнюю. Например, при контроле технологических процессов часто используется  $k_T=3\dots6$ , что соответствует погрешности измерения 16,7...33,3% от допуска [37]. Согласно ГОСТ 8.549-86, для линейных размеров  $[\Delta_{\text{изм}}]$  принимается равной 20...35% от  $T$ , что соответствует  $k_T=2,5\dots1,4$ .

Недостатки метода:

Отсутствие экономической составляющей. Метод не учитывает стоимостные характеристики СИ и потенциальные потери от ошибок контроля. Выбор СИ с  $k_T=10$  для неответственного параметра приведет к неоправданным капитальным затратам.

Статичность. Не учитывает изменчивость процесса и объем производства. Для мелкосерийного ремонта применение дорогостоящего высокоточного СИ может быть экономически нецелесообразно.

Упрощенность. Не рассматривает вероятностную природу погрешностей измерения и контролируемых параметров, что не позволяет оценить реальный риск ошибок первого и второго рода.

### 1.2.2 Выбор по допускам рабочих предельных калибров

Этот метод основан на допущении, что результаты измерений универсальными СИ не должны выходить за границы поля допуска на величину, большую, чем возможные погрешности контроля этими же деталями рабочими предельными калибрами [36]. Расчетная предельная погрешность измерений  $\Delta_{lim}$  определяется по формуле [70]:

$$\Delta_{lim} = \sqrt{\left(\frac{T}{2}\right)^2 + l_{max}^2 \cdot k_z^2}, \quad (1.2)$$

где  $l_{max}$  – наибольший выход полей допусков калибров за границы поля допуска контролируемого размера,  $k_z$  – коэффициент, зависящий от принятой вероятности  $\alpha$ .

Недостатки метода:

Ориентация на калибры. Метод изначально разработан для сравнения с калибрами, которые сами по себе имеют значительные погрешности и не позволяют получить количественную информацию о размере детали.

Сложность расчетов. Требует знания параметров калибров, что не всегда применимо при выборе универсальных СИ.

Недостаточная точность. Не обеспечивает высокой достоверности контроля для ответственных соединений.

### 1.2.3 Выбор по принципу безошибочности контроля

Основная идея этого метода заключается в ограничении вероятностей ошибок первого рода (браковка годных деталей –  $P_I$ ) и второго рода (принятие бракованных деталей –  $P_{II}$ ) [35]. Цель – добиться их минимальных значений. Однако полное исключение погрешности измерения невозможно, поэтому на практике устанавливаются приемлемо малые значения  $P_I$  и  $P_{II}$ . Вероятность безошибочного контроля  $N_0$  определяется как [17]:

$$N_0 = 1 - P_I - P_{II}, \quad (1.3)$$

Недостатки метода:

Высокая стоимость. Для достижения очень малых значений  $P_I$  и  $P_{II}$  требуется применение СИ с исключительно высокой точностью, что экономически нецелесообразно для большинства ремонтных операций.

Сложность реализации. Требует сложных расчетов вероятностных характеристик, знания законов распределения контролируемых параметров и погрешностей измерений, что в условиях ремонтного предприятия зачастую затруднительно.

#### **1.2.4 Выбор средств измерений по технико-экономическим показателям**

Этот подход к выбору средств измерений пытается связать точность измерений с удельными издержками на контрольные операции [8, 34, 17].

Целевая функция минимизации суммарных издержек  $G$  представлена как [76]:

$$G = B(\sigma) + C(\sigma) \rightarrow \min, \quad (1.4)$$

где  $B(\sigma)$  – затраты на измерения,  $C(\sigma)$  – дополнительные издержки из-за погрешности измерений (например, расходы на устранение последствий отказов).

Недостатки метода:

Упрощенные зависимости. Функции  $B(\sigma)$  и  $C(\sigma)$  часто задаются в виде гиперболических или квадратичных зависимостей, что не всегда отражает реальную картину. Например, функция потерь от погрешности измерений может быть несимметричной и иметь сложный вид.

Отсутствие учета специфики ремонта. Метод разработан преимущественно для серийного производства новых изделий и не учитывает особенности дефектации и контроля изношенных деталей, где зона рассеяния размеров значительно шире и смещена относительно поля допуска

#### **1.2.5 Современный подход: технико-экономическая оптимизация по критерию минимизации суммарных потерь**

Анализ вышеизложенных методов показывает, что ни один из них в чистом виде не удовлетворяет требованиям современного ремонтного производства. Наиболее перспективным направлением является разработка и применение комплексных методик, которые учитывают, как технические, так и экономические аспекты выбора СИ. В этом контексте особое значение имеют диссертационные исследования А.Р. Журавлевой [43] и Н.Ж. Шкарубы [87, 88], предложившие методики, основанные на минимизации суммарных годовых издержек на измерительный процесс.

Суть подхода, разработанного в указанных работах, заключается в следующем. Суммарные годовые издержки  $\Sigma И_{Г}$  на измерения складываются из двух основных компонентов:

1. Годовых затрат на измерения ( $\Sigma З_{Г}$ ). Включают в себя амортизационные отчисления, затраты на поверку, заработную плату контролеров, затраты на энергоресурсы и материалы.

2. Годовых потерь от погрешности измерений ( $\Sigma П_{Г}$ ). Включают в себя потери, возникающие из-за ошибок контроля:

2.1 Потери от неправильного забракования годных деталей (ошибки первого рода).

2.2 Потери от неправильного принятия бракованных деталей (ошибки второго рода), которые могут проявиться на последующих этапах (комплектация, сборка, обкатка, эксплуатация у потребителя) в виде затрат на переделку, рекламации, утраты репутации.

Математически это выражается формулой [43]:

$$\Sigma И_{Г} = \Sigma З_{Г} + \Sigma П_{Г} \rightarrow \min . \quad (1.5)$$

Журавлева А.Р. в своей диссертации [43] детально проработала методику расчета как затрат, так и потерь для условий ремонта двигателей. Она предложила конкретные формулы для расчета потерь при контроле шатунных и коренных опор, учитывая стоимость деталей, затраты на устранение дефектов и вероятности ошибок, которые зависят от погрешности применяемого СИ. В результате анализа было показано, что для контроля шатунных опор, имеющих относительно низкую стоимость, наиболее целесообразно использовать индикаторные нутромеры с измерительными головками МИГ-1 или МИГ-2, так как в этом случае суммарные издержки минимальны. Для контроля более дорогостоящих коренных опор (блоков цилиндров) потери от ошибок контроля становятся определяющими, и оптимальным выбором оказывается высокоточная электронная пробка ЦДЗМ, несмотря на ее высокую стоимость [43].

Профессор Шкаруба Н.Ж. в своей докторской диссертации [88]

развивает и углубляет этот подход. Она предлагает комплексную методику технико-экономического обоснования выбора универсальных СИ не только для свободных размеров, но и для допускового контроля размеров деталей, образующих соединения (например, отверстие-вал). Ее методика включает в себя:

1. Исследование вероятностных характеристик измерительного процесса.
2. Расчет годовых потерь от погрешности измерения.
3. Технологию выбора пары СИ для контроля размера отверстия и размера вала с учетом их взаимного влияния на качество сборки.

Особую ценность представляет разработанная профессором Шкарубой Н.Ж. [87, 88] компьютерная программа для расчета вероятностных характеристик рассеяния действительных зазоров и натягов в соединениях, что позволяет количественно оценить влияние погрешности измерения на качество сборки и, как следствие, на надежность двигателя.

Эффективность предложенного подхода наглядно демонстрируют графические зависимости [88]. На рисунке 1.1 (см. ниже) показаны суммарные годовые издержки при контроле деталей, образующих соединение «коренная шейка коленчатого вала, восстановленного под 1-й ремонтный размер – коренная опора в сборе с ремонтным вкладышем». На рисунке 1.2 (см. ниже) – аналогичные зависимости для соединения «коренная шейка нового коленчатого вала – коренная опора в сборе с новым вкладышем».

Анализ графиков показывает, что использование нутромера НИЦ 160-0,002 и рычажной скобы СР-125-0,002 позволяет минимизировать суммарные издержки. При этом для новых деталей они составляют 80 421 руб., а для ремонтных – 269 295 руб. Замена менее точных базовых средств измерения на указанные более точные позволила получить значительный экономический эффект: 262 805 руб. для ремонтных деталей и 157 546 руб. для новых, что в сумме составляет 420 351 руб. при программе ремонта 100 двигателей. Этот эффект достигается за счет снижения потерь от погрешности

измерения на 47% и суммарных годовых издержек на 45% [87].

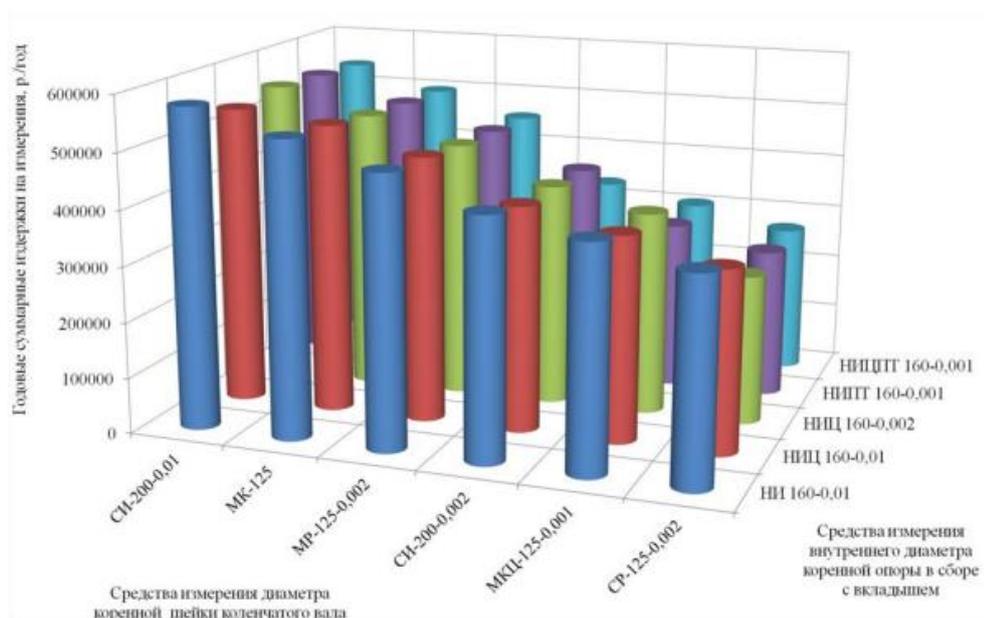


Рисунок 1.1 – Суммарные годовые издержки измерительного процесса деталей, образующих соединение «коренная шейка коленчатого вала, восстановленного под 1-й ремонтный размер – коренная опора в сборе с ремонтным вкладышем» двигателей ЯМЗ-238 [87]

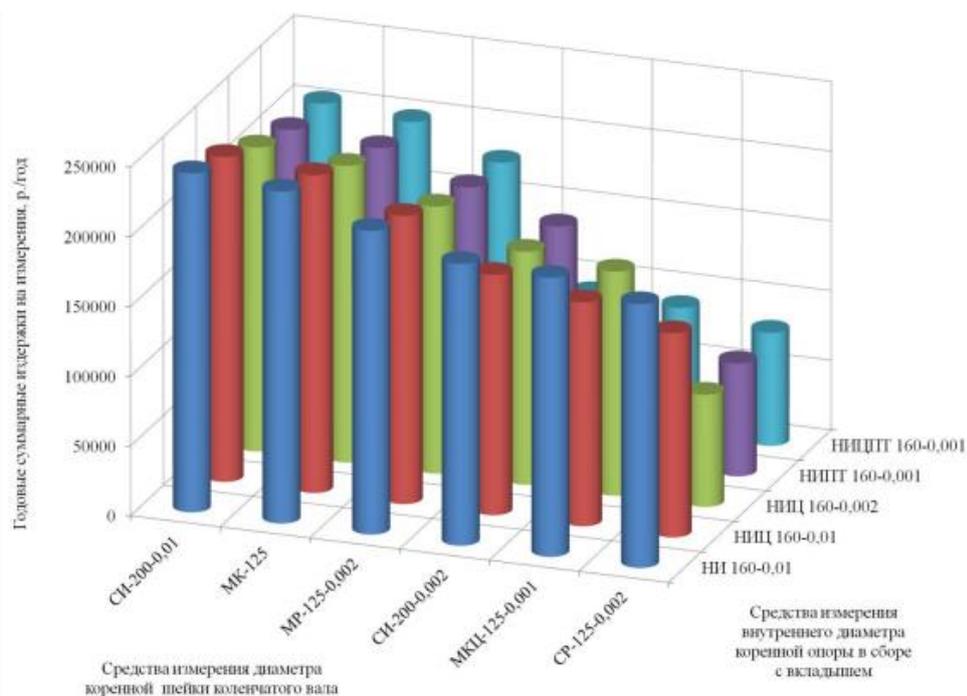


Рисунок 1.2 – Суммарные годовые издержки измерительного процесса деталей, образующих соединение «коренная шейка нового коленчатого вала – коренная опора в сборе с новым вкладышем» двигателей ЯМЗ-238 [87]

## 1.2.6 Средства измерения при контроле и дефектации отверстий

Дефектация – один из ключевых этапов технологического процесса капитального ремонта двигателей сельскохозяйственной техники, от качества которого напрямую зависят надёжность, долговечность и ресурс отремонтированного агрегата [45, 56, 19, 81]. В ходе дефектации детали подвергаются всестороннему контролю с целью определения их технического состояния и последующей сортировки на три категории: годные к дальнейшей эксплуатации, требующие восстановления и негодные (подлежащие утилизации) [88, 57]. Особую сложность представляет контроль внутренних линейных размеров, в первую очередь – отверстий в корпусных деталях (блок цилиндров, картер маховика и др.), поскольку именно от их геометрической точности зависит правильность сборки подшипниковых узлов коленчатого вала и, как следствие, динамическая устойчивость двигателя в целом.

В отличие от условий серийного производства новых изделий, где контролируемые параметры, как правило, распределены симметрично относительно номинального размера и укладываются в узкое поле допуска, дефектация характеризуется рядом специфических особенностей, которые необходимо учитывать при выборе средств измерений (СИ) [4, 45, 56, 85]:

Широкая зона рассеяния размеров. Изношенные детали имеют значительный разброс действительных размеров, который может превышать поле допуска на изготовление в несколько раз.

Смещение центра группирования. Центр рассеяния изношенных размеров, как правило, смещён в сторону увеличения диаметра (для отверстий) и часто выходит за пределы поля допуска, что делает классические методы контроля неприменимыми.

Односторонний характер контроля. При дефектации, в отличие от двустороннего допускового контроля, зачастую проверяется только один предельный размер – максимальный допустимый диаметр, за которым следует ремонт или списание.

Высокая стоимость ошибок контроля. Ошибка второго рода (пропуск бракованной детали) в условиях ремонта чревата не просто браком на линии, а выходом из строя всего двигателя уже в процессе обкатки или, что ещё хуже, в полевых условиях, что влечёт за собой значительные экономические потери и репутационный ущерб [20, 49].

Именно эти особенности обуславливают необходимость разработки специализированных подходов к выбору СИ для дефектации, отличающихся от рекомендаций, предназначенных для контроля новых деталей.

В работах ряда авторов, таких как И.С. Серый и И.Б. Каплун, предпринимались попытки адаптировать существующие методики к условиям ремонта. Так, И.С. Серый предлагал выбирать СИ по сумме допуска на износ и допуска на изготовление, однако, как справедливо отмечает Журавлева А.Р., «в подтверждение рекомендаций не приводится никаких доказательств» [43]. Более того, такой подход не учитывает критически важный фактор – гарантийный запас износа, необходимый для обеспечения ресурса детали до следующего ремонта.

Каплун И.Б. попытался уточнить этот момент, предложив в качестве критерия выбора СИ меньшую из двух величин: либо гарантийного запаса износа на один межремонтный период, либо суммы допусков. Однако и этот подход, по мнению Журавлевой А.Р. [35], остаётся неполным, поскольку «рекомендован для единичных измерений» и не учитывает статистическую природу износа и погрешности измерений в условиях реального ремонтного производства.

Таким образом, традиционные рекомендации, основанные на формальном сопоставлении погрешности СИ и поля допуска, оказываются несостоятельными в условиях дефектации. Анализ технических требований на капитальный ремонт двигателей (например, ЯМЗ-238) показывает, что рекомендуемые в них средства измерения (в основном – индикаторные нутромеры с погрешностью  $\pm 25$  мкм) зачастую не удовлетворяют даже базовому условию выбора СИ по ГОСТ 8.051–81, согласно которому

предельная погрешность измерения должна быть меньше допускаемой погрешности [26]. Это свидетельствует о том, что выбор СИ в ремонтной практике часто осуществляется на основе устаревших нормативов или даже интуитивно, без должного технико-экономического обоснования.

В связи с этим, как подчёркивает Журавлева А.Р., «необходима специальная методика выбора средств измерений для контроля отверстий, учитывающая особенности ремонтного производства» [43]. Такая методика должна уходить от формального подхода и переходить к оценке реальных экономических последствий применения того или иного СИ. Это означает, что критерием выбора должно служить не просто соответствие погрешности СИ некоему нормативному значению, а минимизация суммарных издержек, включающих как прямые затраты на измерительный процесс (стоимость прибора, поверка, труд контролёра), так и косвенные потери от ошибок контроля (стоимость восстановления годной детали, ущерб от выхода из строя двигателя из-за пропущенного брака).

Именно такой подход и был заложен в основу методики, разработанной Журавлевой А.Р., которая рассматривает дефектацию не как изолированную операцию, а как элемент единой системы метрологического обеспечения, где каждое решение по выбору СИ должно быть экономически обосновано и направлено на повышение общего качества и надёжности отремонтированной техники.

### **1.3 Анализ контрольно-измерительных средств, использующихся при метрологическом контроле отверстий в двигателях серии ЯМЗ-236/238**

Выпуск двигателя серий ЯМЗ-236/238 начался еще в 1958 г., в силу чего, их выпуск постепенно снижается уступая место, в пользу более современных двигателей [71]. Несмотря на это, высокая надёжность и ремонтпригодность позволили двигателям данной серии сохранить широкую распространенность по настоящее время, а сравнительно низкая стоимость обслуживания, при

высокой тяговой мощности обеспечивают им передовое место в сельскохозяйственной технике, рисунке 1.3. [71]. С другой стороны, большое количество тракторов и комбайнов со сроком службы более 10 лет находятся еще в эксплуатации на предприятиях АПК, и из этого следует, то что до сих пор основная часть производства, связанного с двигателями ЯМЗ-236/238, относится к выпуску запасных частей и комплектующих для ремонта, делая работу с данными двигателями актуальной задачей для ремонтных производств [62].



Рисунок 1.3 – Область применения двигателей ЯМЗ в технике для АПК [71]

При этом параметры точности составляющих деталей ремонтируемого двигателя, не редко отличаются от производственных, что существенным образом сказывается на метрологическом обеспечении [15]. Необходимость контролировать относительные геометрические параметры (размеры зазоров, отклонения формы и др.) и учитывать величину износа, является ключевым фактором при выборе средств измерений [5, 83]. На основе документации по ремонту двигателей серий ЯМЗ-236/238 [71, 81] определены контролируемые дефекты отверстий, их номинальные размеры и средства их контроля (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Контролируемые параметры и средства измерений деталей типа «отверстие» двигателей ЯМЗ-236/238

№	Дефект	СИ	Номинальный размер, мм	Размер без ремонта, мм
<b>Блок цилиндров в сборе</b>				
1	Деформация отверстий под гильзы цилиндров: нижнего; верхнего.	Нутромер НИ 100-160-1	151 <sup>+0,04</sup> <sub>-0,01</sub> 153 <sup>+0,04</sup> <sub>-0,01</sub>	151,20 153,08
2	Износ отверстий под вкладыши коренных подшипников	Нутромер НИ 100-160	116 <sup>+0,021</sup> <sub>-0,000</sub>	-
3	Износ отверстий втулок под шейки распределительного вала	Нутромер НИ 50-100	54 <sup>+0,03</sup> <sub>-0,00</sub>	-
4	Износ отверстий под подшипники вала ведомой шестерни топливного насоса: внутреннего наружного	Нутромер НИ 50-100	52 <sup>+0,03</sup> <sub>-0,00</sub> 62 <sup>+0,03</sup> <sub>-0,00</sub>	- -
5	Износ отверстия втулки под ось толкателя	Нутромер НИ 18-50-1	22 <sup>+0,062</sup> <sub>+0,039</sub>	22,09
6	Ослабление посадки втулок распределительного вала	Нутромер НИ 50-100-1	68 <sup>+0,03</sup> <sub>-0,00</sub>	-
7	Ослабление посадки установочного штифта стартера	Нутромер НИ 6-10	9 <sup>-0,035</sup> <sub>-0,065</sub>	-
<b>Головка цилиндров в сборе</b>				
8	Износ отверстий направляющих втулок клапанов	Нутромер 10-18	12 <sup>+0,019</sup> <sub>-0,000</sub>	-
<b>Поршень</b>				
9	Износ отверстия под поршневой палец	Нутромер 50-100	50 <sup>+0,011</sup> <sub>+0,002</sub>	-
<b>Шатун в сборе</b>				
10	Износ отверстия втулки под поршневой палец	Нутромер 50-100	50 <sup>+0,040</sup> <sub>+0,031</sub>	-
11	Задиры или износ отверстия под вкладыши	Нутромер 50-100	93 <sup>+0,026</sup> <sub>-0,006</sub> после повторной сборки шатуна с крышкой	-

<b>Вал коленчатый</b>				
12	Износ отверстия под подшипник	Нутромер НИ 50-100-1	$52_{-0,03}^{-0,00}$ $62_{-0,03}^{-0,00}$	52,05 62,05
13	Ослабление посадки установочных штифтов	Калибр	$22_{-0,042}^{-0,019}$	-
14	Износ шпоночного паза	Калибр	$10_{-0,065}^{-0,015}$	10,00
<b>Шкив коленчатого вала</b>				
15	Износ отверстия под вал	Нутромер 50-100	$50_{-0,000}^{+0,039}$	-
16	Износ шпоночного паза	Калибр	$10_{+0,020}^{+0,075}$	-
<b>Маховик в сборе</b>				
17	Износ отверстия под установочный штифт	Нутромер 18-50	$22_{+0,007}^{+0,030}$	-
<b>Полукольцо упорного подшипника коленчатого вала</b>				
18	Износ поверхностей паза	Нутромер 6- 10	$7,5_{+0,015}^{+0,055}$	-
<b>Вал распределительный</b>				
19	Износ шпоночного паза по ширине	Калибр	$6_{-0,055}^{-0,010}$	6,02
<b>Коромысло клапана со втулкой</b>				
20	Износ рабочей поверхности втулки под ось толкателя	Нутромер 18-50	$25_{+0,008}^{+0,030}$	25,06
<b>Толкатель</b>				
21	Износ отверстия втулок под ось толкателя	Нутромер 18-50	$22_{+0,008}^{+0,030}$	-
<b>Корпус основной секции масляного насоса</b>				
22	Износ отверстий втулок под ось и вал	Нутромер НИ 10-18-1	$16_{+0,04}^{+0,06}$	-
23	Износ поверхности гнезд под шестерни	Нутромер НИ 18-50-1	$43_{+0,01}^{+0,05}$	-
<b>Корпус радиаторной секции масляного насоса</b>				
24	Износ отверстий втулок под ось и вал	Нутромер НИ 10-18-1	$16_{+0,04}^{+0,06}$	16,08
25	Износ поверхности гнезд под шестерни	Нутромер НИ 18-50-1	$43_{+0,01}^{+0,05}$	43,07
<b>Шестерня ведущая основной секции</b>				
26	Износ шпоночного паза	Калибр	$3_{-0,05}^{-0,01}$	-
<b>Шестерня ведущая радиаторной секции</b>				
27	Износ отверстия под ось или вал	Нутромер 18-50	$16_{+0,000}^{+0,027}$	16,04
<b>Шестерня промежуточная привода масляного насоса со втулкой</b>				
28	Износ отверстия втулки под ось	Нутромер 18-50	$35_{+0,000}^{+0,039}$	35,09
<b>Шестерня ведомая привода масляного насоса</b>				
29	Износ отверстия под вал	Нутромер 10-18	$16_{-0,034}^{-0,015}$	-
30	Износ шпоночного паза	Калибр	$3_{+0,010}^{+0,055}$	3,08

<b>Корпус масляного насоса</b>				
31	Износ поверхности гнезд под шестерни	Пробка	$43^{+0,05}_{+0,01}$	43,07
32	Износ поверхности отверстия втулки	Пробка	$18^{+0,077}_{+0,050}$	18,08
<b>Крышка масляного насоса</b>				
33	Износ поверхности отверстия втулки	Пробка	$18^{+0,077}_{+0,050}$	18,08
<b>Шестерня подачи масла ведущая</b>				
34	Износ шпоночного паза по ширине	Пробка	$3^{-0,01}_{-0,05}$	-
<b>Шестерня промежуточная привода масляного насоса</b>				
35	Износ поверхности втулки шестерни	Пробка	$35^{+0,039}_{+0,000}$	35,09
<b>Корпус фильтра</b>				
36	Износ отверстия под перепускной клапан	Нутромер НИ 18-50-1	$22^{+0,08}_{+0,04}$	22,10
<b>Корпус ротора со втулками</b>				
37	Износ отверстия втулок под ось	Нутромер 18-50	$16^{+0,019}_{+0,000}$	-
<b>Колпак ротора</b>				
38	Износ или деформация отверстия	Нутромер 18-50	$25^{+0,045}_{+0,000}$	-
<b>Шестерня ведомая привода топливного насоса</b>				
39	Износ шпоночного паза	Калибр	$6^{+0,065}_{+0,015}$	6,10
40	Износ посадочного диаметра	Нутромер 18-50	$25^{-0,014}_{-0,035}$	-
<b>Вал ведомой шестерни привода топливного насоса</b>				
41	Износ шпоночных пазов	Калибр	$6^{-0,010}_{-0,055}$	-
<b>Корпус водяного насоса Ж</b>				
42	Износ отверстия под подшипники	Нутромер НИ 50-100-1	$62^{+0,02}_{-0,01}$	-
<b>Корпус водяного насоса Д</b>				
43	Износ отверстия под подшипники	Нутромер НИ 50-100-1	$52^{+0,03}_{-0,00}$	-
<b>Валик водяного насоса</b>				
44	Износ шпоночного паза	Калибр	$3^{-0,006}_{-0,031}$	3,01
<b>Крыльчатка водяного насоса В2</b>				
45	Износ отверстия под валик водяного насоса	Нутромер 18-50	$19^{-0,020}_{-0,041}$	-
<b>Крыльчатка водяного насоса Г</b>				
46	Износ отверстия под валик водяного насоса	Нутромер 16-50	$16^{-0,021}_{-0,039}$	-
<b>Шкив водяного насоса</b>				
47	Износ шпоночного паза	Калибр	$3^{+0,055}_{+0,010}$	3,10
<b>Шкив привода водяного насоса</b>				
48	Износ отверстия под валик водяного насоса	Нутромер 18-50	$19^{-0,020}_{-0,041}$	-
<b>Шкив привода компрессора и генератора</b>				
49	Износ отверстия под шейку вала	Нутромер НИ 18-50-1	$25^{-0,027}_{-0,048}$	-
50	Износ шпоночного паза	Калибр	$6^{+0,078}_{+0,030}$	6,10

<b>Вал привода вентилятора</b>				
51	Износ шпоночного паза	Калибр	$6_{-0,042}^{-0,012}$	6,02
<b>Корпус привода вентилятора</b>				
52	Износ отверстий под подшипник: передний; задний.	Нутромер НИ 50-100-1	$52_{-0,01}^{+0,02}$	-
			$62_{-0,01}^{+0,02}$	-
<b>Диск нажимной сцепления</b>				
53	Износ отверстий под ось рычага	Нутромер 10-18	$10,8_{-0,000}^{+0,035}$	11,0
54	Износ пазов пружин под рычаги нажимного диска	Нутромер НИ 10-18-1	$16_{-0,06}^{+0,18}$	16,3

К основополагающей документации, применяемой при контроле, относится ГОСТ 25347-2013 [23], регламентирующий интервалы номинальных размеров, которыми руководствуются при работе с допусками и посадками, в рамках ЕСДП. Если переложить размеры дефектуемых отверстий на эти интервалы, то получится следующее (таблица 1.2):

Таблица 1.2 – Распределение размеров деталей типа «Отверстие» двигателей ЯМЗ по интервалам номинальных размеров ГОСТ 25347-2013

Интервал номинальных размеров по ГОСТ 25347-2013, мм		Количество значений попадающих в интервал
от	до	
0	3	5
3	6	5
6	10	4
10	18	11
18	30	11
30	50	8
50	80	10
80	120	2
120	180	2
Итого:		58

Как видно из таблицы (таблица 1.2), основными контрольно-измерительными приспособлениями при дефектации отверстий в двигателях ЯМЗ-236/238 являются нутромеры с различными диапазонами, большая часть размеров находится в интервалах 10...18 мм, 18...30 мм, 50...80 мм,

180-180 мм, также калибры и пробки, что делает средства измерений контролирующих геометрические параметр в данных диапазонах наиболее востребованными.

#### **1.4 Анализ средств измерений отверстий, применяемых при ремонте двигателей ЯМЗ**

Современное состояние парка сельскохозяйственной техники в Российской Федерации характеризуется постепенным обновлением подвижного состава за счёт введения в эксплуатацию машин, оснащённых двигателями нового поколения. Так, моделям семейства V-образных двигателей ЯМЗ-236/238/240, постепенно приходят на смену высокофорсированные дизели ЯМЗ-656/658/7601/7501 [39, 71]. Также идет производство новых рядных двигателей серии ЯМЗ-530 и ЯМЗ-656, такие как ЯМЗ-536, ЯМЗ-658, ЯМЗ-659 и их модификации. Эти двигатели устанавливаются на тяжёлую технику АПК, включая тракторы «Кировец» К-5, К-7, комбайны «Дон» и «Акрос», а также на специализированную технику для глубокой обработки почвы и перевозки зерна [65, 64].

Ключевым отличием двигателей серии 530/650 от предшественников является повышенная удельная мощность, уменьшенные габариты и масса, а также усиленные требования к точности изготовления и сборки ответственных соединений [1, 12, 46, 55, 58, 63]. Но допуски на диаметры коренных и шатунных опор блока цилиндров и коленчатого вала не были ужесточены по сравнению с ЯМЗ-238. Например, если для ЯМЗ-238 допуск на диаметр коренной опоры составляет 21 мкм, то для ЯМЗ-536 он стал 22 мкм (стал соответствовать 6-му качеству  $IT_6=22$  мкм в стандартном диапазоне размеров от 80 до 120 мм), то есть точность осталась прежней [71]. Это обстоятельство напрямую влияет на требования к метрологическому обеспечению как при производстве, так и при ремонте данных двигателей и позволяет воспользоваться действующим ГОСТ 8.051-81 [26], где для этого

диапазона размеров и допуска допускаемая погрешность измерений строго равна  $\pm 6$  мкм.

В условиях ремонтного производства контроль отверстий в блоке цилиндров приобретает ещё большую значимость [81]. Износ коренных опор приводит не только к увеличению зазора в подшипнике скольжения, но и к нарушению соосности, что вызывает вибрации, повышенный износ вкладышей и, в конечном итоге, задир шеек коленчатого вала [6, 71, 56]. В связи с этим, точность дефектации и контроля после восстановления становится критическим фактором, определяющим ресурс отремонтированного агрегата.

Однако анализ технической документации на капитальный ремонт двигателей ЯМЗ-536 и ЯМЗ-658 выявляет серьёзный дисбаланс: рекомендации по выбору средств измерений (СИ) зачастую не соответствуют допускаемой погрешности [19, 79]. В большинстве случаев в качестве базового средства для контроля внутренних диаметров по-прежнему предлагается использовать индикаторные нутромеры НИ 100-160-2 с предельными погрешностями в диапазоне  $\pm 10 \dots \pm 25$  мкм, причем погрешность зависит в том числе и от применяемого комплекта настройки и устройства нутромера [28, 73]. Применение такого СИ для контроля отверстия с допуском 22 мкм формально нарушает требования ГОСТ 8.051-81 [26], согласно которому предельная погрешность измерения должна составлять не более 35% от допуска, то есть не более  $\pm 6$  мкм. Таким образом, даже при идеальных условиях измерения (отсутствие систематических погрешностей, квалифицированный оператор) существует высокий риск ошибок контроля, особенно в условиях дефектации, где центр рассеяния размеров изношенных деталей смещён относительно поля допуска.

Эта проблема усугубляется тем, что на многих ремонтных предприятиях АПК до сих пор отсутствует чёткая методика выбора СИ, основанная на технико-экономическом обосновании [19, 73]. Выбор зачастую осуществляется по принципу «есть в наличии» или «дешевле», без учёта

потенциальных потерь от ошибок второго рода (пропуск брака). В то же время, стоимость блока цилиндров для двигателя ЯМЗ-536 в 2–3 раза превышает стоимость аналогичного блока для ЯМЗ-238, что делает потери от ошибок контроля ещё более значительными [71].

В этой связи, актуальным становится адаптация и применение современных методик выбора СИ, разработанных в работах А.Р. Журавлевой [43] и Н.Ж. Шкарубы [88], к условиям ремонта двигателей. Для этого необходимо провести анализ современного ассортимента отечественных средств измерений, которые способны обеспечить требуемую точность контроля отверстий с допусками по 6-му качеству.

На сегодняшний день на отечественном рынке представлены следующие основные типы СИ для контроля внутренних линейных размеров:

Индикаторные нутромеры с измерительными головками МИГ-1 и МИГ-2. Это классические универсальные СИ, широко распространённые на ремонтных предприятиях [16, 81]. Их предельная погрешность составляет  $\pm 13$  мкм (МИГ-1) и  $\pm 15$  мкм (МИГ-2) [28]. Хотя эти приборы дешевле и проще в эксплуатации, их погрешность всё ещё превышает допустимую для контроля отверстий с допуском 16 мкм.

Электронные (индуктивные) нутромеры и пробки. К этому классу относятся приборы, такие как ЦДЗМ, НИЦПТ 160-0,001, НИПТ 160-0,001, а также новые разработки отечественных предприятий, например, «Омега-М» и «Микрон-И». Эти приборы обладают значительно более высокой точностью: предельная погрешность составляет от  $\pm 0,5$  мкм до  $\pm 2$  мкм [28]. Они оснащены цифровыми индикаторами, что упрощает снятие показаний и позволяет проводить многократные измерения с автоматическим расчётом среднего значения и стандартного отклонения. Такие СИ полностью удовлетворяют требованиям ГОСТ 8.051-81 [26] для контроля отверстий 6-го качества.

Опико-электронные измерительные системы. Это наиболее современные и дорогостоящие решения, такие как OptiCell или отечественные аналоги на базе лазерных сканеров. Они позволяют не только измерять

диаметр, но и строить трёхмерную модель отверстия, определяя отклонения формы (овальность, конусообразность) и расположения (соосность). Однако их высокая стоимость и сложность в эксплуатации пока ограничивают их применение крупными ремонтными заводами и НИИ [40,84].

Для целей настоящего исследования, ориентированного на типовое ремонтное предприятие АПК, целесообразно ограничиться сравнением индикаторных нутромеров с механическими и цифровыми индикаторами и покажем, что применение микрометрического нутромера нецелесообразно.

Проведём сравнительный анализ этих СИ на примере контроля коренной опоры блока цилиндров двигателя ЯМЗ-536 (таблица 1.3). Номинальный диаметр отверстия –  $93,2^{+0,022}$  мм, допуск по техническим условиям – 22 мкм [24, 28, 25].

Таблица 1.3 – Сравнительный анализ средств измерений для контроля коренных опор блока цилиндров ЯМЗ-536

Наименование СИ	Тип	Диапазон измерений, мм	Цена деления, мкм	Предельная погрешность, мкм	Соответствие ГОСТ 8.051-81 ( $\delta = 6$ мкм)
Нутромер микрометрический НМ	Механический	75-175	10	$\pm 15$	Нет
Нутромер с индикатором часового типа ИЧ-10 при настройке по концевым мерам 2 кл.	Механический	100–160	10	$\pm 12$	Нет
Нутромер с индикатором часового типа ИЧ-10 при настройке по концевым мерам 1 кл.	Механический	100–160	10	$\pm 10$	Нет
Нутромер индикаторный НИ 100-160 с головкой МИГ-2	Механический	100–160	2	$\pm 8,5$	Нет
Нутромер индикаторный НИ 100-160 с головкой МИГ-1	Механический	100–160	1	$\pm 7,5$	Нет

Нутромер с цифровым индикатором ИЧЦ при настройке по концевым мерам 1 кл.	Электронный	100–160	1	$\pm 6,5$	Нет
Нутромер с цифровым индикатором ИЧЦ при настройке по установочным кольцам	Электронный	100–160	1	$\pm 3,5$	Да
Нутромер индуктивный НИЦПТ 160-0,001 при настройке по концевым мерам 1 кл.	Электронный	100–160	0,001	$\pm 5,5$	Да
Нутромер индуктивный НИЦПТ 160-0,001 при настройке по установочным кольцам	Электронный	100–160	0,001	$\pm 5,5$	Да
Электронная пробка ЦДЗМ	Электронный	5–500	0,1	$\pm 0,5$	Да

Анализ таблицы 1.3 наглядно демонстрирует, что электронные СИ способны обеспечить требуемую точность измерений. В свою очередь, применение микрометрического нутромера крайне нецелесообразно. Применение индикаторных нутромеров с механическими головками неизбежно приведёт к значительным погрешностям, которые, в свою очередь, спровоцируют ошибки при сортировке деталей на этапе дефектации и при контроле после восстановления. Использование электронной пробки, рекомендуемой в работе Журавлевой А.Р. [43], с метрологической точки зрения целесообразно, но такая высокая точность и такая высокая стоимость данного средства измерений вызывает сомнения. Да и еще электронная пробка будет куплена только под один конкретный размер, а индикаторный нутромер можно использовать для достаточно большого диапазона измерений.

Следовательно, переход на более точные СИ связан с увеличением прямых затрат на измерения, связанных с более высокой стоимостью прибора,

с необходимостью в калибровке в аккредитованных лабораториях, с повышенными требованиями к квалификации персонала. В то же время, как показали исследования Журавлевой А.Р. [43] и Шкарубы Н.Ж. [88], эти затраты могут быть с лихвой компенсированы за счёт снижения косвенных потерь.

Для двигателя ЯМЗ-536 стоимость нового блока цилиндров составляет порядка 350–400 тыс. рублей, а стоимость комплекта ремонтных вкладышей – около 20 тыс. рублей [78]. Потери от ошибки второго рода (пропуск изношенной опоры) могут выражаться в следующем:

Затраты на замену вкладышей после выхода двигателя из строя на обкатке – 20 тыс. руб.

Затраты на повторную расточку и хонингование блока – 50–70 тыс. руб.

Потери от простоя техники и упущенной выгоды – 100–200 тыс. руб.

Репутационные потери и рекламации – труднооценимы, но значительны.

Таким образом, даже однократный случай пропуска бракованной детали может превысить стоимость высокоточного электронного нутромера, который составляет в среднем 150–200 тыс. рублей [78].

Таким образом, для контроля ответственных отверстий в двигателях как старого, так и нового поколения, таких как ЯМЗ-236/238 и ЯМЗ-536, экономически целесообразно и технически необходимо применять высокоточные электронные головки в составе универсальных нутромеров индикаторных типа НИ. Это позволяет не только выполнить требования нормативной документации по достоверной оценке точности при дефектации и контроле, но и обеспечить высокое качество и надёжность отремонтированной техники, что является стратегической задачей для АПК России.

## 1.5 Выводы, цели и задачи исследований

1. Проведен обзор методик выбора средств измерений при допусковом контроле и установлено, что все они направлены на обеспечение точности измерений в 3...10 раз превышающей допуск контролируемого параметра. Такой подход позволяет в определённой мере гарантировать достоверность результатов измерений, но оценка метрологических рисков в виде определения ошибок первого и второго рода в ремонтном производстве практически не проводится. Только в современных работах д.т.н. Шкарубы Н.Ж. и к.т.н. Журавлёвой А.Р. были рассмотрены такие подходы.

2. Проведен анализ метрологического обеспечения средств измерений отверстий блока цилиндров на ремонтных предприятиях и установлено, что в технической документации на ремонт наблюдается нарушение условия выбора средств измерений по ГОСТ 8.051-81 и РД 50-98-86, так как для контроля отверстий коренных опор рекомендуется нутромер НИ 100-160 с индикатором ИЧ-10, который в лучшем случае, при настройке по концевым мерам 1 класса будет иметь погрешность  $\pm 10$  мкм, а допускаемая погрешность  $\delta = \pm 6$  мкм.

3. Особенностью ремонтных предприятий является тот факт, что они относятся по видам деятельности к предприятиям, оказывающим услуги, поэтому не то что поверка, как это требуется на машиностроительных предприятиях, даже калибровка средств измерений не является обязательной для деятельности такого вида. Это приводит к тому, что средства измерений, в том числе и нутромеры, не подвергаются никаким видам оценки погрешности измерений.

Исходя из вышеизложенного, необходимо решить следующие задачи:

1. Усовершенствовать методику и разработать алгоритм выбора нутромеров для контроля отверстий блока цилиндров в условиях ремонтного производства.

2. Разработать рекомендации по проведению оценки погрешности нутромеров путем многократных измерений образцовой меры, равной контролируемому размеру.

3. Выявить наиболее рациональные нутромеры для дефектации отверстий блока цилиндров – коренных опор и втулок распределительного вала по величинам оценки количества неправильно принятых и неправильно забракованных деталей.

5. Определить потери от ошибок первого и второго рода и рассчитать экономический эффект от использования более точного нутромера.

## 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

### 2.1 Теоретические основы оценки погрешности средств контроля линейных размеров при ремонте машин

Качество продукции машиностроительного производства напрямую зависит от уровня метрологического обеспечения [15]. При грамотной организации измерительных процессов предприятие способно выпускать продукцию, превосходящую аналоги по точности, надёжности и эксплуатационным характеристикам [2, 5, 14, 16, 19, 21, 22, 40, 41, 53].

Ключевым фактором, определяющим качество измерений, является их точность – совокупность свойств измерительного процесса, обеспечивающих получение результатов с требуемыми метрологическими характеристиками, в нужной форме и в установленные сроки [54]. В этой связи особое значение приобретает стандартизированная методология оценки точности [7, 15].

В Российской Федерации оценка точности методов и результатов измерений регламентируется стандартом ГОСТ Р ИСО 5725–2002, состоящим из 6 частей [32-37]. Появление данного стандарта обусловлено ростом требований рынка к достоверности измерительных данных и необходимостью ответить на фундаментальные вопросы: как количественно охарактеризовать качество измерений, как сравнивать эффективность методик или компетентность лабораторий, и насколько можно доверять зафиксированным результатам.

В рамках ГОСТ Р ИСО 5725 точность измерений характеризуется двумя независимыми параметрами:

- 1) правильность – степень близости результата измерения (или среднего значения ряда измерений) к истинному (или условно истинному, эталонному) значению. Количественно правильность выражается через систематическую погрешность [85];

2) прецизионность – степень сходимости независимых результатов при повторных измерениях в заданных условиях. Она отражает влияние исключительно случайных факторов и оценивается, как правило, стандартным (среднеквадратическим) отклонением. Зависимость прецизионности от условий проведения измерений делает целесообразным различение таких её характеристик, как повторяемость, воспроизводимость и сходимость [8, 23].

Экспериментальная оценка повторяемости и воспроизводимости регламентирована в ГОСТ Р ИСО 5725-2 [33], а методы определения правильности в ГОСТ Р ИСО 5725-4 [35].

В международной практике, особенно в автомобильной промышленности, широкое применение получил подход MSA (Measurement Systems Analysis) – комплексный анализ измерительной системы, направленный на оценку её пригодности для контроля качества. Для поставщиков автокомпонентов соответствие требованиям MSA является обязательным условием сертификации по стандарту IATF 16949 (преемнику ISO/TS 16949). В России данный подход частично адаптирован в ГОСТ Р 51814.5–2005 [30], который рекомендует статистические методы анализа измерительных и контрольных процессов и применяется при оценке их пригодности.

Важно отметить: хотя в России сертификация услуг по техническому обслуживанию и ремонту транспортных средств является добровольной [53], требования к качеству и безопасности отремонтированных изделий эквивалентны требованиям к новым [38, 53, 15]. В этих условиях достоверность измерительных данных становится критически важной как для обеспечения безопасности, так и для обоснования управленческих решений на ремонтных предприятиях. Однако, несмотря на высокую ответственность, в отрасли капитального ремонта машин до сих пор отсутствуют специализированные нормативные документы, регулирующие оценку качества измерительных процессов, что создаёт существенный пробел в метрологическом обеспечении.

Оценку качества измерений с экономической точки зрения можно проводить путем технико-экономического анализа целесообразности назначения допускаемой погрешности измерений  $\Delta \lim$  и оптимизации выбора средств измерений, рисунок 2.1. При завышении допускаемых погрешностей измерений  $\Delta \lim$  уменьшается стоимость средств измерений, но увеличиваются вероятности ошибок при измерениях, что в конечном итоге приводит к росту экономических потерь  $\Pi$ . При занижении допускаемых погрешностей  $\Delta \lim$  стоимость средств измерений возрастает, вероятность ошибок измерений уменьшается, но это может привести к росту затрат  $З$ , и соответственно, себестоимости выпускаемой продукции [88].

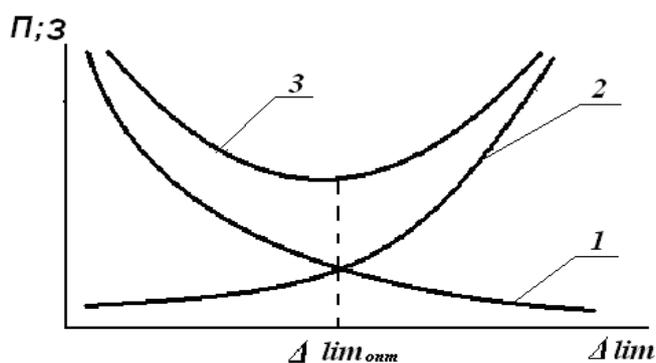


Рисунок 2.1 – Зависимость погрешности от затрат и потерь при измерении: 1– затраты на измерения ( $З$ ); 2 – потери от измерений ( $\Pi$ ); 3 – сумма затрат и потерь на измерения [88]

Экономически оптимальная точность измерений технологического параметра соответствует минимуму суммы потерь из-за погрешности измерений и затрат на измерения, включая затраты на метрологическое обслуживание средств измерений.

Экономически оптимальная точность измерений технологического параметра достигается при минимизации суммарных издержек ( $S$ ) – затрат на проведение и метрологическое обслуживание измерений ( $E$ ) и потерь, обусловленных неточностью полученных данных ( $L$ ). Минимум функции

суммарных издержек, определяемое по формуле (2.1), определяет рациональное значение допускаемой погрешности  $\Delta_{\text{рац}}$  [76].

$$S(\Delta) = E(\Delta) + L(\Delta), \quad (2.1)$$

Предположим, что зависимости затрат и потерь от погрешности измерений  $\Delta$  могут быть аппроксимированы степенными функциями [76]:

$$E(\Delta) = a_1 \cdot \Delta^{-b}, \quad b > 0, \quad (2.2)$$

$$L(\Delta) = a_2 \cdot \Delta^c, \quad c > 0, \quad (2.3)$$

где  $a_1, a_2 > 0$  – коэффициенты аппроксимации, отражающие удельные издержки и риски;  $b$  и  $c$  – эмпирические показатели чувствительности.

В таком случае минимум суммарных издержек будет достигаться при:

$$\frac{d}{d\Delta} [E(\Delta) + L(\Delta)] = 0 \rightarrow \frac{d}{d\Delta} (a_1 \times \Delta^{-b} + a_2 \times \Delta^c) = 0. \quad (2.4)$$

В результате дифференцирования функции получится:

$$-b \times a_1 \times \Delta^{-b-1} + c \times a_2 \times \Delta^{c-1} = 0 \rightarrow \Delta^{b+c} = \frac{b \times a_1}{c \times a_2}.$$

Следовательно, рациональная погрешность измерений определяется выражением:

$$\Delta_{\text{рац}} = \left[ \frac{(b \times a_1)}{(c \times a_2)} \right]^{\frac{1}{(b+c)}}. \quad (2.5)$$

Однако практическая реализация данного подхода сталкивается со следующими ограничениями:

погрешность измерительных средств дискретна, а не непрерывна: на рынке доступны только конкретные модели с фиксированными характеристиками точности;

зависимость стоимости средств измерений от их погрешности носит ступенчатый, а не гладкий характер – снижение погрешности на малую величину часто требует скачкообразного роста затрат (например, переход от штангенциркуля к оптическому компаратору);

возможны случаи не конгруэнтности «цена–погрешность»: при использовании различных физических принципов измерения (например,

контактный и бесконтактный метод) более точное средство может оказаться дешевле менее точного аналога.

Кроме того, процессы ремонта машин принципиально отличаются от серийного машиностроения с точки зрения измерений [10, 42]:

одна и та же методика и комплект средств контроля применяются для измерения как новых, так и изношенных деталей, что требует повышенной универсальности и адаптивности к изменяющимся геометрическим состояниям поверхностей;

в серийном производстве доминируют автоматизированные измерительные комплексы и контрольные автоматы (высокая точность, высокая стоимость, узкая специализация), тогда как в ремонтном производстве – преимущественно универсальные ручные и полуавтоматические средства измерений (штангенинструменты, микрометры, индикаторы и т.п.), рассчитанные на единичные или мелкосерийные операции.

Учёт этих особенностей подчёркивает необходимость разработки специализированной методики оценки качества измерительных процессов, адаптированной к условиям ремонтного производства, в том числе – с учётом экономического критерия оптимальности.

Таким образом, теоретический подход к оценке погрешности измерений базируется на получении математических зависимостей погрешности от затрат и потерь при измерении и их оптимизации по критерию минимума затрат. Но следует иметь в виду, что в мелкосерийном ремонтном производстве используются универсальные средства измерений, в отличие от машиностроения, поэтому стоимость универсальных средств измерений мала и не сопоставима с потерями, особенно при контроле базовых и высокотехнологичных деталей, таких как блок цилиндров, коленчатый вал, распределительный вал, головка блока цилиндров, шатуны и т.д. [13, 63, 79]. Поэтому при оценке качества метрологического обеспечения в ремонтном производстве главный упор следует делать на расчет потерь от брака первого

и второго рода, как инструмента оценки рисков при контроле и дефектации ответственных деталей.

## **2.2 Теоретические основы оценки брака первого и второго рода при измерениях**

В условиях ремонтного производства контроль линейных размеров носит вероятностный характер, поскольку на результаты измерений влияют как статистический разброс истинных размеров деталей (обусловленный износом и технологией ремонта), так и погрешности средств измерений (СИ) [21, 12, 86]. В отличие от серийного изготовления, где распределение размеров узкоцентрировано и стабильно, при ремонте наблюдается расширение поля рассеяния действительных размеров из-за неравномерного износа и ограничений восстановительных технологий. Это повышает вероятность ошибок при принятии решений о годности деталей.

Классическая оценка погрешности СИ (рассмотренная в п. 2.1) позволяет оценить максимальное отклонение измеренного значения от истинного [41, 85, 53], однако не даёт ответа на ключевой вопрос метрологического обеспечения: с какой вероятностью будет допущена ошибка при сортировке деталей? Ответ на этот вопрос требует перехода к вероятностной модели допускового контроля, в которой ошибки классифицируются как события первого и второго рода [10]:

ошибка первого рода (ложноположительная): годная деталь ошибочно отнесена к браку;

ошибка второго рода (ложноотрицательная): бракованная деталь ошибочно принята как годная.

В контексте ремонта машин АПК последствия этих ошибок различны [42, 45, 80]. Ошибка первого рода ведёт к неоправданному увеличению объёма восстановительных работ и росту себестоимости ремонта. Ошибка второго рода – к снижению надёжности восстановленной машины, вплоть до

аварийного отказа узла в эксплуатации (например, разрушения подшипниковой опоры из-за недопустимого зазора) [6].

Необходимо разработать теоретическую модель формирования брака при допусковом контроле деталей типа «отверстие», позволяющую количественно оценить вероятности ошибок первого и второго рода с учётом особенностей ремонтного производства и нормативных требований.

В метрологической теории контроля процесс принятия решения о годности детали традиционно формализуется как статистическая проверка гипотез:

$H_0$ : «Деталь годна» - истинный размер  $x$  лежит в пределах поля допуска:

$$D_{min} \leq x \leq D_{max};$$

$H_1$ : «Деталь бракованная» - истинный размер выходит за пределы допуска:

$$x < D_{min} \text{ или } x > D_{max}.$$

При таком подходе неизбежны два типа ошибок, впервые систематизированных в математической статистике Е. Нейманом и Э. Пирсоном и впоследствии адаптированных к задачам метрологического обеспечения в трудах В. А. Грановского и Н. Ф. Шляндина:

ошибка первого рода ( $\alpha$ -риск, риск поставщика): гипотеза  $H_0$  отвергается при её истинности – т.е. годная деталь ошибочно забракована;

ошибка второго рода ( $\beta$ -риск, риск потребителя): гипотеза  $H_0$  принимается при её ложности – т.е. бракованная деталь ошибочно принята.

В соответствии с РД 50-98-86 указанные риски количественно характеризуются следующими параметрами:

$n_1 = 100 \times P_{Г \rightarrow Д}$  – доля неправильно забракованных годных изделий, %

$m_1 = 100 \times P_{Д \rightarrow Г}$  – доля неправильно принятых дефектных изделий, %

где:  $P_{Г \rightarrow Д}$  - вероятность ошибки первого рода;  $P_{Д \rightarrow Г}$  - вероятность ошибки второго рода.

Важно подчеркнуть: в отличие от выборочного контроля (например, по ГОСТ Р ИСО 2859-1), где риски задаются априори через параметры плана контроля, при сплошном допусковом контроле, характерном для

ответственных узлов машин агропромышленного комплекса, величины  $P_{Г \rightarrow Д}$  и  $P_{Д \rightarrow Г}$  определяются объективными факторами:

характеристиками распределения контролируемого параметра в партии -  $f(x)$ ;

метрологическими свойствами применяемых средств измерений – в частности, плотностью распределения их погрешности  $\varphi(\gamma)$ ;

шириной и положением поля допуска относительно зоны неопределённости измерений.

Таким образом, указанные вероятности не могут быть назначены произвольно – они подлежат расчёту на основе математической модели измерительной процедуры.

Особую опасность в условиях ремонта техники представляет ошибка второго рода. Например, при восстановлении коренных опор блока цилиндров дизельного двигателя СМД-62 допустимый зазор в подшипнике, согласно ОСТ 37.001.088–81, составляет 0,07–0,12 мм. Принятие детали с фактическим зазором 0,18 мм вследствие суммарной погрешности измерений (например, при использовании индикаторного нутромера без учёта температурной компенсации и износа наконечников) может привести к недостаточному давлению масляного клина, перегреву вкладышей и их провороту уже в первые 20–30 моточасов эксплуатации. Подобные случаи систематически отмечаются в отраслевых обзорах надёжности восстановленной техники, в том числе в аналитических материалах, подготовленных специализированными испытательными центрами [20, 62].

В свою очередь, ошибка первого рода влечёт за собой необоснованный вывод из эксплуатации ещё работоспособных деталей [20, 69]. По данным отраслевой статистики, средняя стоимость комплексного восстановления корпусной детали (например, картера редуктора) в условиях ремонтных предприятий АПК составляет 12–18 тыс. руб., в то время как затраты на механическую обработку (расточка под ремонтный размер без наплавки) – лишь 3–5 тыс. руб. Следовательно, каждая избыточная замена детали из-за

ошибки контроля увеличивает прямые затраты на ремонт на 10–15 тыс. руб., что существенно влияет на экономическую эффективность восстановительных работ.

В метрологической практике допустимые уровни рисков при контроле устанавливаются с учётом ответственности соединения и последствий ошибок [6, 46]. Хотя единая классификация «классов ответственности» в форме «I/II/III» в действующих отечественных стандартах отсутствует, РД 50-98-86 вводит понятие категорий качества продукции и связывает с ними допустимые уровни рисков. В приложении Б документа приведены ориентировочные значения параметров  $n_1$  и  $m_1$  для различных групп изделий:

для изделий категории «А» (ответственные соединения, отказ которых влечёт аварию, травмы или значительный ущерб) рекомендуется:

$$n_1 \leq 0,5 \%, m_1 \leq 0,1 \%;$$

для изделий категории «Б» (средняя ответственность) -

$$n_1 \leq 2,0 \%, m_1 \leq 0,5 \%.$$

К категории «А», относятся соединения, определяющие безопасность и долговечность силовых агрегатов, включая подшипниковые опоры двигателей и трансмиссий сельскохозяйственных машин (например, коренные и шатунные шейки коленчатых валов, гнёзда подшипников в блоках цилиндров).

Таким образом, при ремонте машин, в частности – сельскохозяйственной техники, к метрологическому обеспечению производства предъявляются повышенные требования, сопоставимые с производством новых ответственных узлов и сборочных единиц. Особенно важно это учитывать, поскольку восстановленные детали зачастую эксплуатируются в условиях уже изношенных сопрягаемых элементов, что снижает общий запас надёжности по сравнению с новыми узлами.

Однако следует отметить, что указанные рекомендации не содержат методики расчёта  $n_1$  и  $m_1$  для конкретных измерительных процедур. Более

того, параметр  $c_1$  (как мера общей эффективности контроля) в РД 50-98-86 не вводится – его использование требует дополнительного обоснования.

На практике большинство технологических документов, включая Типовые технологические процессы на ремонт двигателей (ТТП Р-122–85) и Руководства по ремонту (РПР), ограничиваются требованием: «Погрешность применяемых средств измерений не должна превышать 0,15-0,25 допуска на контролируемый параметр» [21, 51, 62].

Хотя это правило обеспечивает приемлемый уровень рисков при нормальном распределении размеров и симметричной зоне неопределённости, оно не учитывает следующие факторы, типичные для ремонтного производства:

асимметрию и смещение распределения изношенных размеров (например, преимущественный износ в направлении увеличения зазора);

наличие систематической составляющей погрешности СИ (температурный дрейф, износ измерительных наконечников индикаторных приборов);

неравнозначность последствий ошибок первого и второго рода – для отверстий, ошибка второго рода может привести к аварии, тогда как ошибка первого рода лишь увеличивает затраты.

Следовательно, для научно обоснованного выбора средств измерений в условиях ремонта машин АПК необходим переход от эмпирических правил к вероятностной модели принятия решений, в которой значения  $P_{Г \rightarrow д}$  и  $P_{д \rightarrow Г}$  рассчитываются на основе:

функции плотности распределения контролируемого параметра  $f(x)$ ;

плотности распределения погрешности СИ  $\varphi(\gamma)$ ;

заданных границ допуска  $D_{min}, D_{max}$ .

Этот подход составляет теоретическую основу предлагаемой методики и развивается в последующих разделах.

### 2.3 Классификация брака в контексте объекта контроля типа «отверстие»

При ремонте машин АПК наиболее часто контролируются отверстия (гнезда подшипников, цилиндры, посадочные места в картерах) [42]. В отличие от валов, для отверстий технологически реализуема только односторонняя коррекция размера – увеличение (расточка, хонингование). Это приводит к принципиальному различию в классификации брака.

Рассмотрим отверстие с номинальным диаметром  $D_n$  и симметричным допуском  $TD$ . Границы поля допуска:

$$D_{min} = D_n - \frac{TD}{2}, D_{max} = D_n + \frac{TD}{2}.$$

Классификация исходов контроля приведена в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Классификация исходов контроля деталей типа «отверстие»

Состояние детали	Условие	Класс брака	Возможность восстановления
Годная	$D_{min} \leq D \leq D_{max}$	-	-
Реальный диаметр меньше минимального	$D < D_{min}$	Исправимый брак	Расточка под ремонтный размер (+0,25; +0,50; +0,75 мм)
Реальный диаметр больше максимального	$D > D_{max}$	Неисправимый брак	Снижение диаметра невозможно без наплавки/замены; экономически нецелесообразно в условиях ремонтных мастерских

В условиях ремонтных предприятий АПК оборудование для наплавки и последующей высокоточной обработки (например, станки с ЧПУ) встречается редко. Восстановление отверстия выполненного с превышение максимального диаметра требует:

- наплавки внутренней поверхности (риск деформации корпуса);
- предварительного обжига и правки;
- финишной расточки с точностью  $\pm 5$  мкм.

Себестоимость такого цикла может достигать 60–80 тыс. руб., что соизмеримо со стоимостью нового блока (для двигателя Д-240  $\approx$  75 тыс. руб.). В то же время устранение ошибок второго рода расточкой стоит 2–4 тыс. руб.

Анализ отказов восстановленных двигателей (СМД-60, Д-245) показывает, ошибка второго рода при измерениях гнёзд коренных опор  $> 0,05$  мм сверх  $D_{max}$  в 90 % случаев приводит к провороту вкладышей в первые 50 моточасов. При этом вероятность экономически оправданного восстановления такого блока – менее 8 %.

Отсюда следует асимметрия последствий ошибок:

Ошибка первого рода (годная деталь, но забракованная при  $D < D_{min}$ ) необоснованная замена  $\rightarrow$  издержки 45–60 тыс. руб.;

Ошибка второго рода (бракованная деталь, но принятая при  $D > D_{max}$ )  $\rightarrow$  временная экономия, но высокий риск аварии.

Эта асимметрия подтверждает необходимость отдельной оценки вероятностей ошибок и дифференцированного назначения допустимых рисков – например, для отверстий целесообразно жёстко ограничивать  $P_{д \rightarrow г}$ , даже ценой увеличения  $P_{г \rightarrow д}$ .

Для количественной оценки рисков при допусковом контроле отверстий введём следующие обозначения:

$x$  – истинный (действительный) диаметр отверстия;

$f(x)$  – плотность распределения случайной величины  $x$ ;

$\gamma$  – случайная погрешность измерения, обусловленная средством измерений (СИ);

$(\gamma)$  – плотность распределения погрешности  $\gamma$ ;

$x^* = x + \gamma$  - измеренное значение диаметра.

Будем считать, что СИ прошли поверку и откалиброваны, а внешние условия (температура, влажность, чистота поверхностей) соответствуют требованиям эксплуатации. В этом случае систематическая составляющая погрешности пренебрежимо мала,  $E_{[\gamma]} = 0$ , и распределение  $\varphi(\gamma)$

симметрично относительно нуля – что подтверждается для индикаторных нутромеров и микрометрических головок при соблюдении регламента.

Решение о годности принимается по следующему правилу:

деталь принимается, если  $D_{min} \leq x^* \leq D_{max}$ ;

деталь забраковывается, если  $x^* < D_{min}$  или  $x^* > D_{max}$ .

Вероятности возможных исходов определяются как свёртка распределений  $f(x)$  и  $\varphi(\gamma)$ , ограниченная границами поля допуска. Учитывая технологическую асимметрию (возможность восстановления только при ошибках второго рода), вводим пять ключевых вероятностей:

1)  $P_{\Gamma\Gamma}$  - вероятность правильного принятия годной детали (истинное состояние:  $D_{min} \leq x \leq D_{max}$ ; решение: «принята»):

$$P_{\Gamma\Gamma} = \int_{D_{min}}^{D_{max}} f(x) \left[ \int_{D_{min}-x}^{D_{max}-x} \varphi(\gamma) d\gamma \right] dx. \quad (2.6)$$

2)  $P_{\Gamma Д}^{(И)}$  - вероятность ошибки первого рода при исправимом браке:

$$P_{\Gamma Д}^{(И)} = \int_{D_{min}}^{D_{max}} f(x) \left[ \int_{-\infty}^{D_{min}-x} \varphi(\gamma) d\gamma \right] dx. \quad (2.7)$$

3)  $P_{\Gamma Д}^{(Н)}$  - вероятность ошибки первого рода при неисправимом браке:

$$P_{\Gamma Д}^{(Н)} = \int_{D_{min}}^{D_{max}} f(x) \left[ \int_{D_{max}-x}^{+\infty} \varphi(\gamma) d\gamma \right] dx. \quad (2.8)$$

Суммарный риск поставщика (ошибка второго рода):

$$P_{\Gamma\Gamma} = P_{\Gamma Д}^{(И)} + P_{\Gamma Д}^{(Н)}. \quad (2.9)$$

4)  $P_{Д\Gamma}^{(И)}$  - вероятность ошибки второго рода при исправимом браке:

$$P_{Д\Gamma}^{(И)} = \int_{-\infty}^{D_{min}} f(x) \left[ \int_{D_{min}-x}^{D_{max}-x} \varphi(\gamma) d\gamma \right] dx. \quad (2.10)$$

5)  $P_{Д\Gamma}^{(Н)}$  - вероятность ошибки второго рода при неисправимом браке:

$$P_{Д\Gamma}^{(Н)} = \int_{D_{max}}^{+\infty} f(x) \left[ \int_{D_{min}-x}^{D_{max}-x} \varphi(\gamma) d\gamma \right] dx. \quad (2.11)$$

Суммарный риск поставщика (ошибка второго рода):

$$P_{Д\Gamma} = P_{Д\Gamma}^{(И)} + P_{Д\Gamma}^{(Н)}. \quad (2.12)$$

Физическая интерпретация интегралов:

Внешний интеграл по  $x$  – усреднение по всем возможным истинным состояниям (годные, ошибки первого или второго рода);

Внутренний интеграл по  $\gamma$  – вероятность того, что погрешность «сдвинет» измеренное значение  $x^*$  в зону принятия/браковки;

Зависимость пределов внутреннего интеграла от  $x$  ( $D_{\min} - x$ ,  $D_{\max} - x$ ) отражает условность события и является следствием линейной модели измерения  $x^* = x + \gamma$ .

При корректной спецификации  $f(x)$  и  $\varphi(\gamma)$  (например, нормальные распределения) интегралы (2.6) – (2.12) сводятся к комбинациям функции Лапласа  $\Phi(z)$ , что позволяет проводить расчёты аналитически или в Excel/Matlab.

Для получения аналитически вычисляемых выражений рассмотрим частный, но практически значимый случай, когда:

1) Распределение истинных размеров деталей – нормальное:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(x - \mu_x)^2}{2\sigma_x^2} \right]. \quad (2.13)$$

2) Случайная погрешность измерения – нормальная с нулевым математическим ожиданием и дисперсией  $\sigma_\gamma^2$ :

$$\mu(\gamma) = \frac{1}{\sigma_\gamma \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{\gamma^2}{2\sigma_\gamma^2} \right]. \quad (2.14)$$

В силу свойства устойчивости нормального закона, измеренное значение  $x^* = x + \gamma$  также имеет нормальное распределение:

$$x^* \sim N(\mu_x, \sigma_x^2 + \sigma_\gamma^2). \quad (2.15)$$

Введём суммарное стандартное отклонение:

$$\sigma_\Sigma = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_\gamma^2}. \quad (2.16)$$

Тогда вероятность правильного принятия годной детали (2.6) принимает вид:

$$P_{\Gamma\Gamma} = \Phi \left( \frac{D_{\max} - \varphi_x}{\sigma_\Sigma} \right) - \Phi \left( \frac{D_{\min} - \varphi_x}{\sigma_\Sigma} \right), \quad (2.17)$$

где  $\Phi(z)$  – функция Лапласа.

Частный случай: симметричная настройка и малое рассеяние размеров  
 В условиях ремонта часто выполняются следующие допущения.  
 Настройка технологической операции выполнена по центру поля допуска:

$$\varphi_x = D_{\text{ном}} = \frac{D_{\text{min}} + D_{\text{max}}}{2} \quad (2.18)$$

Рассеяние размеров после финишной обработки пренебрежимо мало по сравнению с погрешностью СИ ( $\sigma_x \ll \sigma_y$ ), что характерно для расточки под ремонтный размер с жёсткой наладкой. Тогда:

$$\sigma_{\Sigma} \approx \sigma_y \quad (2.19)$$

Положив  $\Delta = T_D/2$ , где  $T_D = D_{\text{max}} - D_{\text{min}}$ , получим:

$$\frac{D_{\text{max}} - \varphi_x}{\sigma_y} = \frac{\Delta}{\sigma_y}, \quad \frac{D_{\text{min}} - \varphi_x}{\sigma_y} = -\frac{\Delta}{\sigma_y} \quad (2.20)$$

С учётом чётности функции  $1 - \Phi(z)$ , вероятность ошибки первого рода (забраковка годных деталей) при условии  $P_{\text{дг}} \ll P_{\text{гд}}$  (что справедливо при центрировании и малом  $\sigma_x$ ) упрощается до:

$$P_{\text{гд}} \approx 2 \left[ 1 - \Phi \left( \frac{T_D}{2\sigma_y} \right) \right] \quad (2.21)$$

Используя известное приближение  $\Phi(z) \approx 1 - \frac{e^{-z^2/2}}{z\sqrt{2\pi}}$ , расчёт по формуле (2.19) даёт следующие значения, таблица 2.2.

Таблица 2.2 – Соотношение параметров разбраковки

Отношение $\frac{T_D}{\sigma_y}$	Аргумент $\frac{T_D}{2\sigma_y}$	$P_{\text{гд}}$ , %
6 (правило «1/6 допуска»)	3,0	0,27
6 (правило «1/8 допуска»)	4,0	0,0063
10	5,0	0,000057

Сравнение с требованиями РД 50-98-86 показывает:

для изделий категории «А» допускается  $n_1 \leq 0,5\%$ ;

правило «1/6 допуска» формально удовлетворяет этому требованию лишь при идеальных условиях.

Однако в реальных условиях ремонта сельскохозяйственной техники (температурные колебания, износ измерительных наконечников,

субъективная составляющая оператора), систематическая погрешность может достигать 30–50% от  $\sigma_Y$ . Это приводит к смещению распределения  $x^*$ , резкому росту  $P_{ДГ}^{(Н)}$  и нарушению нормативных ограничений.

Вывод: соотношение  $\frac{\sigma_Y}{T_D} \leq \frac{1}{6}$  не является эмпирическим правилом, а следует из расчёта риска при заданных ограничениях на  $P_{ГД}$  и  $P_{ДГ}$ . Для ответственных соединений (коренные опоры, шатунные вкладыши) рекомендуется использовать СИ имеющие  $\frac{\sigma_Y}{T_D} \leq \frac{1}{8}$  и проводить периодическую поверку с оценкой систематической составляющей.

Особый интерес представляет ошибка второго рода  $P_{ДГ}^{(Н)}$  - принятие деталей с неисправимым браком, поскольку её вероятность чрезвычайно чувствительна к смещению центра распределения  $\varphi_x$  размеров относительно поля допуска. В условиях ремонтного производства такое смещение типично: например, при расточке отверстий коренных опор операторы сознательно смещают настройку в сторону ошибок второго рода (исправимого брака), чтобы минимизировать риск неисправимого брака, влекущего замену дорогостоящего блока цилиндров.

Характерный пример – расточка отверстий коренных опор блока цилиндров двигателя Д-245 при капитальном ремонте. Согласно действующему в аграрном секторе «Руководству по ремонту двигателей Д-245», для ремонтного размера, увеличенного по отношению к номинальному на 0,5 мм, установлены следующие предельные размеры диаметра отверстия:

$$D_{min} = 92,500 \text{ мм}, D_{max} = 92,520 \text{ мм}, T_D = 0,020 \text{ мм}.$$

Эти значения согласованы с ГОСТ Р 57406–2017, регламентирующим зазоры в подшипниках скольжения: для ремонтного размера, увеличенного по отношению к номинальному на 0,5 мм, допустимый зазор составляет 0,05...0,10 мм, что при диаметре вала 92,520 мм даёт указанный диапазон.

Предположим, что после расточки на станке 2А622Ф4 получен следующий разброс размеров:

среднее значение:  $\mu_x = 92,510$  мм (смещение к  $D_{max}$  на +10 мкм – типично при износе резца);

СКО:  $\sigma_x = 3$  мкм;

используемый индикаторный нутромер НИ-160-2 (класс 3) имеет:

СКО случайной погрешности:  $\sigma_\gamma = 4$  мкм;

систематическую составляющую:  $\theta = +5$  мкм (не скомпенсированная при поверке).

Тогда измеренное значение распределено как:

$$x * \sim N(\mu_x + \theta, \sigma_x^2 + \sigma_\gamma^2) = N(92,515, 25). \quad (2.22)$$

Вероятность принятия детали с ошибкой первого рода ( $x > D_{max}$ ) определяется по формуле (2.7). При нормальных  $f(x)$  и  $\varphi(\gamma)$  она вычисляется численно:

$$P_{ДГ}^{(H)} = \int_{92,530}^{+\infty} \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-92,510)^2}{2 \cdot 9}} \Phi\left(\frac{92,520-x-5}{4}\right) dx \approx 1,810^{-3}. \quad (2.23)$$

То есть около 2 гнезд с ошибкой первого рода из 1000 будут приняты как годные.

Для сравнения: при идеальной настройке ( $\mu_x = 92,505$ ,  $\theta = 0$ ) эта вероятность составляет  $\sim 3 \cdot 10^{-5}$  - в 60 раз меньше.

При программе ремонтного предприятия в виде годового объема работ по ремонту - 500 двигателей в год (контролируется порядка 2500 коренных опор) ожидаемое число ошибок будет равно:  $2500 \times 0,0018 = 4,5$  случая в год. Это согласуется со статистикой отказов: по данным Государственной инспекции, в ЦФО за 2023 г. зарегистрировано 9 аварийных отказов двигателей после ремонта, связанных с проворотом вкладышей в постелях блока цилиндров – коренных опорах, что вполне укладывается в представленные расчеты и соответствует примерно 3–5 случаям на один крупный ремонтный центр.

## 2.4 Связь вероятностной модели с параметрами забраковки

Методика количественной оценки рисков, изложенная в п. 2.3, позволяет установить строгую связь с нормативными параметрами забраковки, регламентированными в действующих метрологических документах.

Согласно РД 50-98-86, при допусковом контроле вводятся два основных параметра:

$n = 100 \cdot P_{ГД}$  – процент неправильно забракованных изделий от числа годных (риск поставщика,  $\alpha$ -риск);

$m = 100 \cdot P_{ДГ}$  – процент неправильно принятых изделий от числа дефектных (риск потребителя,  $\beta$ -риск).

Эти величины непосредственно связаны с вероятностями (2.8) и (2.10) и используются для аттестации технологий контроля.

Далее вводится коэффициент смещения  $c$  – безразмерная величина, характеризующая относительное смещение границы контроля от границы поля допуска при сплошном контроле. При допусковом контроле рекомендуется использовать смещённые границы:

$$D_{\text{контр}}^{\min} = D_{\min} + c \cdot T_D, D_{\text{контр}}^{\max} = D_{\max} - c \cdot T_D, \quad (2.24)$$

где  $0 \leq c \leq 0,25$ .

Таким образом,  $c$  – это не статистическая характеристика партии, а параметр настройки системы контроля, вводимый для компенсации систематической погрешности СИ.

Физический смысл параметра  $c$  проявляется в следующем.

При  $c > 0$  границы контроля сужаются, что:

снижает  $P_{ДГ}^{(H)}$  (риск принятия деталей с ошибкой первого рода),

но увеличивает  $P_{ГД}$  (забраковка годных).

Оптимальное значение  $c$  выбирается из условия минимизации суммарного ущерба:

$$c^* = \arg \min_c [C_{\text{забр}} \cdot P_{ГД}(c) + C_{\text{ав}} \cdot P_{ДГ}^{(H)}(c)], \quad (2.25)$$

где  $C_{забр}$  – затраты на избыточную замену,  $C_{ав}$  – ущерб от аварии.

Для коренных опор двигателей Д-245, где  $C_{ав} \gg C_{забр}$ , оптимально  $c \approx 0,15...0,20$  – что согласуется с рекомендациями.

Численный пример: контроль гнезд коренных опор при ремонте двигателей Д-240:

допуск:  $D_{min} = 95,000$  мм,  $D_{max} = 95,025$  мм,  $T_D = 0,025$  мм;

распределение размеров:  $x \sim N(95,008, 4,2^2)$ ;

СИ: нутромер НИ-180-3,  $\sigma_\gamma = 5,0$  мкм.

Численное интегрирование по формулам (2.6)–(2.12) даёт данные, представленные в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Данные по численному интегрированию

Вероятность	Значение	Интерпретация
$P_{ДГ}^{(H)}$	0,891	89,1 % - правильно принятые годные
$P_{ГД}^{(И)}$	0,087	8,7 % - годные, забракованные как исправимый брак
$P_{ГД}^{(H)}$	0,002	0,2 % - годные, забракованные как неисправимый брак
$P_{ДГ}^{(И)}$	0,006	0,6 % - исправимый брак, принятый как годный
$P_{ДГ}^{(H)}$	0,0001	0,01 % - неисправимый брак, принятый как годный

Отсюда:

$$n = 100 \cdot P_{ГД} = 8,9\%, \quad m = 100 \cdot P_{ДГ} = 0,61\%.$$

Сравнение с ориентировочными уровнями, приведёнными в РД 50-98-86 для изделий категории «А» (ответственные соединения:  $n \leq 0,5\%$ ,  $m \leq 0,1\%$ ), показывает, что достигнутые значения превышают рекомендуемые в 17 и 6 раз соответственно.

Анализ причин высоких рисков:

1. Высокая дисперсия размеров:

$\sigma_x / T_D = 4,2 / 25 = 0,168$  – превышает рекомендуемое значение  $\leq 0,10$  для ответственных операций.

2. Недостаточная точность СИ:

$\sigma_\gamma/T_D = 5,0/25 = 0,20 \rightarrow$  по формуле (2.15)  $P_{ГД} \approx 2[1 - \Phi(2,5)] \approx 1,2\%$  при центрировании, но при  $\mu_x=95,008$  (смещение к  $D_{\min}$ )  $P_{ГД}^{(И)}$  доминирует.

### 3. Смещение настройки:

Операторы сознательно смещают расточку в зону ошибок второго рода, чтобы избежать риска ошибок первого рода – что подтверждается статистикой:

забраковано 106 корпусов (8,8 %);

из них 97 – как ошибки второго рода;

при повторной проверке на нутромере класса 2 ( $\sigma = 3$  мкм) 78 из 97 оказались в пределах допуска.

Разработанная вероятностная модель и её связь с параметрами разбраковки  $n$  и  $m$  позволяют утверждать, что она не только теоретически корректна, но и практически применима в условиях ремонтного производства сельскохозяйственной техники. Однако её эффективность напрямую зависит от точности оценки входных параметров: распределения истинных размеров  $f(x)$ , плотности погрешности измерения  $\varphi(\gamma)$ , а также границ поля допуска  $D_{\min}, D_{\max}$ .

Анализ практики показал, что указанные параметры варьируются в зависимости от трёх ключевых факторов:

тип ремонтируемой машины и характер износа узла;

уровень ремонтного предприятия;

степень изношенности парка техники.

Для компенсации нестабильности параметров предлагается трёхэтапная стратегия:

На этапе проектирования – расчёт рисков по модели с «пессимистическими» оценками:

$$\sigma_x^{\text{расч}} = 1,8 \cdot \sigma_x^{\text{пасп}}, \sigma_\gamma^{\text{расч}} = 1,4 \cdot \sigma_\gamma^{\text{пасп}}. \quad (2.26)$$

На этапе внедрения – выборочная оценка  $f(x)$  по 50–100 деталям и внеплановая поверка СИ для уточнения  $\mu_x$ ,  $\sigma_x$ ,  $\theta$ ,  $\sigma_\gamma$ , с последующим введением смещения границ контроля по МИ 1822–87:

$$D_{\text{контр}}^{\min} = D_{\min} + c \cdot T_D, D_{\text{контр}}^{\max} = D_{\max} - c \cdot T_D, c = 0,10 \dots 0,20.$$

На этапе эксплуатации – мониторинг  $n$  и  $m$ ; при превышении  $n > 2,0\%$  или  $m > 0,3\%$  - коррекция настройки или замена СИ.

## 2.5 Разработка методики выбора нутромеров для контроля отверстий блока цилиндров

Выбор нутромера, как и практически любого друга средства измерений продиктован, прежде всего, соотношением его погрешности измерений с требованиями точности контролируемого им параметра [69]. Допустимые погрешности измерений, а также их другие параметры точности регламентированы нормативной документацией, так требованиям к нутромерам, чаще всего применяемым при ремонте двигателей серии ЯМЗ, содержатся в ГОСТ 868-82 «Нутромеры индикаторные с ценой деления 0,01 мм» [28].

Основные параметры точности, которым должны соответствовать нутромеры представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Параметры точности нутромеров по ГОСТ 868-82

Диапазон измерений	6-10	10-18	18-50	50-100	100-160	160-250	250-450	450-700 и 700-1000
Наибольшая глубина измерения, не менее, мм	60, 100	130	150	200	300	400	500	-
Наименьшее перемещение измерительного стержня, мм	0,6	0,8	1,5	4,0		6,0	8,0	
Измерительное усилие, Н	2,5-4,5		4,0-7,0	5,0-9,0				
Усилие центрирующего мостика, Н	5,0-8,5		7,5-12,0	9,5-16,0				
Масса, кг, не более	0,2	0,3	0,4	0,6	1,2	1,5	1,8	3,0

Согласно [28] погрешность нутромеров, как и погрешность их индикаторов зависит от диапазона измерений и от класса точности. При этом

при этом допустимые пределы погрешности измерений должны контролироваться как при перемещении измерительного стержня на нормируемую минимальную величину, так и на любом участке диапазона измерений. Допустимы погрешности измерений нутромера представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Пределы допускаемой погрешности измерений нутромеров по ГОСТ 868-82

Диапазон измерений	Предел допускаемой погрешности					
	на любом участке диапазона измерений				при перемещении измерительного стержня на величину нормируемого наименьшего значения	
	0,1		1		Класс 1	Класс 2
	Класс 1	Класс 2	Класс 1	Класс 2		
6-10, 10-18	0,005	0,008	-	-	0,008	0,012
18-50			0,010	0,012	0,012	0,015
50-100, 100-160, 160-250	-	-			0,015	0,018
250-450, 450-700, 700-1000	-	-	-	0,014	-	0,022

Помимо характеристик и погрешностей, представленных в таблицах выше, точность нутромера характеризуется его размахом, т.е. разницей между максимальным и минимальным показаниями нутромера при повторных измерениях одной и той же величины. Согласно стандарту [2], предельное значение размаха, как и погрешность от не точного расположения центрирующего мостика должно составлять до трети от цены деления шкалы индикатора.

Теоретический подход к оценке погрешности измерений базируется на получении математических зависимостей погрешности от затрат и потерь при измерении и их оптимизации по критерию минимума затрат. Но следует иметь в виду, что в мелкосерийном ремонтном производстве используются универсальные методы.

Усовершенствована методика и разработан алгоритм выбора нутромеров для контроля отверстий блока цилиндров в условиях ремонтного производства, базирующаяся на формировании номенклатуры нутромеров и оценке для каждого из них потерь от ошибок первого и второго рода (рисунок 2.2).

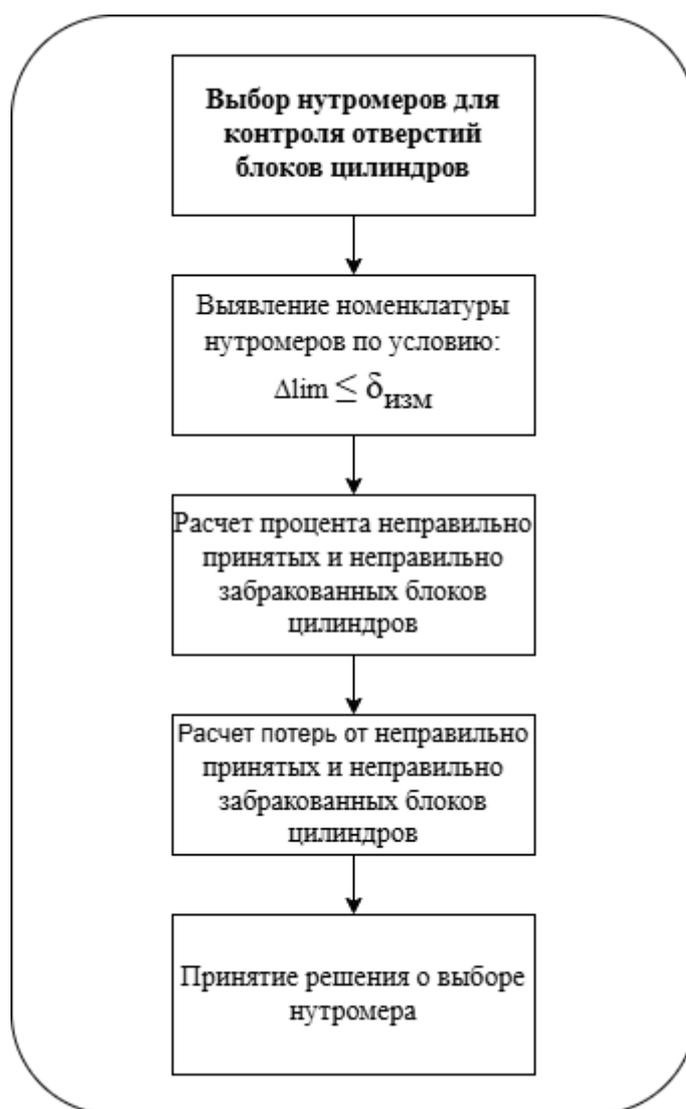


Рисунок 2.2 – Последовательность выбора рационального средства измерений

## 2.6 Выводы

1. Теоретический подход к оценке погрешности измерений базируется на получении математических зависимостей погрешности от затрат и потерь при измерении и их оптимизации по критерию минимума затрат. Но следует иметь в виду, что в мелкосерийном ремонтном производстве используются универсальные средства измерений, в отличие от машиностроения, поэтому стоимость универсальных средств измерений мала и не сопоставима с потерями, особенно при контроле базовых и высокотехнологичных деталей, таких как блок цилиндров, коленчатый вал, распределительный вал, головка блока цилиндров, шатуны и т.д.

2. При оценке качества метрологического обеспечения в ремонтном производстве главный упор следует делать на расчет потерь от брака первого и второго рода, как инструмента оценки рисков при контроле и дефектации ответственных деталей.

3. Усовершенствована методика и разработан алгоритм выбора нутромеров для контроля отверстий блока цилиндров в условиях ремонтного производства, базирующаяся на формировании номенклатуры нутромеров и оценке для каждого из них потерь от ошибок первого и второго рода.

### 3 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

#### 3.1 Методика обработки результатов прямых измерений при многократных наблюдениях

С целью определения рационального количества измерений для исключения влияния случайной составляющей погрешности, проведено несколько серий прямых измерений с многократным числом наблюдений. Измерения проводились с помощью нутромеров: трёхточечного, индикаторного клинового и индикаторного рычажного. Каждым из них проведены 9 серий измерений с разным числом наблюдённых в количестве 5, 10, 15, 20, 25, 40, 60, 80, 100 и при доверительной вероятности  $P=95\%$ .

Полученные результаты прямых измерений с многократными наблюдениями обрабатывались в Excel по методике ГОСТ 8.207-76 [27] в следующей последовательности:

1. Оценка среднего арифметического значения результатов многократных наблюдений –  $\bar{X}$  формула (3.1). Полученное среднее арифметическое значение принимают за оценку истинного результата измеряемой величины (диаметра вала, манжеты).

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i , \quad (3.1)$$

где  $n$  – объем выборки;  $X_i$  –  $i$ -ый результат измерения из выборки  $n$ .

2. Расчет среднего квадратического отклонения среднего арифметического значения результата измерений –  $\sigma_x$  формула (3.2) и среднего квадратического отклонения единичного результата наблюдения –  $\sigma_{\bar{x}}$  формула (3.3).

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} , \quad (3.2)$$

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} , \quad (3.3)$$

3. Проверка наибольшего и наименьшего из полученных результатов наблюдений (вариационного ряда) на наличие грубых погрешностей (промахов). В нашем случае были использованы критерий Романовского (при сериях с числом измерений  $n \leq 20$ ) формула (3.4) и критерий трёх сигм (при сериях с числом измерений  $n > 20$ ) формула (3.5).

$$B = \frac{|X_i - \bar{X}|}{\sigma_x} , \quad (3.4)$$

где  $B$  – значение критерия, сравниваемое с табулированным значением зависящим от объема выборки  $n$ .

$$P(|X_i - \bar{X}| \geq 3\sigma) \leq \frac{1}{9} , \quad (3.5)$$

где  $P$  – вероятность того, что при наблюдении была допущена грубая погрешность.

4. Оценка границ неисключенной систематической погрешности результата измерения -  $\theta$ . В нашем случае, в качестве границ неисключенной систематической погрешности результата измерения принимались границы погрешности используемых средств измерений, указанные в таблицах 3.1-3.2.

5. Оценка границ случайной составляющей погрешности результата измерений -  $\Delta_P$  при доверительной вероятности:

$$\Delta_P = t_P \sigma_{\bar{x}} , \quad (3.6)$$

где:  $t_P$  - значение коэффициента Стьюдента, зависящего от объема выборки  $n$ .

6. Оценка доверительных границ погрешности результата измерения, исходя из соотношения среднего квадратического отклонения среднего арифметического значения результата измерений и неисключенной систематической погрешности:

$$\frac{\theta}{\sigma_{\bar{x}}} \begin{cases} \geq 8 \rightarrow \Delta_{\Sigma} = \Delta_P \\ \leq 0,8 \rightarrow \Delta_{\Sigma} = \theta \\ 0,8 \geq \frac{\theta}{\sigma_x} \geq 8 \rightarrow \Delta_{\Sigma} = K \cdot \sigma_{\Sigma} \end{cases}, \quad (3.7)$$

где:  $\Delta_{\Sigma}$  – границы суммарной погрешности результата измерения,  $K$  – коэффициент зависящий от соотношения  $\theta$  и  $\Delta_P$  (формула 3.8);  $\sigma_{\Sigma}$  – оценка суммарного среднего квадратического результата измерений (формула 3.9).

$$K = \frac{\Delta_P + \theta}{\sigma_{\bar{x}} + \sqrt{\frac{\theta^2}{3}}}, \quad (3.8)$$

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\frac{\theta^2}{3} + \sigma_{\bar{x}}^2}. \quad (3.9)$$

### 3.2 Алгоритм выбора средств измерений для контроля отверстий блока цилиндров

В настоящее время выбор средств измерений линейных размеров при контроле рассматривается технологами как задача, при проведении которой необходимо руководствоваться требованиями ГОСТ 8.051-81 и РД 50-98-86. Исходными данными при выборе СИ являются указанные в НТД размеры физической величины (наименьшие и наибольшие), а также допуск контролируемого параметра [86, 16].

Средство измерений (СИ) выбирают из определенного ряда так, чтобы предельная погрешность измерения ( $\Delta_{\text{lim}}$ ) не была больше допускаемой погрешности измерения ( $\delta_{\text{изм}}$ ) [84]:

$$\Delta_{\text{lim}} \leq \delta_{\text{изм}}. \quad (3.10)$$

Если отсутствуют рекомендации в нормативно-технической документации, то допускаемую погрешность измерения принимают как одну треть от допуска контролируемого параметра [85]:

$$\delta_{\text{изм}} = 0,33 \cdot T, \quad (3.11)$$

где  $T$  – допуск контролируемого параметра.

Для оценки качества контроля требуется определить количество неправильно забракованных от общего количества годных деталей ( $n$ , %), количество неправильно принятых от количества принятых деталей ( $m$ , %) и предельную величину выхода размера за границу поля допуска ( $s$ , мкм) по алгоритму, представленному на рисунке 3.1. Дальнейшее решение задачи возможно и с учетом определения технико-экономической оценки средств измерений.

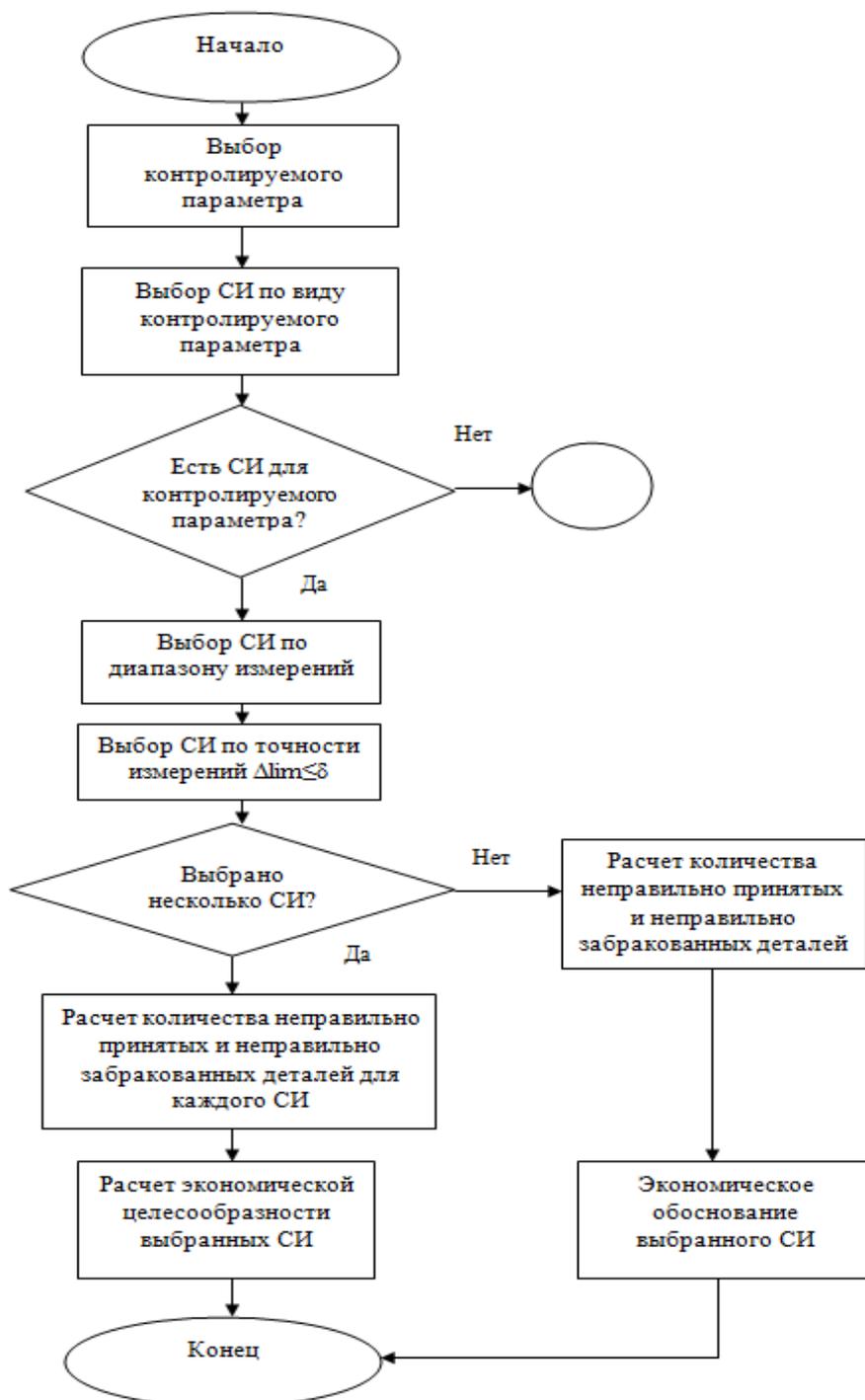


Рисунок 3.1 – Алгоритм выбора средств измерений

Влияние погрешности измерений на результаты при дефектации оценивают при помощи следующих параметров [3, 51, 57]:

$m$  – процент неправильно принятых отверстий опор, %;

$n$  – процент неправильно забракованных отверстий опор, %;

$c$  – вероятностная величина выхода диаметра за границу допуска у неправильно забракованных опор, мкм.

При определении вышеперечисленных параметров наиболее рационально применять коэффициент точности измерения:

$$A_{\text{мет}} = (\sigma_{\text{мет}}/T) \cdot 100\% , \quad (3.12)$$

где  $\sigma_{\text{мет}}$  – СКО погрешности измерения ( $\sigma_{\text{мет}} = \text{lim}/2$ ), мм;  $T$  – допуск контролируемого параметра, мм.

### 3.3 Методика измерения отверстий с помощью высокоточных средств измерений

В качестве высокоточного средства измерений внутренних размеров использовался трехточечный микрометрический нутромер GUANGXING 11-14 (рисунок 3.2 а) с характеристиками, представленными в таблице 3.1

Таблица 3.1 – Характеристики трёхточечного микрометрического нутромера

Средство измерений	Диапазон измерений, мм	Базовая глубина измерений, мм	Цена делений, мм	Погрешность измерений, мм
Трёхточечный внутренний микрометрический нутромер GUANGXING 11-14	11-14	50	0,001	±0,002

Выбор данного нутромера в качестве средства измерений для внутренних размеров обусловлен, его высокой точностью при контактных измерениях глухих и сквозных отверстий. Это обусловлено наличием, в

качестве чувствительного элемента, трех подвижных измерительных наконечников, выдвигающихся из корпуса под углом  $120^\circ$ . При проведении измерений данные наконечники выдвигаются одновременно, тем самым обеспечивая соосность прибора и измеряемого отверстия.

Для настройки прибора предназначено установочное кольцо с внутренним диаметром 10,9990 мм, находящееся в комплекте с данным нутромером (рисунок 3.2 б).



Рисунок 3.2 – Трехточечный внутренний микрометрический нутромер GUANGXING 11-14 (а – прибор в комплекте, б – установочное кольцо)

При определении оптимального количества измерений необходимых для обеспечения надлежащей точности ремонта, проводились серии многократных измерений установочного конца. В процессе измерений данный нутромер помещался в отверстие, таким образом, чтобы конец корпуса, в котором расположены измерительные наконечники, не соприкасался с поверхностью на которой лежало кольцо. После расположения нутромера в кольце проводится вращения трещотки до возникновения трех последовательных щелчков, после чего фиксировались показания

После чего происходило вращение трещотки до щелчка. Полученные показания считывались со шкалы прибора на стебле и нониусной шкалы на барабане и фиксировались для дальнейшей обработки.

### 3.4 Методика измерений с помощью индикаторного нутромера

В качестве индикаторных нутромеров использовались клиновой индикаторной нутромер НИ 18-50 (рисунок 3.3), выполненный по ГОСТ 868-82 [28], с электронным индикатором ШАНЕ ИЦ-25,4 (рисунок 3.4), Микрометр МК-50 в стойке (рисунок 3.5), а также рычажный индикаторный нутромер НИ 100-160 (рисунок 3.6), выполненный по ГОСТ 868-82 [28], с индикаторной головкой ИЧ-10 (рисунок 3.7). Характеристики данных измерительных приборов представлены в таблице 3.2:

Таблица 3.2 – Характеристики индикаторных нутромеров

Средство измерений	Наибольшая глубина измерений, мм	Диапазон измерений, мм	Диапазон показаний, мкм	Цена делений, мм	Погрешность измерений*, мм
НИ 18-50 в сборе с ИЦ-25,4	150	18-50	0-99,99	0,01	0,03
НИ 160 в сборе с ИЧ 0-10	400	100-160	0-0,1	0,01	±0,018

Выбор клинового нутромера связан с распространённостью отверстий диаметром от 18 до 50 мм, которые необходимо контролировать в двигателях ЯМЗ-238 и ЯМЗ-239 при ремонте [71]. Индикаторный нутромер НИ 18-50, в подобных условиях, обеспечивает проведение серийных измерений, при небольших трудозатратах и достаточном уровне точности.

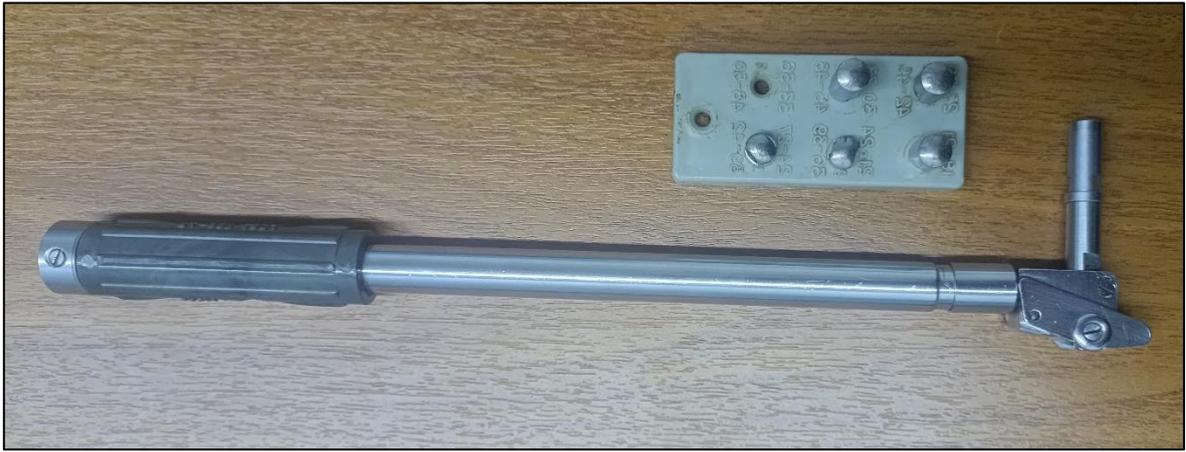


Рисунок 3.3 – Индикаторный нутромер НИ 18-50.

При использовании индикаторного нутромера, наиболее ответственной операцией является его настройка, а использование электронной индикаторной головки позволяет её упростить, а также позволяет избежать погрешности параллакса, облегчает считывание показаний, позволяет, при необходимости, изменять единицы измерений.



Рисунок 3.4 – Электронный индикатор SHANE ИЦ-25,4

Калибровка индикаторного нутромера, проводилась с помощью микрометра МК-50 по ГОСТ 6507-90 [25], с ценой деления 0,01 мм, установленного в стойку (рисунок 3.4 а), настроенного на 0, с помощью набора концевых мер длины N1 КЛ 1 по ГОСТ 9038-59 [29] (Рисунок 3.5 б).



а) б)  
 Рисунок 3.5 – а) Микрометр МК-50 в стойке;  
 б) набор концевых мер длины N1 КЛ 1

Во время проведения экспериментальных исследований, микрометр закреплялся на стойке и настроен на размер 50 мм с помощью концевой меры, электронный индикатор был установлен в нутромер и подключен к персональному компьютеру. В процессе измерений нутромер помещался между микрометрическим винтом и пяткой микрометра после чего определялось наибольшее показание индикатора при небольших покачиваниях, полученные результаты по нажатию кнопки автоматически фиксировались в программе Excel запущенной на ПК, после чего нутромер вынимался из микрометра. Измерения повторялись до получения необходимого количества показаний.

Рычажный индикаторный нутромер НИ 100-160 выбран, поскольку во первых рычажная передача обеспечивает воспроизводимость результатов измерений за счет стабильной передачи движения на индикатор, во вторых кинематика рычажного механизма обеспечивает меньшую вариативность показаний, что крайне актуально при многократных измерениях, в третьих передача усилия через шарниры, а не через скользящие поверхности делает прибор менее подверженным искажениям вызванным неравномерным и нагревом корпуса, которые могут возникать при многократных измерениях.

При этом ключевой недостаток рычажного нутромера, в виде относительно небольшой точности по сравнению с электронными или микрометрическими аналогами, поскольку при измерениях диаметров с диапазоном больше 100 мм, точность большая чем 0,01 мм не требуется [28].



Рисунок 3.6 – Рычажный индикаторный нутромер НИ 100-160

Использовать в качестве индикатора ИЧ-10 решено поскольку, данный тип головок за счет рычажно-зубчатой передачи обладает высокой стабильностью метрологических характеристик при воздействии внешних факторов (температура, вибрации и т.д.), а также позволяет отслеживать динамику показаний измеряемой величины за счет стрелочной индикации.



Рисунок 3.7 – Индикатор часового типа ИЧ-10

При проведении экспериментальный исследований использовались струбцина, входящая в набор нутромера и, ранее представленный, набор концевых мер длины N1 КЛ 1 по ГОСТ 9038-59. Настройка струбцина

осуществлялась на размер соответствующий размеру отверстия под вкладыши коренных подшипников в двигателях ЯМЗ-238 и ЯМЗ-239 [71] – 116 мм, с помощью концевых мер 100 мм, 10 мм и 6 мм. Установочный натяг индикаторного рычажного нутромера составлял 1 мм. В процессе измерений нутромер помещался в струбцину между штанг, при небольших покачиваниях, фиксировалось наибольшее отклонение стрелки на индикаторе, а затем нутромер изымался из отверстия. Измерения повторялись до получения необходимого количества показаний, которые затем были введены в программу Excel для дальнейшей обработки.

### **3.5 Разработка компьютерной программы для обработки результатов многократных измерений**

В процессе диссертационного исследования для совершенствования процесса технико-экономической оценки контроля качества продукции и выбора средств измерений, на языке программирования Python разработана компьютерная программа – «Технико-экономическая оценка контроля качества».

Для создания программы разработан алгоритм по определению экономических параметров контроля, представленный на рисунках 3.8-3.12.

Пользовательский интерфейс разработанной программы представлен на рисунках (Рисунок 3.9-3.12). Он включает в себя несколько окон: окно для ввода исходных параметров «Ввод данных».

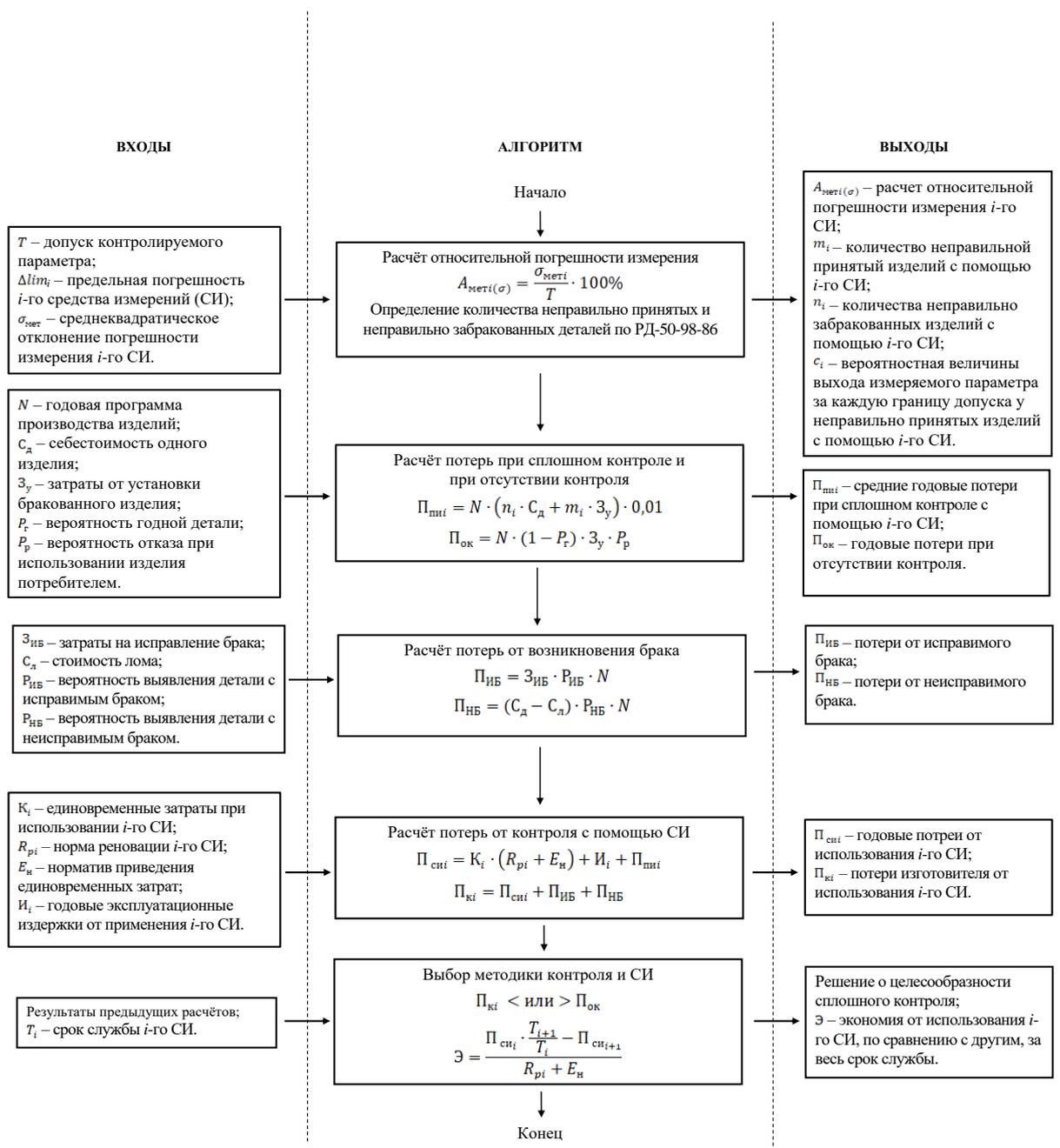


Рисунок 3.8 – Алгоритм работы программы «Цифровой контрольный листок»

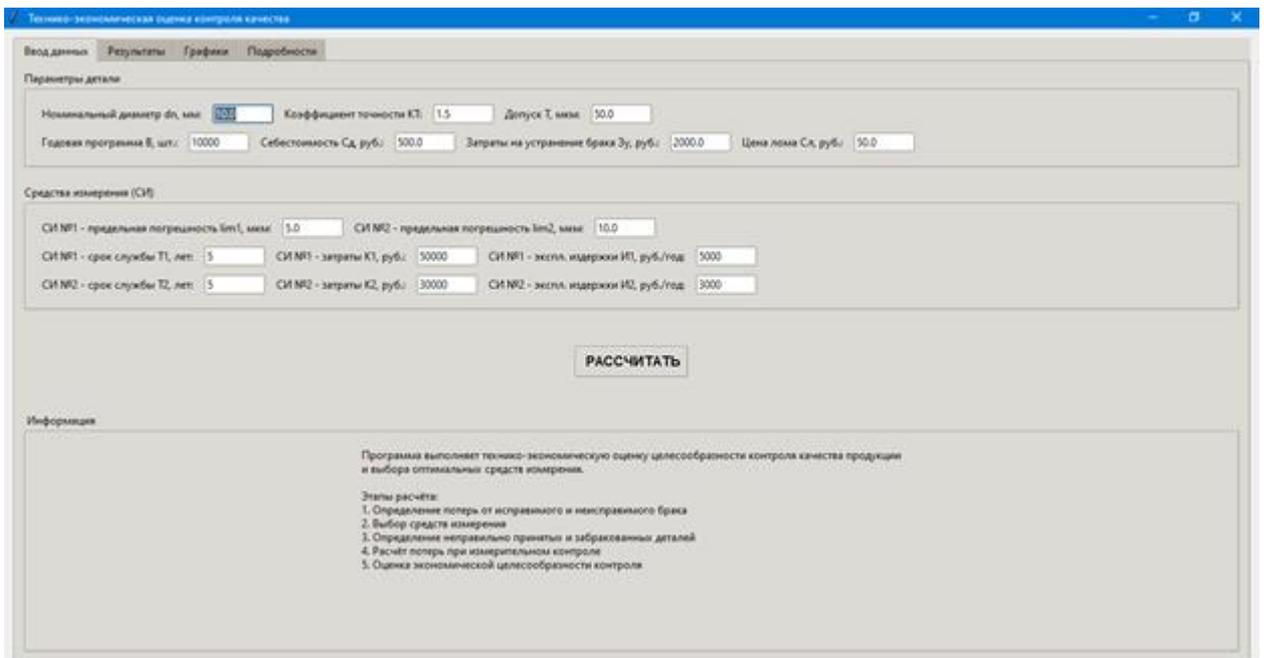


Рисунок 3.9 – Интерфейс программы «Технико-экономическая оценка контроля качества» – Окно «Ввод данных»

Окно «Результаты», где представлены результаты расчетов, включающие итоговые экономические показатели и рекомендации по выбору метода контроля (рисунок 3.13).

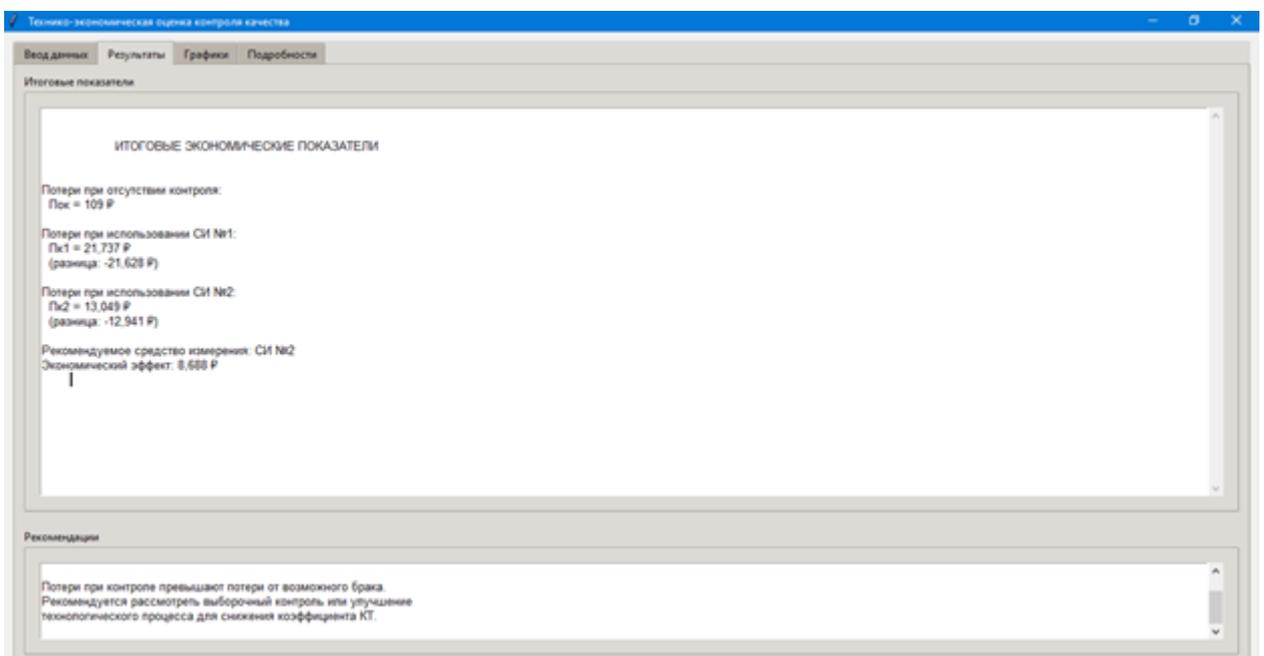


Рисунок 3.10 – Интерфейс программы «Технико-экономическая оценка контроля качества» – Окно «Результаты»

В окне «Графики» программа строится: график распределения размеров, круговая диаграмма, показывающая соотношения годных деталей, с деталями,

имеющими ошибки первого и второго рода, а также гистограммы, позволяющие определить издержки, вызванные метрологическим контролем.

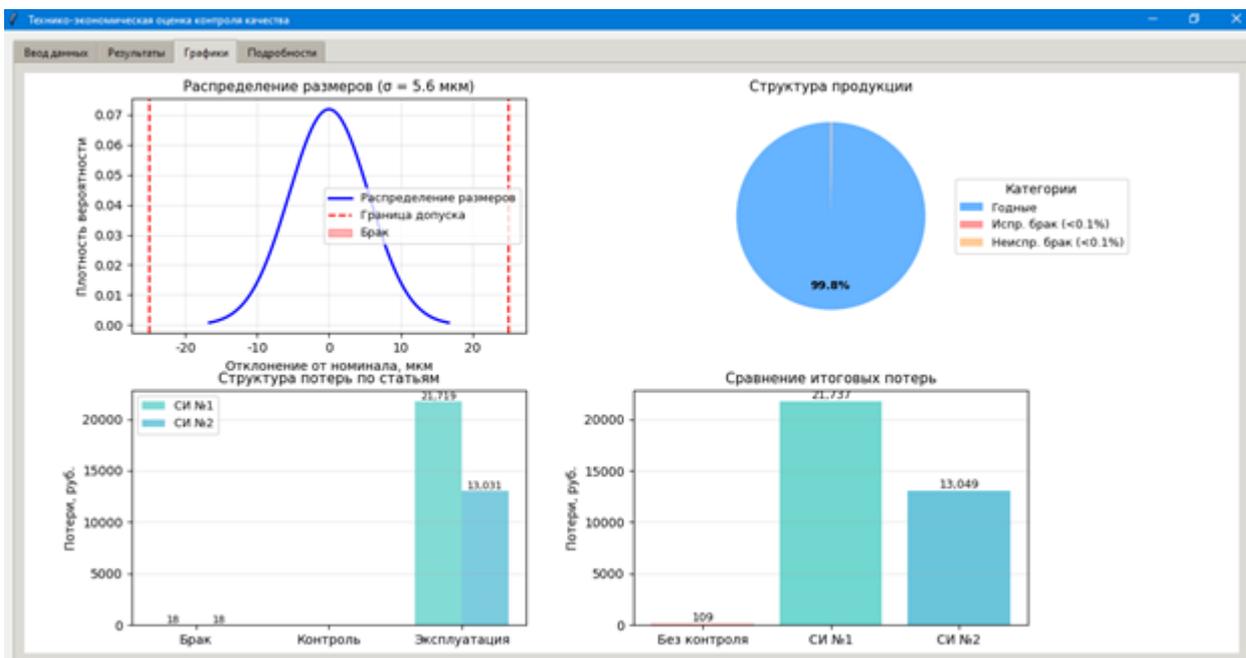


Рисунок 3.11 – Интерфейс программы «Технико-экономическая оценка контроля качества» – Окно «Графики»

Для представления информации о результатах промежуточных расчетов служит окно «Подробности».

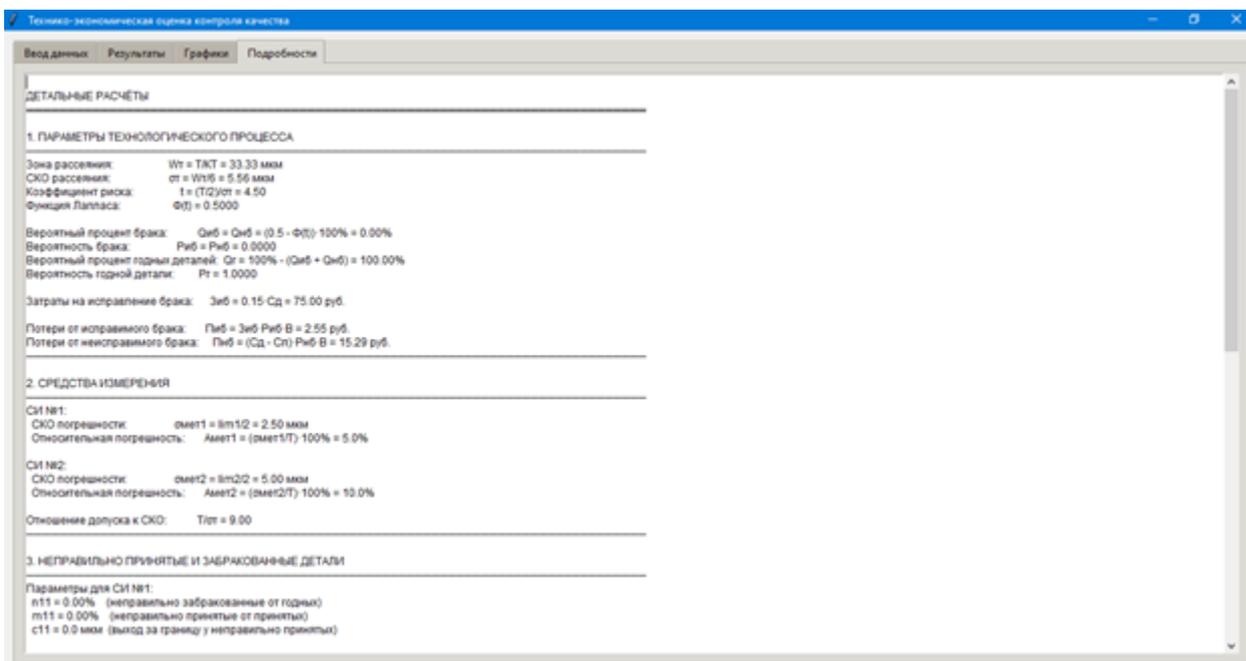


Рисунок 3.12 – Интерфейс программы «Технико-экономическая оценка контроля качества» – Окно «Подробности»

Использование разработанной программы позволит автоматически определять затраты на метрологический контроль, рассчитывать количество неправильно принятых и забракованных деталей, выбрать наиболее экономически эффективное средство измерений и проводить оценку экономической целесообразности контроля.

### **3.6 Выводы**

1. Для исследования возможностей по совершенствованию метрологического обеспечения отверстий сформирована методика по обработке результатов измерений, полученных в ходе метрологических испытаний, проводимых на ремонтных предприятиях.

2. Для проведения экспериментальных исследований по совершенствованию метрологического обеспечения измерений отверстий определены средства, их характеристики и методики измерений, так для измерений требующих высокой точности решено использовать трехточечный нутромер трехточечный микрометрический нутромер GUANGXING 11-14, а для многократных измерений клиновой индикаторной нутромер НИ 18-50 с электронным индикатором SHANE ИЦ-25,4 и рычажный индикаторный нутромер НИ 100-160 с индикаторной головкой ИЧ-10.

3. Для упрощения и автоматизации обработки данных полученных в ходе метрологических испытаний в рамках ремонтного производства составлен алгоритм, на основе которого, разработана компьютерная программа, написанная на языке программирования Python.

## 4 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

### 4.1 Исследование влияния погрешности хода измерительных головок на точность измерений

На современных ремонтных производствах метрологическое обеспечение играет одну из ключевых ролей в обеспечении должного качества работ по восстановлению агрегатов и деталей машин [3, 62]. От точности измерительных процессов зависит как экономическая целесообразность ремонта, так и надежность восстановленных деталей [74]. Распространенным средством измерений, используемым для деталей вида «Отверстие», являются измерительные головки.

Измерительные головки широко применяются на ремонтных производствах поскольку обеспечивают необходимую точность измерений в сложных условиях ремонтных производств, включающих в себя: перепады температур, вибрации, загрязненность воздуха и др. При этом разнообразие конструкций, индикаторных головок и комплектующих для их установки (штативы, стойки, нутромеры и т.д.), делают данное средство измерений универсальным и гарантирующим точность в, практически, любых условиях.

Таким образом, исследования связанные с изучением влияния погрешности измерительных головок имеют практическую значимость для ремонтных предприятий, поскольку способствуют совершенствованию метрологического обеспечения, повышению точности измерений, снижению издержек на исправление брака и обеспечивают предприятию соответствие современным стандартам качества.

В рамках диссертационного исследования, чтобы предотвратить влияние погрешности, связанной с ходом измерительных головок, которая может существенно повлиять на точность многократных измерений, проведены две серии измерений нутромеров с измерительными головками ИЧ-10 и ИЦ-25,4. Условия в которых проводились измерения представлены в таблице 4.1:

Таблица 4.1 – Условия проводимых измерений

Условие	Параметры условия
Температура воздуха	$(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$
Относительная влажность воздуха	$(60 \pm 10) \%$
Освещённость помещения	$(625 \pm 125) \text{ Лк}$
Чистота контактных поверхностей	Рабочие поверхности протирались с помощью безворсовых салфеток, пропитанных изопропиловым спиртом. Очистка проводилась перед началом измерений и после каждой серии.
Время выдержки перед и между измерениями	Перед началом измерений 30 мин., после каждой серии измерений 15 мин.

При проведении первой серии измерений использовался набор концевых мер длины N1 КЛ 1, с помощью которого Нутромер с индикаторной головкой настраивался на ноль. После чего проводились измерения при последовательном увеличении длины блока концевых мер на 0,3 мм, до достижения максимального хода нутромера, составлявшего 3,9 мм, в соответствии с методикой их МИ 2194-92 [60]. Всего проведено 14 серий измерений сначала с помощью ИЧ-10, затем с ИЦ-25,4. Результаты первой серии измерений представлены в таблице 4.2:

Таблица 4.2 – Результаты проверки погрешности измерительных головок на всем диапазоне измерений

Поверяемые интервалы	Отсчет по индикатору		Погрешность поверяемого интервала	
	ИЧ-10	ИЦ-25,4	ИЧ-10	ИЦ-25,4
0	0	0	0,00	0,000
0,3	0,3	0,3	0,00	0,000
0,6	0,59	0,6	-0,01	0,000
0,9	0,9	0,901	0,00	0,000
1,2	1,19	1,2	-0,01	+0,001
1,5	1,51	1,501	+0,01	0,000
1,8	1,8	1,801	0,00	0,000
2,1	2,11	2,1	+0,01	-0,001
2,4	2,4	2,4	0,00	-0,001
2,7	2,7	2,7	0,00	0,000
3	3,01	2,998	+0,01	0,000
3,3	3,31	3,3	0,01	0,000
3,6	3,6	3,599	0,00	+0,001
3,9	3,91	3,9	+0,01	+0,001
Погрешность на всем диапазоне измерений, мм	ИЧ-10		ИЦ-25,4	
	$\pm 0,01$		$\pm 0,001$	

На основе данных таблицы построены графики (рисунок 4.1 для ИЧ-10 и рисунок 4.2 для ИЦ-25,4) отражающие динамику изменения погрешности на всем диапазоне измерений при последовательном увеличении поверяемого интервала:

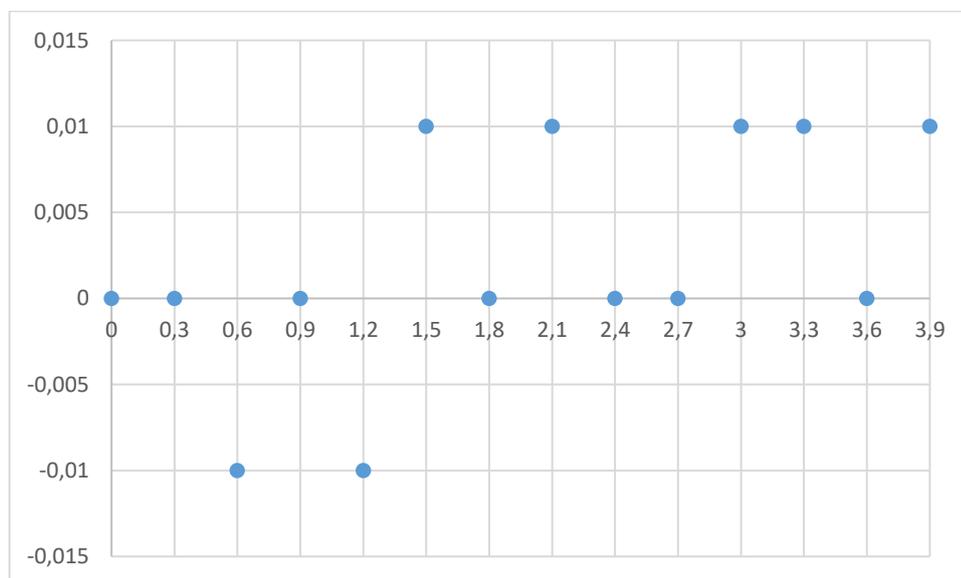


Рисунок 4.1 – Динамика изменения погрешности на всем диапазоне измерений ИЧ-10

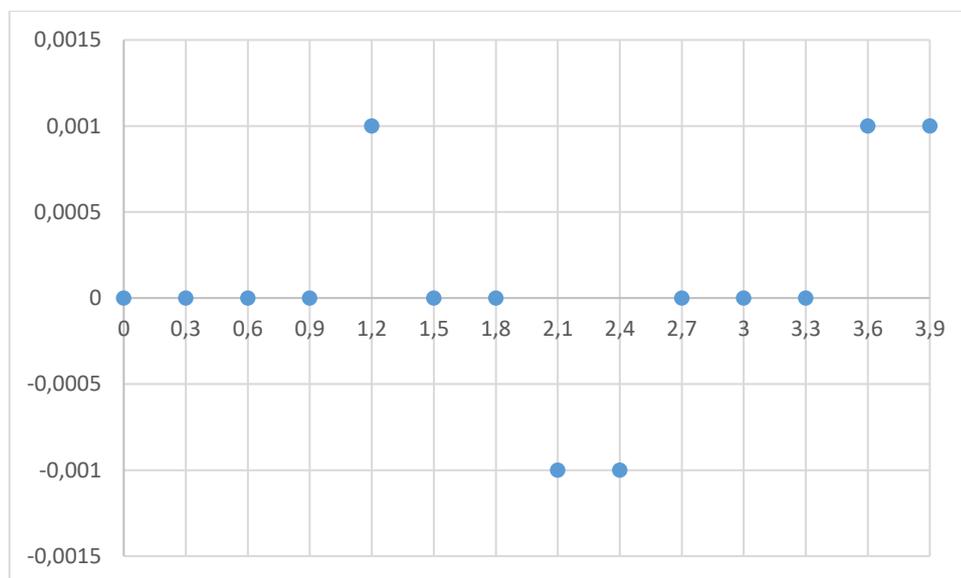


Рисунок 4.2 – Динамика изменения погрешности на всем диапазоне измерений ИЦ-25,4

В раках второй серии измерений использовался набор концевых мер длины N1 КЛ 1. Индикаторная головка настраивалась на ноль с помощью струбцины и набора концевых мер. Измерения проводились на участке от 0 до 1 мм, с шагом 0,1 мм, в соответствии с МИ 2194-92 [60], всего проведено 10 измерений. Результаты второй серии измерений представлены в таблице 4.3:

Таблица 4.3 – Результаты проверки погрешности измерительных головок на участке 1 мм

Поверяемые интервалы	Отсчет по индикатору		Погрешность поверяемого интервала	
	ИЧ-10	ИЦ-25,4	ИЧ-10	ИЦ-25,4
0	0	0	0	0
0,1	0,09	0,1	-0,01	0
0,2	0,2	0,2	0	0
0,3	0,29	0,301	-0,01	0,001
0,4	0,41	0,4	+0,01	0
0,5	0,5	0,5	0	0
0,6	0,61	0,599	+0,01	-0,001
0,7	0,69	0,699	-0,01	-0,001
0,8	0,79	0,8	-0,01	0
0,9	0,91	0,901	-0,01	0,001
1	1,01	1,001	+0,01	0,001
Погрешность на всем диапазоне измерений, мм	ИЧ-10		ИЦ-25,4	
	±0,01		-0,001	

На основе данных таблицы построены графики (рисунок 4.3 для ИЧ-10 и рисунок 4.4 для ИЦ-25,4) отражающие динамику изменения погрешности на участке в 1 мм при последовательном увеличении поверяемого интервала:

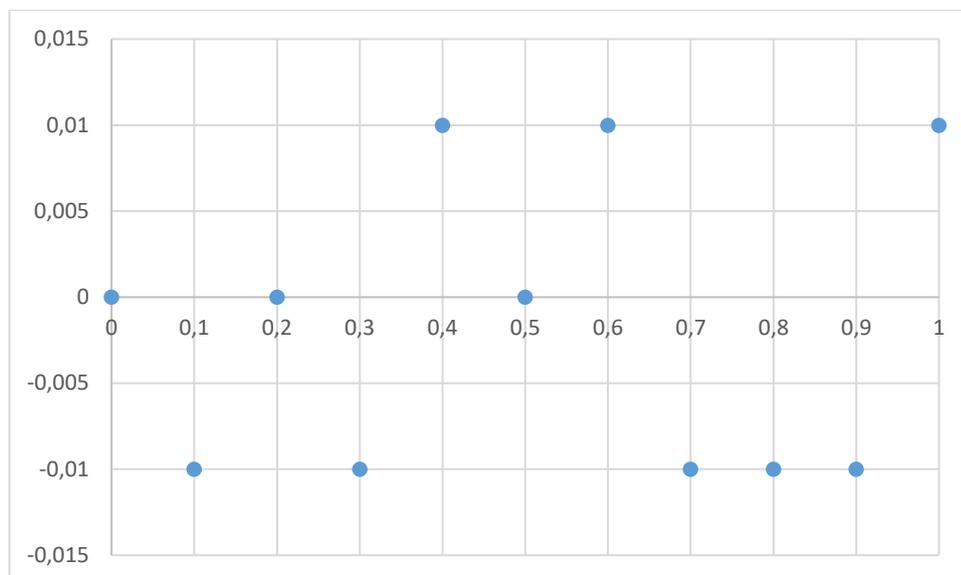


Рисунок 4.3 – Динамика изменения погрешности измерений на диапазоне 1 мм ИЧ-10

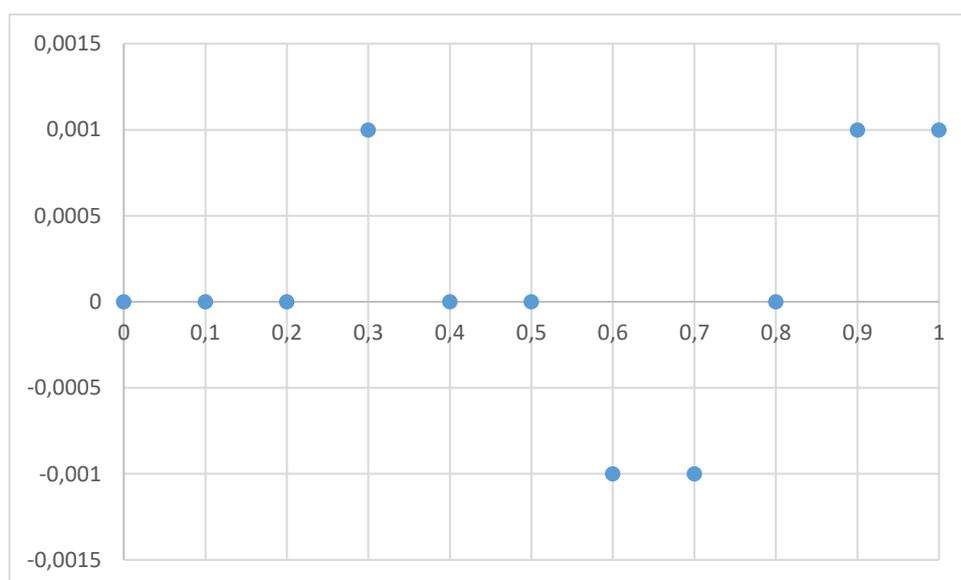


Рисунок 4.4 – Динамика изменения погрешности измерений на диапазоне 1 мм ИЦ-25,4

При сравнении результатов анализа нормативными значениями по ГОСТ 577-68 [24] видно, что измерительная головка Нутромер с ИЧ-10 соответствует точностным требованиям поскольку погрешность в обеих случаях не превышает 0,010 мм, размах показаний также не превышает допустимого в 0,03 мм. Нутромер НИ с цифровой головкой ИЦ-25,4 также соответствует нормативным показателям, указанным в МИ 1917-88 [59], так

погрешность не превышает допустимой в 0,001 мм, размах, также не превышает допустимого значения в 0,002 мм.

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод о том, что элементы поверки и калибровки, рассмотренные в этом подразделе не дают полного представления о величине погрешности нутромера с головкой на заданном значении размера. При поверке и калибровке берется только одно показание на заданном интервале шкалы в пределах диапазона измерений (хода измерительного наконечника). Оценить рассеяние погрешности на конкретном размере невозможно. Поэтому рассмотрим вопрос разработки методики оценки погрешности измерений нутромерами путем проведения многократных измерений на заданном размере.

#### **4.2 Обоснование рационального количества измерений для обеспечения точности при калибровке на ремонтном предприятии**

Для современного ремонтного предприятия точность контрольно-измерительных средств является одним из ключевых факторов, от которого зависит уровень качества восстанавливаемых деталей и агрегатов. Поэтому для обеспечения их правильной работы и обеспечения единства измерений на ремонтных предприятиях должна регулярно проводится калибровка средств измерений.

Необходимость регулярного проведения калибровок обусловлена как, действием нормативных актов – Федерального Закона «Об обеспечении единства измерений» №102 от 26.06.2008 [82], так и практически соображениями, поскольку отсутствие калибровки приводит к постепенному выходу из строя измерительного инструмента, а, следовательно, к возникновению ошибок первого и второго рода, к повторным ремонтам и потере доверия потребителя [5, 7].

При этом правила, регулирующие проведение калибровки, зачастую не имеют под собой научных обоснований и либо опираются на правила

проведения поверки, в рамках которых требуется крайне высокая точность, избыточная для условий калибровки, либо проводится минимальное количество измерений, что наоборот приводит к недостаточной достоверности результатов.

Для определения количества измерений при котором достигается стабильность статических показателей и надежность измерений проведены три серии экспериментов, в рамках которых с помощью трех средств измерений: трехточечного внутреннего микрометрического нутромера GUANGXING 11-14, клинового индикаторного нутромера НИ 18-50 с электронным индикатором ШАНЕ ИЦ-25,4 и рычажного индикаторного нутромера НИ 100-160 с индикаторной головкой ИЧ-10, проведены многократные измерения в количестве 5, 10, 15, 20, 25, 40, 60, 80, 100 измерений с каждым. Условия проведения измерений соответствуют условиям представленным в таблице 4.1, характеристики средств измерений представлены в таблицах 3.1 и 3.2, методики измерений соответствуют описанным в разделах 3.2 и 3.3 данной работы, методика обработки результатов измерений соответствует разделу 3.1, дополнительно к ней определялся процент изменения случайной погрешности при увеличении количества измерений –  $\Delta_{\%P}$ :

$$\Delta_{\%P} = \left(1 - \frac{\Delta_{Pi-1}}{\Delta_{Pi}}\right) 100\% \quad , \quad (4.1)$$

где  $\Delta_{Pi-1}$  и  $\Delta_{Pi}$  - прошлое и текущее значение погрешности измерений при увеличении числа наблюдений.

Обработанные результаты измерений приведены в таблицах 4.4 – 4.6.

Таблица 4.4 – Результаты измерений трехточечным нутромером

Параметр	Количество измерений								
	5	10	15	20	25	40	60	80	100
$\bar{X}$ , мм	10,995 6	10,994 8	10,994 8	10,994 8	10,994 8	10,994 5	10,9942 5	10,994 1	10,9941 1
$\sigma_{\bar{x}}$ , мкм	0,510	0,389	0,279	0,225	0,191	0,164	0,134	0,113	0,098
$\sigma_x$ , мкм	1,140	1,229	1,082	1,005	0,957	1,038	1,035	1,014	0,984

Продолжение таблицы 4.4

$\Delta_P$ , МКМ	1,416	0,879	0,599	0,470	0,395	0,332	0,267	0,226	0,195
$\Delta_{\%P}$ , %	-	37,89	31,84	21,51	16,00	16,02	17,40	15,65	13,49
$\Theta$ , МКМ	2								
$\Theta/\sigma_{\bar{x}}$	3,92	5,14	7,16	8,90	10,44	12,19	14,96	17,64	20,33
$\Delta_{\Sigma}$ , МКМ	2,590	2,273	2,153	2	2	2	2	2	2

Как видно из полученных результатов измерений трёхточечным микрометрическим нутромером, в соответствии с условием формулы 3.7, начиная с 20 измерений происходит значительное снижение влияния случайной составляющей погрешности, как видно по значениям  $\sigma_{\bar{x}}$ ,  $\sigma_x$  и  $\Delta_P$  стабильность статистических параметров начинается при 25 измерениях.

Таблица 4.5 – Результаты измерений клиновым индикаторным нутромером

Параметр	Количество измерений								
	5	10	15	20	25	40	60	80	100
	Результаты расчетов								
$\bar{X}$ , мм	0,828	0,828	0,8293(3)	0,8295	0,8292	0,829	0,8285	0,8285	0,8281
$\sigma_{\bar{x}}$ , МКМ	2,000	1,333	1,182	0,881	0,800	0,665	0,631	0,599	0,537
$\sigma_x$ , МКМ	4,472	4,216	4,577	3,940	4,000	5,150	6,308	3,789	4,800
$\Delta_P$ , МКМ	5,553	3,016	2,235	1,894	1,651	1,430	1,252	1,112	1,018
$\Delta_{\%P}$ , %	-	45,68	25,90	15,25	12,83	13,36	12,50	11,16	8,43
$\Theta$ , МКМ	6								
$\Theta/\sigma_{\bar{x}}$	3,00	4,50	5,08	6,81	7,50	9,02	9,51	10,01	11,18
$\Delta_{\Sigma}$ , МКМ	0,846	0,698	0,649	0,649	0,638	0,600	0,600	0,600	0,600

Как видно из полученных расчетов, по результатам измерений клиновым индикаторным нутромером, в соответствии с условием формулы 3.7, случайная составляющая погрешности исключается при 40 измерениях, стабилизация статистических параметров  $\sigma_{\bar{x}}$ ,  $\sigma_x$  и  $\Delta_P$  начинается с 25 измерений.

Результаты, представленные в таблице 4.6 говорят о том, что исключение погрешности измерений происходит при 100 измерениях в соответствии с условием формулы 3.7, при этом статистические параметры  $\sigma_{\bar{x}}$ ,  $\sigma_x$  и  $\Delta_P$  начинают стабилизироваться при 20 измерениях.

Таблица 4.6 – Результаты измерений рычажным индикаторным нутромером

Параметр	Количество измерений								
	5	10	15	20	25	40	60	80	100
$\bar{X}$ , мм	0,048	0,058	0,06	0,06	0,0608	0,0605	0,062167	0,0625	0,0627
$\sigma_{\bar{x}}$ , мкм	9,695	6,799	4,577	3,627	2,996	2,263	1,716	1,418	1,213
$\sigma_x$ , мкм	21,679	21,499	17,728	16,222	14,978	14,313	13,288	12,679	12,132
$\Delta_p$ , мкм	26,919	15,380	9,817	7,592	6,083	4,878	3,833	3,022	2,407
$\Delta_{\%p}$ , %	-	42,87	36,17	22,67	19,88	19,81	21,42	21,16	20,33
$\Theta$ , мкм	10								
$\Theta/\sigma_{\bar{x}}$	1,03	1,47	2,18	2,76	3,34	4,42	5,83	7,05	8,24
$\Delta_{\Sigma}$ , мкм	2,693	1,801	1,411	1,276	1,193	1,148	1,112	1,077	1,000

Чтобы определить стабильность измерительного процесса построены графики зависимости  $\sigma_x$  от количества измерений, по результатам анализа данных полученных в ходе всех трех серий измерений (рисунок 4.5).

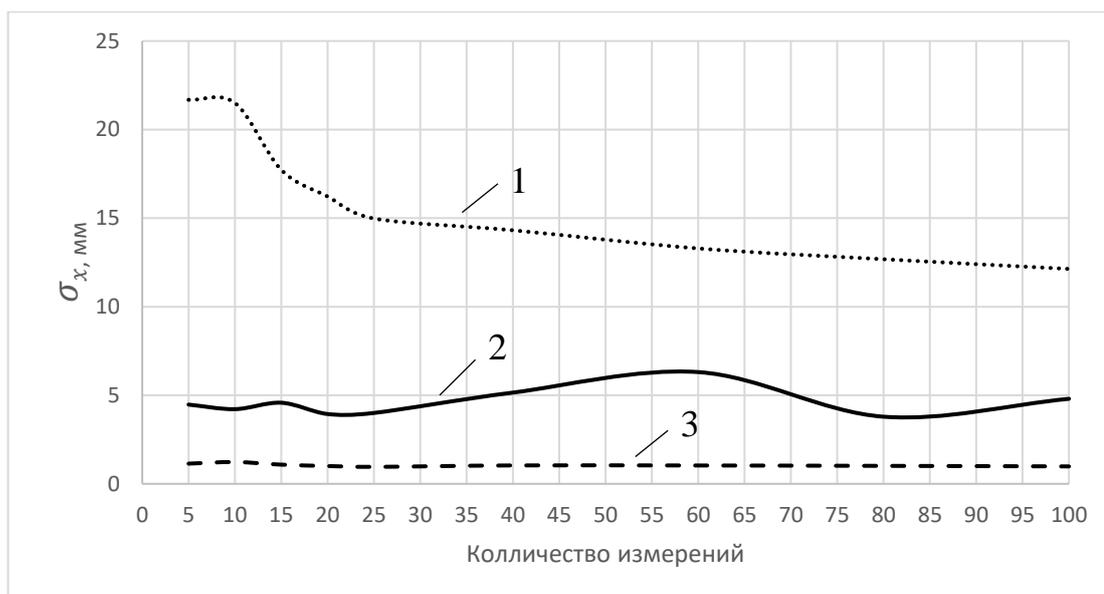


Рисунок 4.5 – Изменение  $\sigma_x$  при увеличении количества измерений (1– рычажный нутромер, 2- клиновой нутромер, 3 – трехточечный нутромер)

Для лучшего представления динамики изменений случайной погрешности  $\Delta_p$  при увеличении количества измерений составлен график по показаниям  $\Delta_{\%p}$ , полученным в результате всех трех серий измерений (рисунок 4.6).

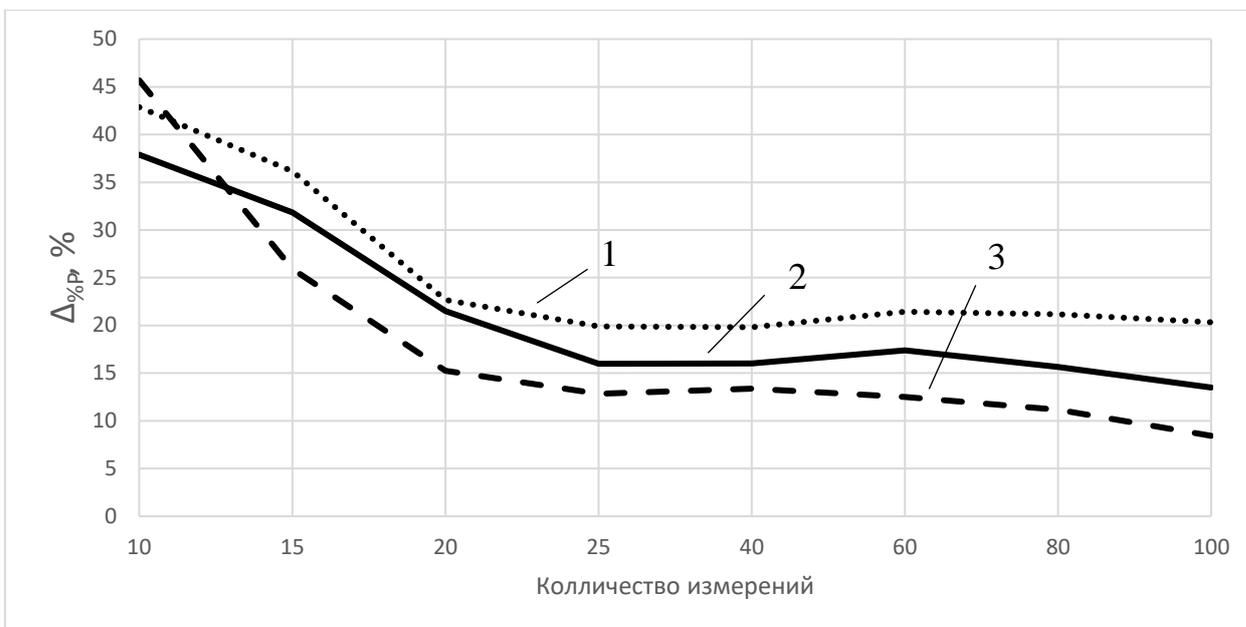


Рисунок 4.6 – Динамика изменения погрешности нутромеров при увеличении количества измерений (1- трехточечный нутромер, 2- клиновое нутромер, 3 –рычажный нутромер)

Полученные графики говорят о том, что динамика измерения случайной погрешности приобретает линейный характер при достижении 25 и 60 измерений, при этом разница в значениях случайных погрешностей составляет незначительную, при этом проведение 25 измерений по сравнению с 60 несет меньше издержек, и при этом облегчает обработку данных.

На основе графиков определены математические зависимости изменения среднеквадратического отклонения в зависимости от числа измерений для всех приборов (формула (4.1) для трёхточечного нутромера, формула (4.2) для клинового нутромера, формула (4.3) для рычажного нутромера):

$$\sigma_x = -0,000002n^3 + 0,0003n^2 - 0,0163n + 1,2611; \quad (4.1)$$

$$\sigma_x = -0,000003n^3 + 0,0006n^2 - 0,0405n + 4,62; \quad (4.2)$$

$$\sigma_x = -0,00002n^3 + 0,0033n^2 - 0,2143n + 9,7084, \quad (4.3)$$

где  $n$  – число измерений.

Таким образом результаты исследования говорят о том, что при проведении калибровки на ремонтном машиностроительном предприятии, количество измерений в размер 25, с одной стороны гарантирует достаточную точность, а с другой стороне не несёт за собой лишних издержек.

### 4.3 Исследование метрологического обеспечения при контроле и дефектации коренных опор блока цилиндров ЯМЗ

Для совершенствования метрологического обеспечения ремонтных предприятий, при измерении отверстий, проведено исследование, посвященное сравнению точности измерений отверстий коренных опор блоков цилиндров двигателей ЯМЗ, как новых, так при дефектации, проводимых с помощью нутромеров, рекомендуемых в руководстве по ремонту ЯМЗ со средствами измерений, выбранными по критериям, представленным в разделе 3.2 данной работы.

В рамках исследования рассмотрено влияние погрешности измерений на зону рассеяния отверстий коренных опор двигателя ЯМЗ, формирования при этом количества неправильно принятых и неправильно забракованных опор, а также определения вероятностной величины выхода за границу дефектации у неправильно принятых опор.

Точностные параметры при дефектации контролируемого параметра – коренной опоры двигателя ЯМЗ-238 представлены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Точностные параметры коренной опоры двигателя ЯМЗ-238

Параметр	Номинальный размер с отклонениями, мм	Допуск, мкм	Допускаемая погрешность $\delta_{изм}$ , мкм	Заключение
Коренная опора	116 <sup>+0,021</sup>	21	6,93	Браковать, при $D > \varnothing 116,021$ мм

Коренные подшипники тракторных и комбайновых двигателей при микрометраже измеряются по внутреннему диаметру в двух сечениях и в трех

плоскостях – перпендикулярно к плоскости разреза ( $S_1$ ) и под углом  $45^\circ$  от этого направления в обе стороны ( $S_2$  и  $S_3$ ). (рисунок 4.7). Определялся средний размер, который принимался как действительный диаметр.

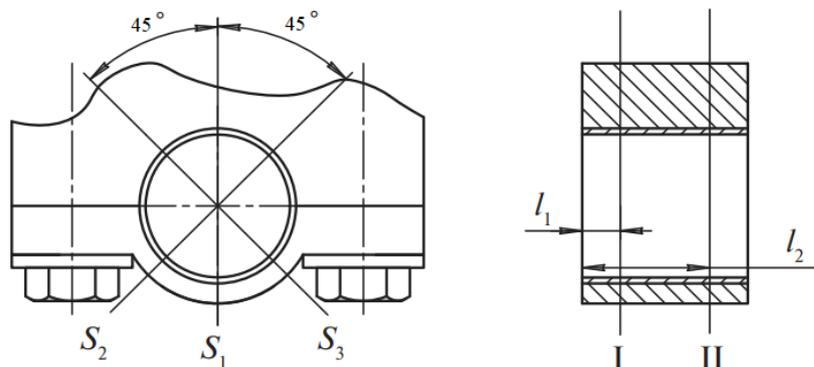


Рисунок 4.7 – Расположение сечений и плоскостей при микрометраже коренных подшипников дизельных двигателей

Для оценки рассеяния был произведен контроль коренных опор новых блоков цилиндров двигателей ЯМЗ-238 в количестве 20 штук. В каждом блоке было измерено по 5 опор. Результаты обработки статистических данных контроля отражены в виде гистограммы, полигона и теоретической кривой рассеяния диаметров отверстий опор (рисунок 4.8).

Из полученных данных видно, что на заводе изготовителе применяется высокоточное металлорежущее оборудование для формирования размеров коренных опор и зона рассеяния размеров значительно меньше допуска, коэффициент точности равен 1,3. Зона рассеяния начинается со стороны наименьших размеров – 116,000 мм, среднее значение – 116,008 мм, а заканчивается на отметке 116,015 мм. Для такого распределения ясно, что на заводе формируют не только заданную точность, но и запас на износ коренных опор, так как начало эксплуатации с меньших размеров отверстий позволяет повысить долговечность и обеспечить большие натяги при формировании соединения с вкладышами.

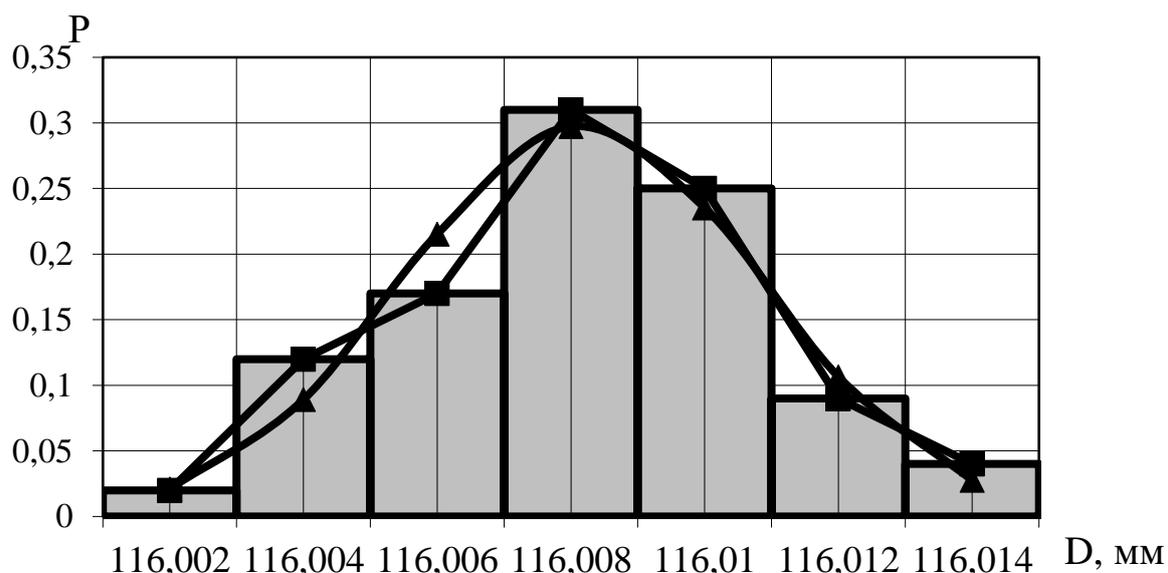


Рисунок 4.8 – Рассеяние размеров отверстий коренных опор двигателя ЯМЗ-238  $D=116^{+0,021}$  мм новых блоков цилиндров 1 – теоретическая кривая; 2 – гистограмма; 3 – полигон

В плане метрологического обеспечения контроля новых блоков цилиндров следует отметить, что сплошной контроль здесь нецелесообразен, он нужен лишь для выборочной проверки качества отверстий на новых партиях поступающих блоков.

А вот при дефектации блоков цилиндров наблюдается совсем другая картина. Дефектацию для данных отверстий следует проводить также, как и микрометраж. Это обусловлено тем, что блок цилиндров является дорогостоящей деталью и необходимо исключить риски попадания на сборку блоков с бракованными коренными опорами. Иначе возможен отказ у потребителя из-за проворачивания вкладышей, что приведет к полной переборке двигателя и значительным потерям для ремонтного предприятия.

В технической документации по ремонту двигателя ЯМЗ-238 для проведения контроля отверстий под вкладыши коренных подшипников рекомендован нутромер НИ 100-160 (таблица 4.8) с ценой деления индикатора 0,01 мм. При настройке по концевым мерам второго класса погрешность

такого прибора  $\Delta \lim = \pm 12$  мкм, а при настройке по концевым мерам первого класса  $\Delta \lim = \pm 10$  мкм. Применение таких средств измерений нецелесообразно, т.к. не выполняется принцип (3.10), что средство измерений должно быть в три раза и более точнее, чем допуск контролируемого параметра.

В нашем случае допуск размера  $T = 21$  мкм, следовательно контролировать его можно только средствами измерений, с погрешностью  $\lim \leq 7$  мкм.

Для анализа формирования рассеяния диаметров отверстий под вкладыши коренных подшипников в процессе контроля с целью сокращения количества неправильно принятых и неправильно забракованных опор были выбраны следующие средства измерений, таблица 4.8.

Таблица 4.8 – Нутромеры для контроля коренных опор двигателя ЯМЗ на размере  $D=116^{+0,021}$

Условное обозначение	Наименование	Диапазон измерений, мм		Цена деления, мм	Погрешность измерения, мкм
		Нутромера	Индикаторной головки		
СИ1	Нутромер с цифровым индикатором часового типа ИЧЦ МАНР	100-160	0-12,5	0,0001	$\pm 2$
СИ2	Нутромер с цифровым индикатором часового типа ИЧЦ при настройке по установочным кольцам	100-160	0-12,5	0,001	$\pm 3,5$
СИ3	Нутромер с цифровым индикатором часового типа ИЧЦ при настройке по концевым мерам 1 кл.	100-160	0-12,5	0,001	$\pm 6,5$
СИ4	Нутромер с индикатором часового типа ИЧ-10 при настройке по концевым мерам 1 кл.	100-160	0-10	0,01	$\pm 10$
СИ5	Нутромер с индикатором часового типа ИЧ-10 при настройке по концевым мерам 2 кл.	100-160	0-10	0,01	$\pm 12$

Для оценки рассеяния был произведен контроль коренных опор блоков цилиндров двигателей ЯМЗ-238, бывших в эксплуатации, в количестве 20 штук. В каждом блоке было измерено по 5 опор. Результаты обработки статистических данных контроля отражены в виде гистограммы, полигона и теоретической кривой рассеяния диаметров отверстий опор (таблица 4.9-4.10, рисунок 4.9).

Таблица 4.9 – Статистические характеристики рассеяния диаметров коренных опор блока цилиндров ЯМЗ-238 при контроле и дефектации

Параметр распределения	Значение для отверстий	
	новых блоков	изношенных блоков
Среднее арифметическое $\bar{x}$ , мм	116,0082	116,0123
Среднеквадратическое отклонение $\sigma_{\text{тех}}$ , мм	0,0027	0,0062
Зона рассеяния $\omega$ , мм	0,0161	0,0372
Коэффициент точности $K_T = T/\omega$	1,3	0,56

Данные по анализу рассеяния представлены в таблице 4.9, откуда видно, что имеет место неисправимый брак, который составляет 8%. В целом, из 20 блоков цилиндров будет забраковано 6, так как у четырех блоков выявлено по одной бракованной опоре из пяти, вышедшей за границы поля допуска, а у двух блоков – две такие опоры с элементами фреттинга на поверхности под вкладыши.

Таблица 4.10 – Распределение размеров коренных опор двигателя ЯМЗ при дефектации

Параметр	Размер, мм	Процент деталей, %	Теоретическая вероятность
Количество годных деталей	116 <sup>+0,021</sup>	92	0,9927
Количество брака	Свыше 116,021	8	0,0037

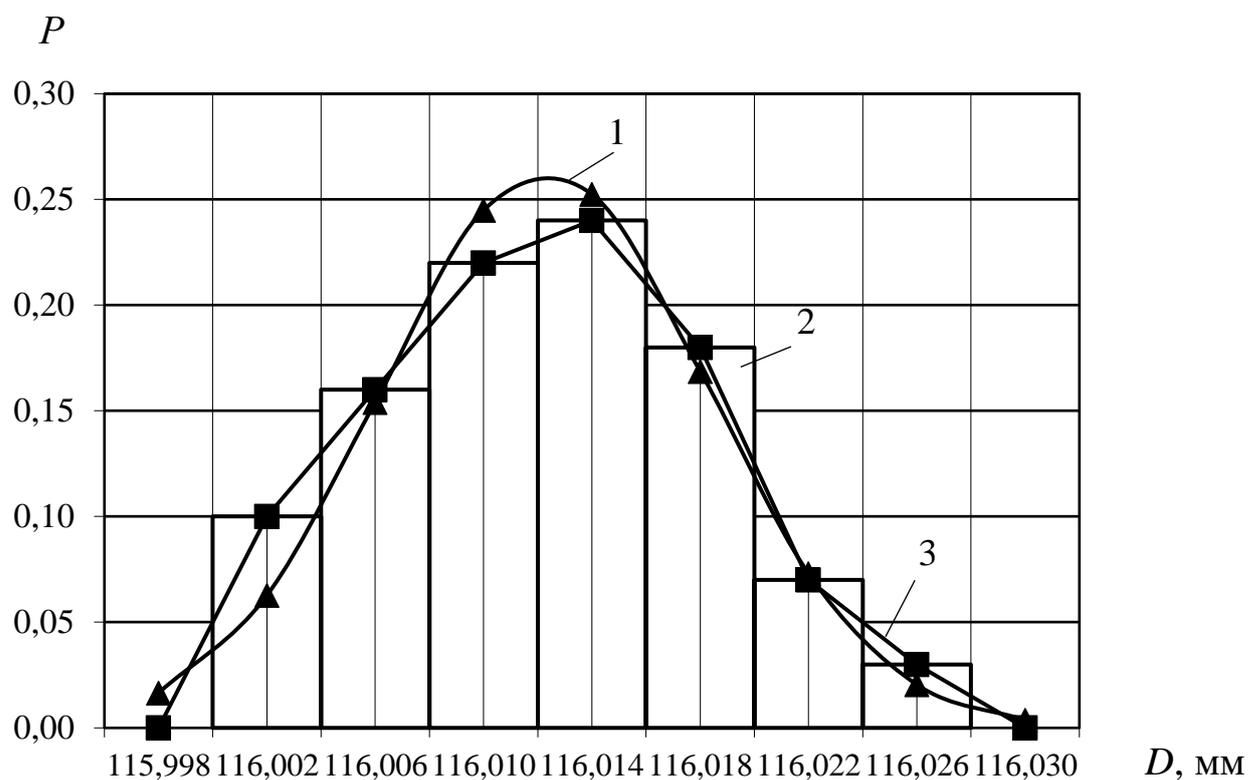


Рисунок 4.9 – Рассеяние изношенных размеров отверстий коренных опор двигателя ЯМЗ-238  $D=116^{+0,021}$  мм 1 – теоретическая кривая; 2 – гистограмма; 3 – полигон

Определение вышеперечисленных параметров  $n$ ,  $m$  и  $c$ , характеризующих уровень брака от наличия погрешности измерений, производилось по методике [84] (таблица 4.11, рисунок 4.10).

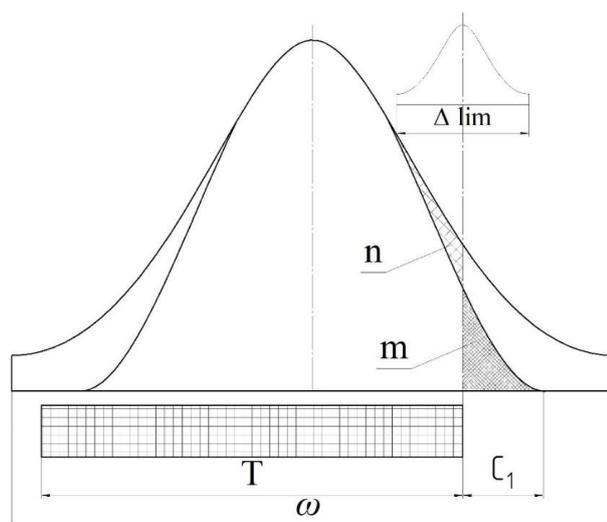


Рисунок 4.10 – Теоретическая модель формирования брака при дефектации коренных опор

Таблица 4.11 – Параметры при дефектации коренных опор двигателя ЯМЗ при использовании нутромеров с различной погрешностью измерений

Параметр	Обозначение	Единица измерений	Средство измерений				
			СИ1	СИ2	СИ3	СИ4	СИ5
Контролируемый размер	$D$	мм	116 <sup>+0,021</sup>				
Предельная погрешность СИ	$\Delta_{lim}$	мкм	±2,0	±3,5	±6,5	±10	±12
СКО погрешности измерения	$\sigma_{met}$	мкм	1	1,75	3,25	5	6
Расстояние от середины зоны рассеяния до границы поля допуска	$X$	мкм	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7
Отношение удвоенного $X$ к СКО рассеяния размеров	$2X/\sigma_{тех}$	-	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81
Относительная погрешность измерения (коэффициент точности измерения)	$A_{met}$	%	2,9	5,0	9,3	14,4	17,2
Количество неправильно принятых опор	$m$	%	1,12	1,76	2,5	3,3	3,5
Количество неправильно забракованных опор	$n$	%	1,54	3,0	6,2	12,7	16,5
Величина выхода измеряемого параметра за границу допуска у неправильно принятых опор	$c$	мкм	0,43	1,04	1,91	3,04	3,83

На основе таблицы 4.11 построен график отражающий динамику увеличения количества неправильно принятых отверстий и неправильно забракованных отверстий, при увеличении погрешности измерений СИ (рисунок 4.11).

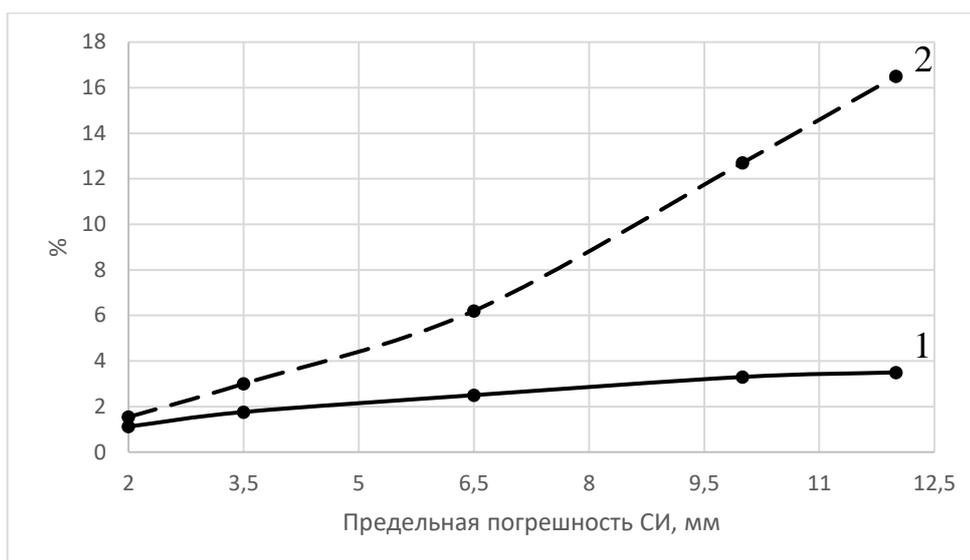


Рисунок 4.11 – Зависимость количества неправильно принятых и неправильно забракованных отверстий от погрешности измерений СИ, при контроле коренных опор (1 – количество неправильно принятых опор, %, 2 – количество неправильно забракованных опор, %)

Построенные графики позволили выявить зависимости количества (в процентах) неправильно принятых и неправильно забракованных отверстий от погрешности СИ (формулы 4.9 и 4.10 соответственно):

$$m = 0,5851\Delta^{1,3225} ; \quad (4.9)$$

$$n = 0,7533\Delta^{0,6342} . \quad (4.10)$$

где  $\Delta$  – погрешность нутромеров при контроле, мкм; размерности  $m$  и  $n$  – в процентах.

Коэффициенты корреляции данных степенных зависимостей (4.9) и (4.10) – св. 0,99.

Как видно из таблицы 4.11, при сравнении нутромера НИ-160, рекомендуемого к применению руководством по ремонту двигателя ЯМЗ-238 с  $\Delta_{lim} = \pm 12$  мкм, количество неправильно забракованных опор на 15% (в 10,7 раза) больше, количество неправильно принятых опор на 2,4% больше (в 3,1 раза), чем при использовании более точного нутромера с погрешностью  $\Delta_{lim} = \pm 2$  мкм. Следовательно, научно обоснована и практически доказана рациональность применения наиболее точного прибора из ряда универсальных средств измерений, удовлетворяющих базовому условию

выбора (3.10), иначе возможно увеличение процента потерь в виде отправки в лом таких дорогостоящих деталей, как блоки цилиндров, стоимость которых гораздо больше стоимости предлагаемого средства измерений. С другой стороны, можно использовать и более дешевый нутромер с погрешностью  $\Delta_{lim} = \pm 3,5$  мкм, у которого количество неправильно забракованных опор будет на 13,5% меньше, а количество неправильно принятых опор на 1,74% меньше, чем при использовании базового нутромера с погрешностью  $\Delta_{lim} = \pm 12$  мкм.

Также следует иметь в виду, что именно неправильное забракование ведет к потере такой дорогой детали, как блок цилиндров. Неправильное принятие сильно не угрожает большими потерями.

#### **4.4 Исследование метрологического обеспечения при контроле и дефектации отверстий втулок под шейки распределительного вала ЯМЗ**

Для совершенствования метрологического обеспечения ремонтных предприятий, при измерении отверстий, проведено исследование, посвященное сравнению точности измерений отверстий втулок под шейки распределительного вала блоков цилиндров двигателей ЯМЗ, как новых, так при дефектации, проводимых с помощью контрольно-измерительных приспособлений, рекомендуемых в руководстве по ремонту ЯМЗ со средствами, выбранными по критериям, представленным в разделе 3.2 данной работы.

В рамках исследования рассмотрено влияние погрешности измерений на зону рассеяния отверстий втулок под шейки распределительного вала блоков цилиндров двигателей ЯМЗ, формирования при этом количества неправильно принятых и неправильно забракованных отверстий втулок, а также определения вероятностной величины выхода за границу дефектации у неправильно принятых отверстий втулок под шейки распределительного вала.

Точностные параметры при дефектации контролируемого параметра – отверстий втулок под шейки распределительного вала блоков цилиндров двигателей ЯМЗ ЯМЗ-238 представлены в таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Точностные параметры отверстий втулок под шейки распределительного вала блоков цилиндров двигателей ЯМЗ

Параметр	Номинальный размер с отклонениями, мм	Допуск, мкм	Допускаемая погрешность $\delta_{изм}$ , мкм	Заключение
Отверстия втулок под шейки распределительного вала блоков цилиндров двигателей ЯМЗ	$54^{+0,03}$	30	9	Браковать, при $D > 54,03$ мм

Отверстий втулок под шейки распределительного вала блоков цилиндров тракторных и комбайновых двигателей при микрометраже измеряются по внутреннему диаметру в двух сечениях и в двух плоскостях (рисунок 4.11). Определялся средний размер, который принимался как действительный диаметр.

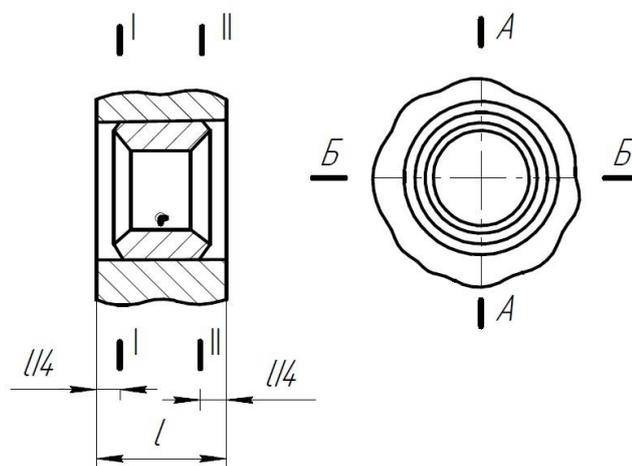


Рисунок 4.10 – Расположение сечений и плоскостей при микрометраже отверстий втулок под шейки распределительного вала блоков цилиндров

Для оценки рассеяния был произведен контроль отверстий втулок под шейки распределительного вала блоков цилиндров двигателей ЯМЗ-238, которые были приобретены в качестве запасных частей, в количестве 20 штук.

В каждом блоке было измерено по 5 втулок. Результаты обработки статистических данных контроля отражены в виде гистограммы, полигона и теоретической кривой рассеяния диаметров отверстий втулок под шейки распределительного вала (рисунок 4.12).

Из полученных данных видно, что на заводе изготовителе применяется высокоточное металлорежущее оборудование для формирования размеров отверстий втулок под шейки распределительного вала блоков цилиндров и зона рассеяния размеров значительно меньше допуска, коэффициент точности равен 1,79. Зона рассеяния начинается со стороны наименьших размеров – 54,000 мм, среднее значение – 54,006 мм, а заканчивается на отметке 54,014 мм. Для такого распределения ясно, что на заводе формируют не только заданную точность, но и запас на износ отверстий втулок под шейки распределительного вала, так как начало эксплуатации с меньших размеров отверстий позволяет повысить долговечность путем обеспечения наименьших зазоров в соединениях с шейками распределительного вала.

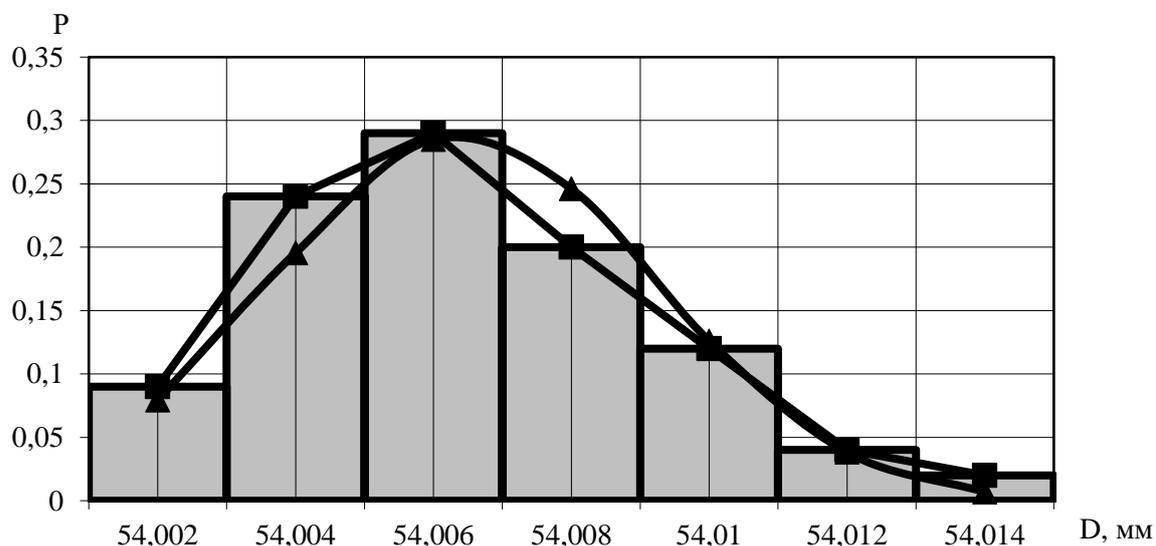


Рисунок 4.12 - Рассеяние размеров отверстий втулок под шейки распределительного вала блоков цилиндров двигателей ЯМЗ-238  $D=54^{+0,03}$  мм новых блоков цилиндров 1 - теоретическая кривая; 2 - гистограмма; 3 - полигон

В плане метрологического обеспечения контроля новых блоков цилиндров следует отметить, что сплошной контроль здесь нецелесообразен, он нужен лишь для выборочной проверки качества отверстий втулок на новых партиях поступающих блоков.

При дефектации наблюдается совсем другая картина. Дефектацию для данных отверстий следует проводить также, как и микрометраж. Это обусловлено тем, что блок цилиндров является дорогостоящей деталью и необходимо исключить риски попадания на сборку блоков с бракованными отверстиями втулок под шейки распределительного вала. Иначе возможен отказ у потребителя, что приведет к полной переборке двигателя и значительным потерям для ремонтного предприятия.

В технической документации по ремонту двигателя ЯМЗ-238 для проведения контроля отверстий втулок под шейки распределительного вала рекомендован нутромер НИ 50-100, с ценой деления индикатора 0,01 мм. При настройке по концевым мерам первого класса погрешность такого прибора  $\Delta_{lim} = \pm 10$  мкм, а при настройке по концевым мерам второго класса  $\Delta_{lim} = \pm 12$  мкм. Применение такого средства измерения нецелесообразно, т.к. не выполняется принцип (3.11), что средство измерений должно быть в три раза и более точнее, чем допуск контролируемого параметра.

Допуск отверстий втулок под шейки распределительного вала  $T = 30$  мкм, следовательно контролировать его можно только средствами измерений, с погрешностью  $\Delta_{lim} \leq 9$  мкм.

Для анализа формирования рассеяния диаметров отверстий втулок под шейки распределительного вала в процессе контроля с целью сокращения количества неправильно принятых и неправильно забракованных отверстий втулок под шейки распределительного вала были выбраны следующие средства измерений, таблица 4.13.

Таблица 4.13 – Нутромеры для контроля отверстий втулок под шейки распределительного вала двигателя ЯМЗ на размере  $D=54^{+0,03}$

Условное обозначение	Наименование	Диапазон измерений, мм		Цена деления, мм	Погрешность измерения, мкм
		Нутромера	Индикаторной головки		
СИ1	Нутромер с цифровым индикатором часового типа ИЧЦ МАНР	50-100	0-12,5	0,0001	±2
СИ2	Нутромер с цифровым индикатором часового типа ИЧЦ при настройке по установочным кольцам	50-100	0-12,5	0,001	±3,5
СИ3	Нутромер с цифровым индикатором часового типа ИЧЦ при настройке по концевым мерам 1 кл.	50-100	0-12,5	0,001	±6,5
СИ4	Нутромер с индикатором часового типа ИЧ-10 при настройке по концевым мерам 1 кл.	50-100	0-10	0,01	±10
СИ5	Нутромер с индикатором часового типа ИЧ-10 при настройке по концевым мерам 2 кл.	50-100	0-10	0,01	±12

Для оценки рассеяния был произведен контроль отверстий втулок под шейки распределительного вала двигателей ЯМЗ-238, бывших в эксплуатации, в количестве 20 штук. В каждом блоке было измерено по 5 отверстий. Результаты обработки статистических данных контроля отражены в виде гистограммы, полигона и теоретической кривой рассеяния диаметров отверстий втулок (рисунок 4.13, таблица 4.14).

Таблица 4.14 – Статистические характеристики рассеяния диаметров отверстий втулок под шейки распределительного вала ЯМЗ-238 при контроле и дефектации

Параметр распределения	Значение для отверстий втулок	
	новых блоков	изношенных блоков
Среднее арифметическое $\bar{x}$ , мм	54,0064	54,0996
Среднеквадратическое отклонение $\sigma$ , мм	0,0028	0,0542
Зона рассеяния $\omega$ , мм	0,0168	0,3252
Коэффициент точности $K_T = T/\omega$	1,79	-

Данные по анализу таблицы 4.15 позволяют увидеть, что имеет место неисправимый брак, который составляет 86%. В целом, из 20 блоков цилиндров будет забраковано 19, так как у всех блоков выявлены бракованные отверстия, вышедшие за границы поля допуска, а у одного блока имеются признаки проворота втулок.

Таблица 4.15 – Распределение размеров отверстий втулок под шейки распределительного вала двигателя ЯМЗ при дефектации

Параметр	Размер, мм	Процент деталей, %	Теоретическая вероятность
Количество годных деталей	$54^{+0,03}$	14	0,9459
Количество брака	Свыше 54,03	86	0,0541

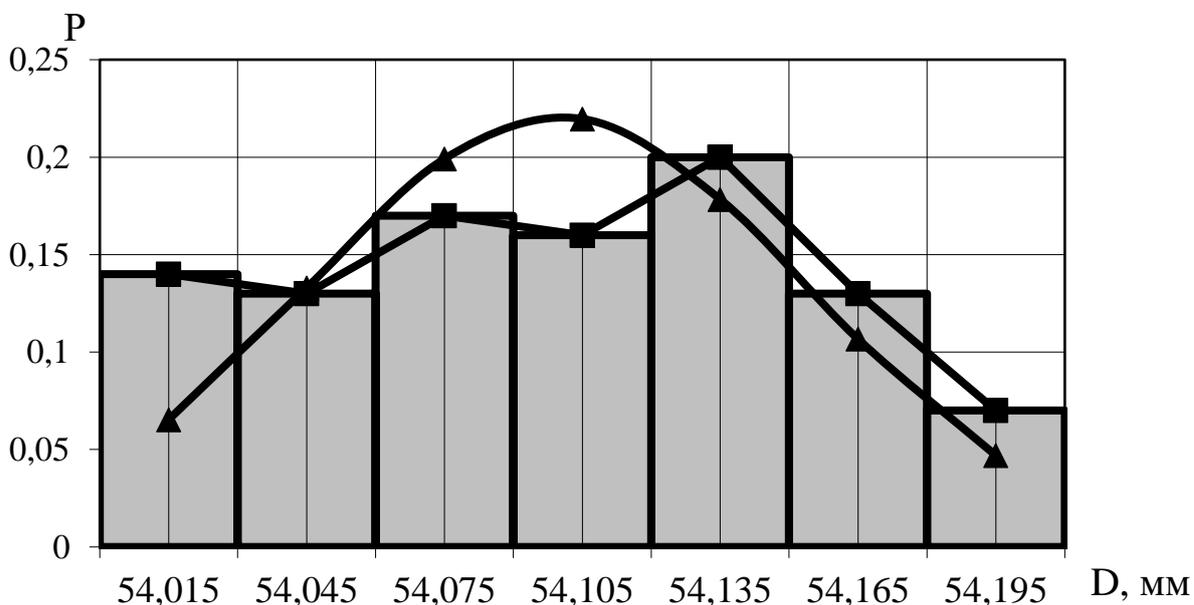


Рисунок 4.13 – Рассеяние изношенных размеров отверстий втулок под шейки распределительного вала распределительного вала двигателя ЯМЗ-238  
 $D=54^{+0,03}$  мм:

1 - теоретическая кривая; 2 - гистограмма; 3 - полигон

Определение параметров разбраковки  $n$ ,  $m$  и  $c$ , характеризующих уровень брака от наличия погрешности измерений, производилось по методике [84] (таблица 4.16, рисунок 4.14).

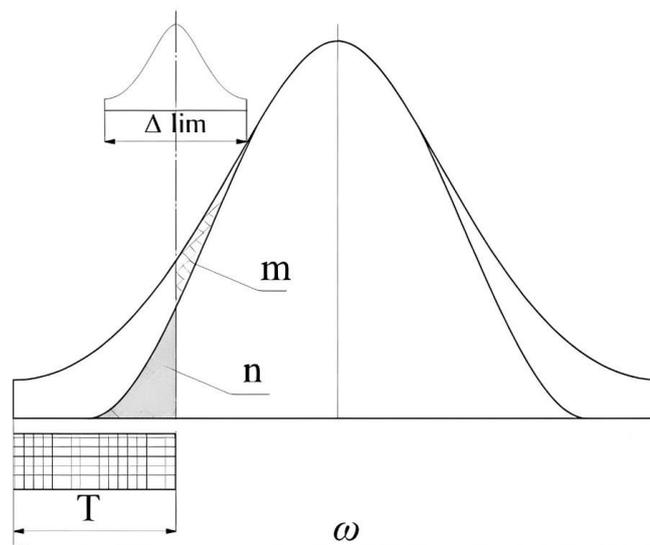


Рисунок 4.14 – Теоретическая модель формирования брака при дефектации отверстий втулок под шейки распределительного вала

Таблица 4.16 – Параметры при дефектации отверстий втулок под шейки распределительного вала двигателя ЯМЗ при использовании нутромеров с различной погрешностью измерений

Параметр	Обозначение	Единица измерений	Средство измерений				
			СИ1	СИ2	СИ3	СИ4	СИ5
Контролируемый размер	$D$	мм	$116^{+0,021}$				
Предельная погрешность СИ	$lim$	мкм	$\pm 2,0$	$\pm 3,5$	$\pm 6,5$	$\pm 10$	$\pm 12$
СКО погрешности измерения	$\sigma_{met}$	мкм	1	1,75	3,25	5	6
Расстояние от середины зоны рассеяния до границы поля допуска	$X$	мм	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067
Отношение удвоенного $X$ к СКО рассеяния размеров	$2X/\sigma_{тех}$	-	2,47	2,47	2,47	2,47	2,47
Относительная погрешность измерения (коэффициент точности измерения)	$A_{met}$	%	0,75	1,31	2,43	3,73	4,48
Количество неправильно принятых отверстий	$m$	%	1,2	2,1	3,9	6,8	8,3
Количество неправильно забракованных отверстий	$n$	%	0,1	0,2	0,4	0,6	0,7
Величина выхода измеряемого параметра за каждую границу допуска у неправильно принятых отверстий	$c$	мкм	2,21	2,67	4,02	5,36	8,04

Но основе таблицы 4.16 построен график отражающий динамику увеличения количества неправильно принятых деталей и неправильно забракованных деталей, при увеличении погрешности измерений СИ (рисунок 4.15).

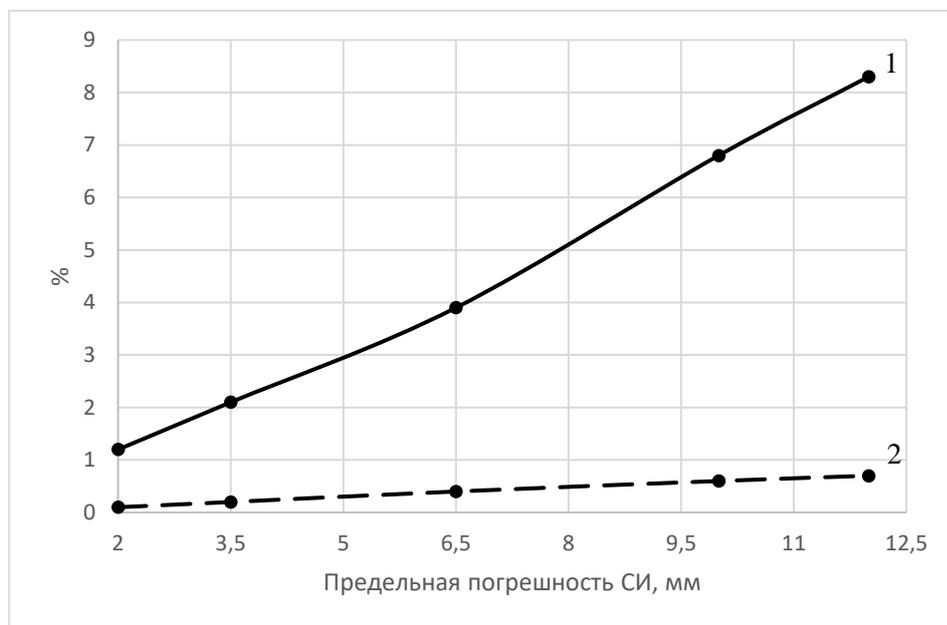


Рисунок 4.15 – Зависимость количества неправильно принятых и неправильно забракованных отверстий от погрешности измерений СИ, при контроле отверстий втулок распределительного вала (1 – количество неправильно принятых деталей, %, 2 – количество неправильно забракованных деталей, %)

Построенные графики позволили выявить зависимости количества (в процентах) неправильно принятых и неправильно забракованных отверстий от погрешности СИ (формулы (4.11) и (4.12) соответственно):

$$m = 0,5499\Delta^{1,0817} ; \quad (4.11)$$

$$n = 0,0493\Delta^{1,0867} , \quad (4.12)$$

где  $\Delta$  – погрешность нутромеров при контроле, мкм; размерности  $m$  и  $n$  – в процентах.

Коэффициенты корреляции данных степенных зависимостей (4.11) и (4.12) – св. 0,99.

Как видно из таблицы, при сравнении нутромера НИ-100, рекомендуемого к применению руководством по ремонту двигателя ЯМЗ-238 с  $\Delta_{lim} = \pm 12$  мкм, количество неправильно забракованных отверстий втулок

под шейки распределительного вала на 0,6% (в 7 раз) больше, количество неправильно принятых отверстий втулок под шейки распределительного вала на 7,1% больше (в 6,9 раза), чем при использовании более точного нутромера с погрешностью  $\Delta_{lim} = \pm 2$  мкм. С другой стороны, можно использовать и более дешевый нутромер с погрешностью  $\Delta_{lim} = \pm 3,5$  мкм, у которого количество неправильно забракованных отверстий будет на 0,5% (в 3,5 раза) меньше, а количество неправильно принятых отверстий на 6,2% (в 4 раза) меньше, чем при использовании базового нутромера с погрешностью  $\Delta_{lim} = \pm 12$  мкм.

Следовательно, научно обоснована и практически доказана рациональность применения наиболее точного прибора из ряда универсальных средств измерений, удовлетворяющих базовому условию выбора (3.10), иначе возможно увеличение процента потерь в виде отправки в лом таких дорогостоящих деталей, как блоки цилиндров, стоимость которых гораздо больше стоимости предлагаемого средства измерений.

#### 4.5 Выводы

1. Показано, что операции поверки и калибровки для нутромеров осуществляются по всему диапазону измерений однократно в каждой точке. Этот метод дает представление о погрешности измерений, но не может оценить рассеяние показаний прибора на заданном размере.

2. Предложено проводить оценку погрешности нутромеров путем проведения многократных измерений образцовой меры, равной контролируемому размеру. Получены математические зависимости случайной погрешности измерений от числа наблюдений для трех видов нутромеров – с рычажной передачей, с клиновой передачей и трехточечного. На основании анализа зависимостей установлено, что достаточно проводить 25 измерений для достоверной оценки рассеяния погрешности нутромеров.

3. Выявлено, что при контроле отверстий коренных опор  $\varnothing 116^{+0,021}$  блока цилиндров двигателя ЯМЗ-238 рациональнее всего использовать нутромер НИ 160 с головкой ИЧЦ МАНР, погрешность которого  $\Delta lim = \pm 2$  мкм, что позволит снизить количество неправильно забракованных опор на 15% (в 10,7 раз), количество неправильно принятых опор на 2,4% (в 3,1 раза), по сравнению с применением базового нутромера НИ-160 с головкой ИЧ-10, погрешность которого  $\Delta lim = \pm 12$  мкм. Выявлено, что при контроле отверстий втулок распределительного вала  $\varnothing 54^{+0,03}$  рациональнее всего использовать тот же нутромер НИ 160 с головкой ИЧЦ МАНР, что позволит снизить количество неправильно забракованных отверстий на 0,6% (в 7 раз), количество неправильно принятых отверстий на 7,1% (в 6,9 раза), по сравнению с применением базового нутромера.

## 5 ТЕХНИКО ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 5.1 Теоретические основы расчета экономического эффекта от совершенствования метрологического обеспечения ремонтного производства

Расчет экономического эффекта от совершенствования метрологического обеспечения ремонтного производства проводится следующим образом [61].

Экономия от сокращения неправильно забракованных деталей при более точных измерениях определяем по формуле [50]:

$$\mathcal{E}_n = N \cdot C_d \cdot (n_{(1)} - n_{(2)}) \cdot 0,01, \quad (5.1)$$

где  $N$  – число измеренных деталей ( $N = B$  при сплошном контроле);  $C_d$  – стоимость детали, руб.;  $n_{(1)}$  и  $n_{(2)}$  – процент неправильно забракованных деталей при использовании 1-го и 2-го средства измерений.

Экономия от уменьшения количества неправильно принятых деталей при более точных измерениях определяем по формуле [50]:

$$\mathcal{E}_m = B \cdot Z_y \cdot (m_{(1)} - m_{(2)}) \cdot 0,01, \quad (5.2)$$

где  $B$  – число измеренных деталей ( $N = B$  при сплошном контроле);  $Z_y$  – стоимость устранения отказа, руб.;  $m_{(1)}$  и  $m_{(2)}$  – процент неправильно принятых деталей при использовании 1-го и 2-го средства измерений.

Средние годовые потери при измерительном контроле качества продукции (сплошной контроль) рассчитываются по формуле [50]:

$$P_{\text{пн}} = N \cdot (n \cdot C_d + m \cdot Z_y) \cdot 0,01. \quad (5.3)$$

Годовые потери от использования средства измерений при контроле заданного параметра можно определить по выражению [50]:

$$P_{\text{СИ}} = A_{\text{СК}} \cdot [K \cdot (R_p + E_n) + I + P_{\text{пн}}], \quad (5.4)$$

где  $A_{\text{СК}}$  – количество СИ для данного параметра;  $K$  – единовременные затраты при использовании СИ;  $R_p$  – норма реновации;  $E_n$  – норматив приведения

единовременных затрат;  $I$  – годовые эксплуатационные издержки при использовании СИ.

Потери изготовителя при ведении контроля  $P_k$ , в свою очередь, складываются из потерь от использования средства измерений  $P_{си}$ , потерь от исправимого брака  $P_{иб}$  и потерь от неисправимого брака  $P_{нб}$  [50]:

$$P_k = P_{си} + P_{иб} + P_{нб}. \quad (5.5)$$

Экономия за весь срок службы использования более точного СИ по определяется по формуле [50]:

$$\mathcal{E} = \frac{P_{си1} \cdot \frac{T_2}{T_1} - P_{си2}}{R_p + E_n}, \quad (5.6)$$

где  $T_1$  и  $T_2$  – срок службы 1-го и 2-го средства измерений.

## 5.2 Расчет экономии от повышения точности измерений отверстий коренных опор при дефектации

Результаты расчета экономии от повышения точности измерений отверстий коренных опор при дефектации приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Результаты расчета экономии

Параметр	Обозначение	Единица измерения	Средство измерений				
			СИ5	СИ4	СИ3	СИ2	СИ1
Контролируемый размер	$D$	мм	116 <sup>+0,021</sup>				
Предельная погрешность СИ	$lim$	мкм	±12	±10	±6,5	±3,5	±2,0
Цена средства измерений	$K$	тыс. руб.	18	25	65	85	180
Стоимость блока цилиндров	$C$	тыс. руб.	80	80	80	80	80
Затраты на устранение последствий от использования бракованного блока цилиндров	$Z_y$	тыс. руб.	120	120	120	120	120

Продолжение таблицы 5.1

Количество неправильно забракованных опор	$n$	%	16,5	12,7	6,2	3,0	1,54
Количество неправильно принятых опор	$m$	%	3,5	3,3	2,5	1,76	1,12
Программа контроля блоков цилиндров	$N$	шт.	1000	1000	1000	1000	1000
Потери от неправильно забракованных блоков цилиндров	$P_{нз}$	тыс. руб.	13200	10160	4960	2400	1232
Потери от неправильно принятых блоков цилиндров	$P_{нп}$	тыс. руб.	4200	3960	3000	2112	1344
Экономия от уменьшения неправильно забракованных блоков цилиндров	$Э_n$	тыс. руб.	-	3040	8240	10800	11968
Экономия от уменьшения количества неправильно принятых блоков цилиндров	$Э_m$	тыс. руб.	-	240	1200	2088	2856

На основе данных представленных в таблице 5.1, построен следующий график (рисунок 5.1).

В результате расчета и аппроксимации полученных данных в таблице 5.1 получены следующие степенные зависимости, коэффициент корреляции которых выше 0,99:

потери от неправильно забракованных блоков цилиндров

$$P_{нз}^{Кор} = 468,05 \cdot \Delta^{1,3225} ; \quad (5.7)$$

потери от неправильно принятых блоков цилиндров

$$P_{нп}^{Кор} = 904,01 \cdot \Delta^{0,6342} ; \quad (5.8)$$

стоимость средств измерений

$$C_{СИ}^{Кор} = 438,7 \cdot \Delta^{-1,22} ; \quad (5.9)$$

где  $\Delta$  – погрешность нутромеров при контроле, мкм; размерности потерь и стоимости – руб.

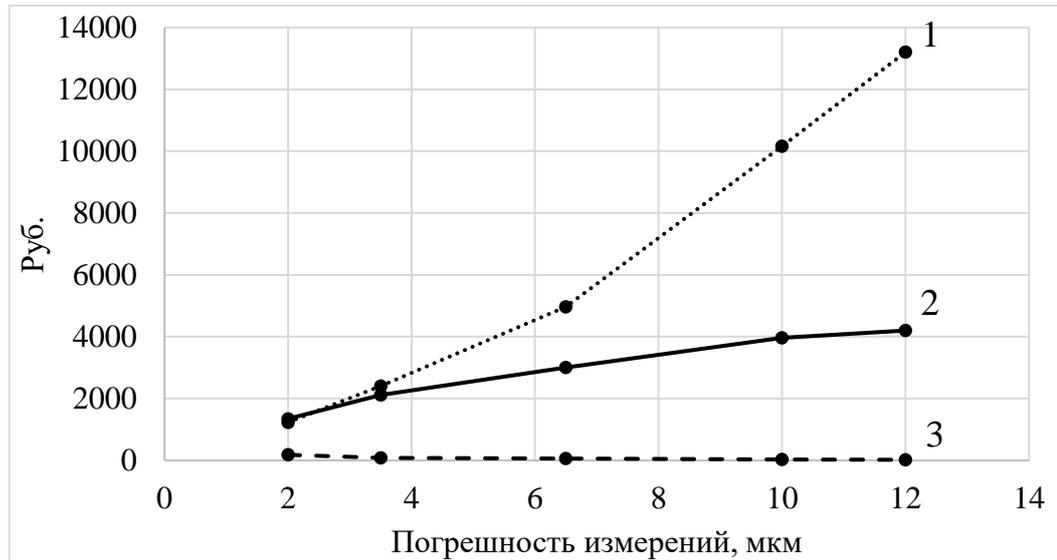


Рисунок 5.1 – Зависимость изменения потерь при контроле блоков цилиндров от увеличения погрешности СИ (1 – потери от неправильно забракованных блоков цилиндров, 2 – потери от неправильно принятых блоков цилиндров, 3 – стоимость средств измерений)

Согласно данным таблицы 5.1, при программе контроля 1000 блоков цилиндров в год для условий дефектации коренных опор экономия от уменьшения неправильно забракованных деталей составит 11968 тыс. руб., а экономия от уменьшения неправильно принятых деталей составит 2856 тыс. руб. при использовании нутромеров НИ160 с головкой, имеющей погрешность  $\pm 2$  мкм.

### 5.3 Расчет экономического эффекта от повышения точности измерений отверстий втулок под шейки распределительного вала при дефектации

Результаты расчета экономии от повышения точности измерений отверстий втулок под шейки распределительного вала при дефектации приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Параметры при дефектации отверстий втулок под шейки распределительного вала двигателя ЯМЗ при использовании нутромера с различной погрешностью измерений

Параметр	Обозначение	Единица измерений	Средство измерений				
			СИ5	СИ4	СИ3	СИ2	СИ1
Контролируемый размер	$D$	мм	$54^{+0,03}$				
Предельная погрешность СИ	$lim$	мкм	±12	±10	±6,5	±3,5	±2,0
Цена средства измерений	$K$	тыс. руб.	18	25	65	85	180
Стоимость блока цилиндров	$C$	тыс. руб.	80	80	80	80	80
Затраты на устранение последствий от использования бракованного блока цилиндров	$Z_y$	тыс. руб.	120	120	120	120	120
Количество неправильно забракованных опор	$n$	%	0,7	0,6	0,4	0,2	0,1
Количество неправильно принятых опор	$m$	%	8,3	6,8	3,9	2,1	1,2
Программа контроля блоков цилиндров	$N$	шт.	1000	1000	1000	1000	1000
Потери от неправильно забракованных втулок	$П_{нз}$	тыс. руб.	560	460	320	160	80
Потери от неправильно принятых втулок	$П_{нп}$	тыс. руб.	9960	8160	4680	2520	1440
Экономия от уменьшения неправильно забракованных блоков цилиндров	$Э_n$	тыс. руб.	-	100	240	400	480
Экономия от уменьшения количества неправильно принятых блоков цилиндров	$Э_m$	тыс. руб.	-	1800	5280	7440	8520

На основе данных представленных в таблице 5.2, построен следующий график (рисунок 5.2):

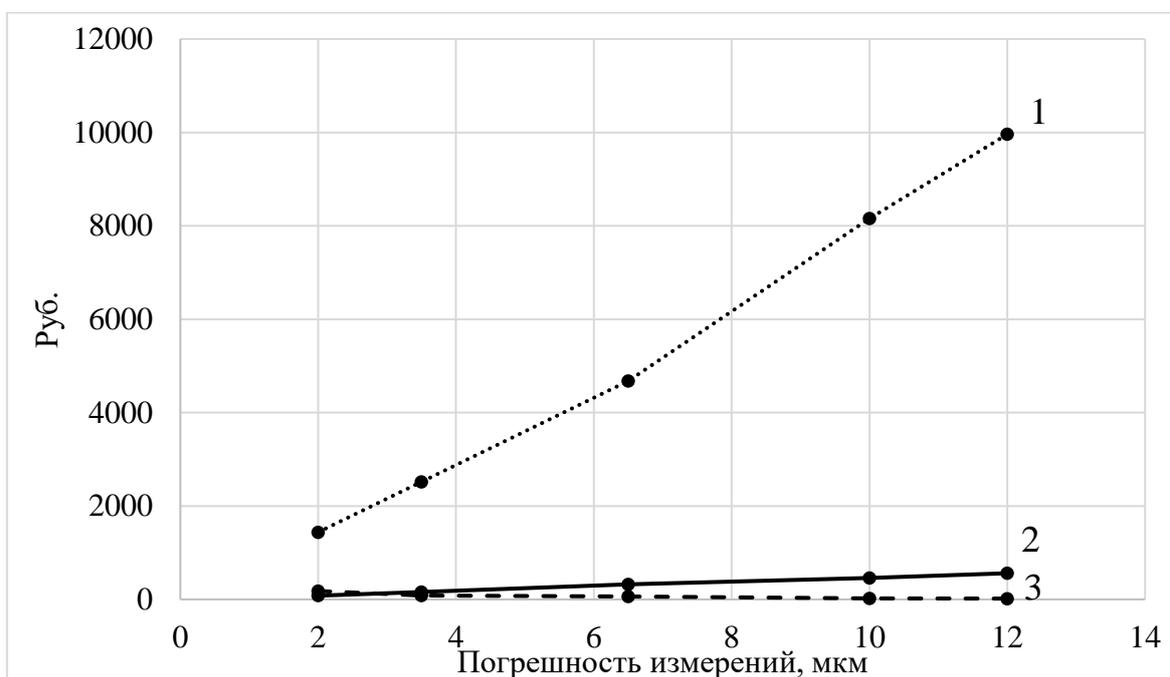


Рисунок 5.2 – Зависимость изменения потерь при контроле отверстий втулок под шейки распределительного вала от увеличения погрешности СИ (1 – потери от неправильно принятых блоков цилиндров, 2 – потери от неправильно забракованных блоков цилиндров, 3 – стоимость средств измерений)

В результате расчета и аппроксимации полученных данных в таблице 5.2 получены следующие степенные зависимости, коэффициент корреляции которых выше 0,99:

потери от неправильно забракованных блоков цилиндров

$$\Pi_{\text{НЗ}}^{\text{Вр}} = 659,92\Delta^{1,0817} ; \quad (5.10)$$

потери от неправильно принятых блоков цилиндров

$$\Pi_{\text{НП}}^{\text{Вр}} = 39,878\Delta^{1,0756}; \quad (5.11)$$

стоимость средств измерений

$$C_{\text{СИ}}^{\text{Вр}} = 438,7\Delta^{-1,22} , \quad (5.12)$$

где  $\Delta$  – погрешность нутромеров при контроле, мкм; размерности потерь и стоимости – руб.

Согласно данным таблицы 5.2, при программе контроля 1000 блоков цилиндров в год для условий дефектации отверстий втулок под распределительный вал экономия от уменьшения неправильно забракованных деталей составит 480 тыс. руб., а экономия от уменьшения неправильно принятых деталей составит 8520 тыс. руб.

#### **5.4 Выводы**

1. Получены математические выражения потерь от неправильного забракования и принятия отверстий, а также стоимости нутромеров в зависимости от погрешности измерений. Выявлено, что определяющее значение имеют потери от неправильного забракования для случая дефектации коренных опор и потери от неправильного принятия для случая дефектации отверстий втулок распределительного вала и они гораздо больше, чем стоимость нутромеров.

2. Выявлено, что при программе контроля 1000 блоков цилиндров в год при дефектации коренных опор экономия от уменьшения неправильно забракованных деталей составит 11968 тыс. руб., а экономия от уменьшения неправильно принятых деталей составит 2856 тыс. руб., при дефектации отверстий втулок распределительного вала экономия от уменьшения неправильно забракованных деталей составит 480 тыс. руб., а экономия от уменьшения неправильно принятых деталей составит 8520 тыс. руб.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан алгоритм выбора нутромеров для контроля отверстий блока цилиндров в условиях ремонтного производства, базирующаяся на формировании номенклатуры нутромеров для контроля заданного параметра и оценке для каждого из них потерь от ошибок первого и второго рода.

2. Предложено проводить оценку погрешности нутромеров путем проведения многократных измерений образцовой меры, равной контролируемому размеру. Получены математические зависимости изменения случайной погрешности измерений от числа наблюдений для трех видов нутромеров – с рычажной передачей, с клиновой передачей и трехточечного. На основании анализа зависимостей установлено, что достаточно проводить 25 измерений для достоверной оценки рассеяния погрешности нутромеров.

3. Выявлено, что для дефектации отверстий коренных опор  $\varnothing 116^{+0,021}$  блока цилиндров двигателя ЯМЗ-238 рациональнее использовать нутромер НИ-160 с индикатором ИЧЦ МАНР, погрешность которого  $\Delta lim = \pm 2$  мкм, что позволит снизить количество неправильно забракованных опор на 15% (в 10,7 раз), количество неправильно принятых опор на 2,4% (в 3,1 раза), по сравнению с применением базового нутромера НИ-160 с головкой ИЧ-10, погрешность которого  $\Delta lim = \pm 12$  мкм. Выявлено, что для дефектации отверстий втулок распределительного вала  $\varnothing 54^{+0,03}$  рациональнее использовать нутромер НИ-100 с погрешностью  $\Delta lim = \pm 2$  мкм, что позволит снизить количество неправильно забракованных отверстий на 0,6% (в 7 раз), количество неправильно принятых отверстий на 7,1% (в 6,9 раза), по сравнению с применением базового нутромера.

4. Получены математические выражения потерь от неправильного забракования и принятия отверстий, а также стоимости нутромеров в зависимости от погрешности измерений. Выявлено, что определяющее значение имеют потери от неправильного забракования для случая

дефектации коренных опор и потери от неправильного принятия для случая дефектации отверстий втулок распределительного вала и они гораздо больше, чем стоимость нутромеров. При программе контроля 1000 блоков цилиндров в год при дефектации коренных опор экономия от уменьшения неправильно забракованных деталей составит 11968 тыс. руб., а экономия от уменьшения неправильно принятых деталей составит 2856 тыс. руб., при дефектации отверстий втулок распределительного вала экономия от уменьшения неправильно забракованных деталей составит 480 тыс. руб., а экономия от уменьшения неправильно принятых деталей составит 8520 тыс. руб.

### **Рекомендации производству**

1. С целью повышения качества метрологического обеспечения ремонтного производства при контроле и дефектации ответственных высокоточных элементов деталей типа «отверстие», подверженных износу, рекомендуется проводить не только калибровку нутромеров, но и регулярную оценку их погрешности путем проведения многократных измерений заданного размера, воспроизводимого с помощью блока концевых мер. Это позволит реально оценивать величину погрешности на контролируемом размере и сделать соответствующее заключение по возможности использования конкретного нутромера для заданных целей.

2. При приемке в ремонт новых моделей двигателей следует уточнять величины допусков отверстий блоков цилиндров в нормативной документации в виде руководства по ремонту и выбирать нутромеры в соответствии с рекомендованной методикой.

## **Перспективы дальнейшей разработки темы**

1. Проведенные диссертационные исследования могут служить основой для дальнейшего развития данного подхода применительно к контролю и дефектации малых отверстий – втулок клапанов, шпоночных пазов, отверстий в головке блока цилиндров и т.п., так как там используются индикаторные нутромеры другого принципа действия – клиновые и цанговые.

2. Вопросы метрологического обеспечения ремонтного производства с позиции оценки рисков проявления брака первого и второго рода должны непрерывно изучаться и следует регулярно формировать научно обоснованные рекомендации по применению новых средств измерений, в частности – цифровых индикаторных головок.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Digitalization of Fault Detection in Crankshafts / P. V. Golinitiskii, U. Yu. Antonova, G. N. Temasova [et al.] // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2024. Vol. 53, No. 3. P. 263–270. DOI 10.1134/S1052618824700031.
2. Fractal Characteristics of Steel Surface Profilograms / S. M. Gaidar, A. E. Pavlov, A. M. Pikina [et al.] // Steel in Translation. 2024. Vol. 54. No. 11. P. 1077-1081. DOI 10.3103/S0967091224701961.
3. Golinitiskiy, P. Assessment of the influence of measurement error on the quality of selective assembly / P. Golinitiskiy, U. Antonova // JOP Conference Series: Metrological Support of Innovative Technologies, Krasnoyarsk, 04 марта 2020 года / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Vol. 1515. – Krasnoyarsk, Russia: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. – P. 52021. – DOI 10.1088/1742-6596/1515/5/052021.
4. Improvement of the Decision-Making System for Fault Detection of Cylinder Liners / P. V. Golinitiskii, U. Yu. Antonova, E. I. Cherkasova, L. A. Grinchenko // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2024. Vol. 53, No. 6. P. 656-661. DOI 10.1134/S1052618824701280.
5. Leonov O. A., Shkaruba N. Zh., Vergazova Yu. G. Calculation of the maximum functional clearance of a cylindrical joint between a steel shaft and a cast iron sprocket // CIS Iron and Steel Review. 2024. Vol. 27. P. 108–112. DOI 10.17580/cisisr.2024.01.17.
6. Leonov O. A., Shkaruba N. Zh., Vergazova Yu. G. Determination of Ultimate Functional Clearances of a Plain Bearing under Hydrodynamic Lubrication Conditions // Journal of Friction and Wear. 2024. Vol. 45, No. 4. P. 223–227. DOI 10.3103/S1068366624700338.
7. Metrological Support for Tolerance Control of Hole-Type Parts / O. A. Leonov, V. K. Zimogorsky, Yu. G. Vergazova [et al.] // Technical Physics. – 2025. – Vol. 70, No. 2. – P. 56-60. – DOI 10.1134/S1063784225700148.

8. Shkaruba, N. Zh. Assessment of the influence of deviations in the shape of the surface of the part on the measurement error / N. Zh. Shkaruba, O. A. Leonov, L. A. Grinchenko // Journal of Physics: Conference Series : II International Scientific Conference on Metrological Support of Innovative Technologies (ICMSIT II-2021), St.Petersburg, 03–06 марта 2021 года. Vol. 1889. – Krasnoyarsk: IOP Publishing Ltd, 2021. – P. 42039. – DOI 10.1088/1742-6596/1889/4/042039.

9. Tempering Behavior of Novel Low-Alloy High-Strength Steel / V. Dudko, D. Yuzbekova, S. Gaidar [et al.] // Metals. 2022. Vol. 12, No. 12. P. 2177. DOI 10.3390/met12122177.

10. Автоматизированное устройство для контроля качества запасных частей / А. С. Дорохов, Ю. В. Катаев, Е. Л. Чепурина [и др.] // Сельский механизатор. 2019. № 6. С. 34, 35. EDN KJFKZY.

11. Алексеев В. В. Метрология, стандартизация, сертификация. – М.: Академия, 2010. – 384 с.

12. Анализ точности изготовления поверхностей валов и отверстий цилиндрического соединения со шпонкой / О. А. Леонов, Н. Ж. Шкаруба, Ю. Г. Вергазова [и др.] // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2023. – № 4. – С. 41-49. – DOI 10.52261/02346206\_2023\_4\_41.

13. Антонова, У. Ю. Выбор средств измерений при дефектации шейки под шкив коленчатого вала / У. Ю. Антонова, Э. И. Черкасова // Наука и Образование. – 2023. – Т. 6, № 2.

14. Антонова, У. Ю. Обоснование методов и средств контроля качества при ремонте соединения "поршень - гильза" : специальность 05.20.03 "Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Антонова Ульяна Юрьевна. – Москва, 2019. – 159 с.

15. Артемьев Б. Г., Голубев С. М. Справочное пособие для работников метрологических служб. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Стандартинформ, 2005. – 456 с.

16. Бондарева Г.И., Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж. [и др.] Обоснование замены индикаторных головок на цифровые при контроле ремонта машин // Сельский механизатор. – 2022. – № 4. – С. 26-27.
17. Бородачев Н. А. Основные вопросы теории точности производства. –М.: Изд-во АН СССР, 1950. – 196 с.
18. Бурак, П. И. Анализ отказов электрооборудования и электронных блоков управления сельскохозяйственной техники при испытаниях / П. И. Бурак, И. Г. Голубев, В. А. Шахов // Техника и оборудование для села. – 2025. – № 10(340). – С. 40-42. – DOI 10.33267/2072-9642-2025-10-40-42. – EDN ZGQNIW.
19. 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. – DOI 10.26897/2687-1149-2022-6-59-63.
20. ГАРАНТ (Информационно-правовой портал) : сайт / ООО «НПП „ГАРАНТ-Сервис“». – Москва. – Обновляется в режиме реального времени. – URL: <http://ivo.garant.ru> (дата обращения: 10.11.2023)
21. Гвоздев В. Д. Допустимая погрешность измерений: выбор значения // Законодательная и прикладная метрология. 2013. № 2. С. 044-048.
22. Голиницкий П. В., Антонова У. Ю. Использование цифровых технологий в обеспечении максимального запаса на изнашивание соединений с зазором // Вестник машиностроения. 2025. Т. 104, № 8. С. 650–656. DOI 10.36652/0042-4633-2025-104-8-650-656.
23. ГОСТ 25347-2013. Основные нормы взаимозаменяемости. Характеристики изделий геометрические. Система допусков на линейные размеры. Ряды допусков, предельные отклонения отверстий и валов [Текст]. М.: Стандартинформ, 2014.;
24. ГОСТ 577-68. Индикаторы часового типа с ценой деления 0,01 мм. Технические условия. Приборы измерительные. М.: Изд-во стандартов, 1968;

25. ГОСТ 6507-90 Микрометры. Технические условия [Текст]. М.: ИПК Издательство стандартов, 2004;
26. ГОСТ 8.051–81 – «Государственная система обеспечения единства измерений. Погрешности, допускаемые при измерении линейных размеров до 500 мм»
27. ГОСТ 8.207–76. ГСИ. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений [Текст]. М.: Изд-во стандартов, 1988;
28. ГОСТ 868-82. Нутромеры индикаторные с ценой деления 0,01 мм. Технические условия [Текст]. М.: ИПК Издательство стандартов, 2004;
29. ГОСТ 9038-90 Меры длины концевые плоскопараллельные. Технические условия [Текст]. М.: ИПК Издательство стандартов, 1998;
30. ГОСТ Р 51814.5-2005. Системы менеджмента качества в автомобилестроении. Анализ измерительных и контрольных процессов. М.: Стандартиформ, 2005;
31. ГОСТ Р ИСО 10012-2008 «Системы менеджмента измерений. Требования к измерительным процессам и измерительному оборудованию»
32. ГОСТ Р ИСО 5725-1-2009. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 1. Основные положения и определения [Текст]. М.: Стандартиформ, 2009;
33. ГОСТ Р ИСО 5725-2-2009. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 2. Основной метод определения повторяемости и воспроизводимости стандартного метода измерений [Текст]. М.: Стандартиформ, 2009;
34. ГОСТ Р ИСО 5725-3-2009. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 3. Промежуточные показатели прецизионности стандартного метода измерений [Текст]. М.: Стандартиформ, 2009.
35. ГОСТ Р ИСО 5725-4-2009. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 4. Основные методы

определения правильности стандартного метода измерений [Текст]. М.: Стандартиформ, 2009;

36. ГОСТ Р ИСО 5725-5-2009. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 5. Альтернативные методы определения прецизионности стандартного метода измерений [Текст]. М.: Стандартиформ, 2009;

37. ГОСТ Р ИСО 5725-6-2009. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 6. Использование значений точности на практике [Текст]. М.: Стандартиформ, 2009;

38. ГОСТ Р ИСО 9001-2015 «Системы менеджмента качества. Требования»\

39. Дидманидзе, О. Н. Концепция технического сервиса по фактическому состоянию машин на основе оценки их параметрической надежности / О. Н. Дидманидзе, Д. В. Варнаков, В. В. Варнаков // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина". – 2016. – № 2(72). – С. 51-57.

40. Дорохов А.С. Бесконтактный контроль качества запасных частей сельскохозяйственной техники // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ. 2010. № 2 (41). С. 73-75.

41. Еремин Е. В. Оценка погрешности результатов косвенных измерений некоторых величин // Измерительная техника. 2020. № 1. С. 18–24.

42. Ерохин, М. Н. Детали машин / М. Н. Ерохин, С. П. Казанцев. – Москва : ТРАНСЛОГ, 2018. – 410 с.

43. Журавлева, А. Р. Разработка методики выбора средств измерений для контроля отверстий при ремонте сельскохозяйственной техники : специальность 05.20.03 "Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Журавлева Анастасия Романовна. – Москва, 2012. – 231 с.

44. Задорожний, Р. Н. Исследование свойств металлических порошков, полученных из отходов твердых сплавов электроэрозионным диспергированием / Р. Н. Задорожний, И. В. Романов, И. А. Шемберев // Труды ГОСНИТИ. – 2018. – Т. 130. – С. 208-213.

45. Зимогорский, В. К. Метрологическое обеспечение контроля отверстий при ремонте двигателей для машин АПК: анализ существующих методов выбора средств измерений / В. К. Зимогорский, Д. А. Пупкова, Я. К. Зимогорский // Наука, технологии, общество: Экологический инжиниринг в интересах устойчивого развития территорий (НТО-VI-2025) : сборник научных статей по материалам VI Всероссийской (национальной) научной конференции, Красноярск, 06–07 ноября 2025 года. – Красноярск: Общественное учреждение "Красноярский краевой Дом науки и техники Российского союза научных и инженерных общественных объединений", 2025. – С. 7-15. – DOI 10.47813/nto.6.2025.1001.

46. Исследование влияния параметров макрогеометрии на герметичность соединений вала с манжетой / О. А. Леонов, Н. Ж. Шкаруба, Л. А. Гринченко [и др.] // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2023. – № 6. – С. 40-47. – DOI 10.31857/S0235711923060111.

47. Исследование свойств стальной эмалированной поверхности для силосных башен / Д. Ю. Павкин, С. С. Юрочка, Е. А. Никитин [и др.] // Агроинженерия. – 2022. – Т. 24, № 2. – С. 46-51. – DOI 10.26897/2687-1149-2022-2-46-51.

48. Корнеев, В. М. Обоснование целесообразности модернизации стендов для испытания и регулировки дизельной топливной аппаратуры / В. М. Корнеев, М. Ю. Устинов // Международный технико-экономический журнал. – 2009. – № 1. – С. 54-57.

49. Лазарь, В. В. Методика оценки качества процесса финишной обработки гильз цилиндров при ремонте двигателей : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Лазарь Вера Владимировна. – Москва, 2024. – 145 с.

50. Леонов О.А. Метрологическое обеспечение производства: Учеб. Пособие / О.А. Леонов, Н.Ж. Шкаруба. – М.: РНИИТЭИ, 2017 – 180 с.

51. Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Вергазова Ю.Г., Антонова У.Ю. Метрологическое обеспечение контроля гильз цилиндров при ремонте дизелей // Вестник Барановичского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2018. – № 6. – С. 104-109;

52. Леонов, О. А. Методика расчета экономии от использования более точного средства измерений при изготовлении и ремонте машин / О. А. Леонов, У. Ю. Антонова // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина". – 2018. – № 4(86). – С. 42-46. – DOI 10.26897/1728-7936-2018-4-42-46.

53. Леонов, О. А. Обеспечение качества ремонта унифицированных соединений сельскохозяйственной техники методами расчета точностных параметров : специальность 05.20.03 "Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве" : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Леонов Олег Альбертович. – Москва, 2004. – 324 с.

54. Леонов, О. А. Разработка методики оценки качества оборудования для ремонтных предприятий : Монография предназначена для научных, инженерно-технических и педагогических работников, научно-исследовательских и учебных учреждений, занимающимися проблемами оценки качества при изготовлении и ремонте машин / О. А. Леонов, Н. И. Селезнева. – Иркутск : ООО "Мегапринт", 2017. – 167 с. – ISBN 978-5-905624-81-0.

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

56. Методика оценки брака: процесс контроля коренных шеек коленчатых валов в ремонтном производстве / Г. Н. Темасова, О. А. Леонов, Н. Ж. Шкаруба [и др.] // Агроинженерия. – 2023. – Т. 25, № 6. – С. 39-45. – DOI 10.26897/2687-1149-2023-6-39-45.

57. Методические рекомендации по дефектации и измерению блоков цилиндров двигателей внутреннего сгорания. – Ульяновск: УлГАУ, 2020. – 48 с.

58. Метрологическое обеспечение контроля гильз цилиндров при ремонте дизелей / О. А. Леонов, Н. Ж. Шкаруба, Ю. Г. Вергазова, У. Ю. Антонова // Вестник Барановичского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2018. – № 6. – С. 104-109.

59. МИ 1917-88. Государственная система обеспечения единства измерений. Методики выполнения измерений. Основные положения. М.: Изд-во стандартов, 1988;

60. МИ 2194–92. Рекомендация. ГСИ. Нутромеры индикаторные с ценой деления 0,01 мм. Методика поверки / ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева». – Введ. 01.07.1992. : [Издательство не указано], 1992.

61. МИ 2546–99. Рекомендация. Государственная система обеспечения единства измерений. Методы определения экономической эффективности метрологических работ / Разраб. ВНИИМС. – Утвержд. ВНИИМС 30.06.1999. – 16 с. – Взамен МИ 2447–98.

62. Надежность технических систем : Учебное пособие по курсовому проектированию / А. В. Чепурин, Е. Л. Чепурина, Д. Л. Кушнарёва [и др.]. – Москва : ООО «УМЦ «Триада», 2025. – 73 с. – ISBN 978-5-9546-0126-8. – EDN OXZVIT.

63. Оценка точности измерений шейки под шкив коленчатого вала двигателя ЯМЗ 38 / Ю. Г. Вергазова, А. В. Чепурин, Э. И. Черкасова, У. Ю. Антонова // Сельский механизатор. – 2022. – № 12. – С. 38-40. – DOI 10.47336/0131-7393-2022-12-38-39-40.

64. Перспективы развития тракторостроения в России / О. Н. Дидманидзе, Е. П. Парлюк, Н. Н. Пуляев, М. М. Прокофьев // Техника и оборудование для села. 2023. № 5(311). С. 2-7. DOI 10.33267/2072-9642-2023-5-2-7.

65. Приоритетные направления научно-технического развития отечественного тракторостроения / Ю. Ф. Лачуга, А. Ю. Измайлов, Я. П. Лобачевский [и др.] // Сельский механизатор. 2021. № 2. С. 3–5. EDN AKRSBW.

66. Проектирование предприятий технического сервиса / И. Н. Кравченко, А. В. Коломейченко, В. М. Корнеев [и др.]. – Орел : Модуль-К, 2014. – 350 с. – ISBN 978-5-905029-22-6.

67. Пупкова, Д. А. Обеспечение норм точности посадок цилиндрических соединений приводов муфт со шпонками при ремонте сельскохозяйственной техники : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Д. А. Пупкова. – Москва, 2024. – 128 с.

68. Пупкова, Д. А. Обеспечение норм точности посадок цилиндрических соединений приводов муфт со шпонками при ремонте сельскохозяйственной техники : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Д. А. Пупкова. – Москва, 2024. – 19 с.

69. Расчет посадки с натягом из условия разбираемости соединения звездочки и ведомого вала редуктора / Г. И. Бондарева, О. А. Леонов, Н. Ж. Шкаруба [и др.] // Сельский механизатор. – 2023. – № 7. – С. 38-39. – DOI 10.47336/0131-7393-2023-7-38-39.

70. РД 50-98-86. Методические указания. Выбор универсальных средств измерений. линейных размеров до 500 мм. Взамен. (По применению ГОСТ 8.051-81). Москва, 1987. 80 с.

71. Руководство по ремонту 236.01.01 РК на двигателях ЯМЗ-236 и ЯМЗ-238. Ярославль.: ОАО «Автодизель» (ЯМЗ), 2007.

72. Селезнева, Н. И. Разработка методики оценки качества оборудования для ремонтных предприятий : специальность 05.20.03 "Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Селезнева Наталья Игоревна. – Москва, 2016. – 22 с.

73. Семейкин В. А. Эффективность инновационных измерительных устройств при оценке качества изделий сельхозтехники // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2012. № 7. С. 16-17.

74. Семейкин В.А. Экономическая эффективность входного контроля качества сельскохозяйственной техники // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ. 2009. № 7 (38). С. 15-17.

75. Современная агроинженерия / В. И. Трухачев, О. Н. Дидманидзе, М. Н. Ерохин [и др.]. Монография. Москва: ООО «Мегаполис», 2022. 413 с. ISBN 978-5-6049928-2-1.

76. Справочник экономиста сельскохозяйственной организации / В. Н. Кузьмин, Ю. В. Бочкарева, А. И. Валеева [и др.]. – 2-е издание, переработанное и дополненное. – Москва : ФГБНУ «Росинформагротех», 2024. – 520 с. – ISBN 978-5-7367-1833-7. – EDN MCQAZR.

77. Темасова Г. Н. Допусковый контроль валов в ремонтном производстве // Сельский механизатор. 2023. № 8. С. 40, 41. DOI 10.47336/0131-7393-2023-8-40-41. EDN PAFUWP.

78. Темасова Г. Н. Оценка брака в ремонтном производстве: инновационный подход к контролю деталей типа «вал» // Вестник НГИЭИ. – 2024. № 2(153). С. 48–58. DOI 10.24412/2227-9407-2024-2-48-58.

79. Темасова Г. Н. Оценка качества процесса шлифования коленчатых валов двигателей ЯМЗ // Вестник НГИЭИ. 2023. № 5(144). С. 33-42. DOI 10.24412/2227-9407-2023-5-33-42.

80. Темасова Г. Н. Совершенствование инструментов и методов мониторинга потерь от брака на предприятиях технического сервиса

агропромышленного комплекса: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Темасова Галина Николаевна, 2024. 209 с.

81. Технология ремонта машин : Учебник для студентов вузов по специальности «Технология обслуживания и ремонта машин в агропромышленном комплексе» / Е. А. Пучин, О. Н. Дидманидзе, В. С. Новиков [и др.]. Том 1. – Москва : ООО "Издательство "Триада", 2006. – 348 с. – ISBN 5-9546-0029-5.

82. Федеральный закон от 26.06.2008 № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» (с изменениями и дополнениями). Собрание законодательства Российской Федерации. 2008;

83. Чепурин А. В., Севостьянов А. Д. Основные износы и дефекты деталей клапанной группы // Управление рисками в АПК. 2016. № 7. С. 5–12.

84. Шкаруба Н. Ж. Техничко-экономические критерии выбора универсальных средств измерений при ремонте сельскохозяйственной техники : монография / Н. Ж. Шкаруба. М.: ФГОУ ВПО МГАУ, 2009. – 118 с;

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

86. Шкаруба, Н. Ж. Разработка комплексной методики выбора средств измерений линейных размеров при ремонте сельскохозяйственной техники : Дис. ... канд. техн. наук. М.: ФГОУ ВПО МГАУ, 2006. – 156 с;

87. Шкаруба, Н. Ж. Совершенствование метрологического обеспечения ремонтного производства агропромышленного комплекса : специальность 05.20.03 "Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве" : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Шкаруба Нина Жоровна. – Москва, 2019. – 274 с.

88. Шкаруба, Н. Ж. Совершенствование метрологического обеспечения ремонтного производства агропромышленного комплекса : специальность 05.20.03 "Технологии и средства технического обслуживания в

сельском хозяйстве" : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Шкаруба Нина Жоровна. – Москва, 2019. – 40 с.

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

90. Яковлев, С. А. Технологическое обеспечение качества электромеханической обработки деталей при ремонте сельскохозяйственных машин : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / С. А. Яковлев. – Чебоксары, 2023. – 35 с.

91. Яковлев, С. А. Технологическое обеспечение качества электромеханической обработки деталей машин / С. А. Яковлев, В. И. Курдюмов. – Ульяновск : Ульяновский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина, 2024. – 258 с. – ISBN 978-5-605-10714-9.

## ПРИЛОЖЕНИЕ. Акты внедрения результатов научно-исследовательской работы

### АКТ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЫ

Настоящий акт составлен о внедрении результатов законченной научно-исследовательской работы «Метрологическое обеспечение контроля отверстий блоков цилиндров в ремонтном производстве», выполненной в ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева на кафедре метрологии, стандартизации и управления качеством института механики и энергетики имени В.П. Горячкина. Авторы работы: д.т.н., профессор Леонов О.А., аспирант, ассистент Зимогорский В.К.

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

1. Разработанные рекомендации по оценке погрешности нутромеров путем проведения и обработки данных многократных измерений образцовой меры, равной контролируемому размеру, что позволяет снизить метрологические риски в связи с отсутствием обязательной поверки и калибровки средств измерений в ремонтном производстве.

2. Полученные математические регрессионные зависимости случайной погрешности измерений от числа наблюдений для трех видов нутромеров – рычажной, с клиновой передачей и трёхточечным, позволяющие установить достаточность проведения 25 измерений для достоверной оценки погрешности нутромера.

3. Разработанный алгоритм выбора нутромеров для контроля отверстий, базирующаяся на формировании номенклатуры нутромеров, оценке их погрешности, а также на расчете для каждого из них потерь от ошибок первого и второго рода на конкретной операции контроля.

Результаты исследований рекомендованы к использованию при контроле отверстий ремонтируемых деталей в ООО «Оптимум авто».

Директор  Синева С.А.  
 11.09.2026

13.02.2026 № АМ-исх/62

на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

## АКТ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЫ

Настоящий акт составлен о внедрении результатов законченной научно-исследовательской работы «Повышение долговечности опор скольжения сочетанием точностных и технологических методов восстановления деталей соединения», выполненной в ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева. Автор работы – к.т.н., доцент Голиницкий П.В.

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

1. Метод цифрового подбора пар трения в соединениях с зазором, позволяющий получить больший запас материала на износ по сравнению с методом полной взаимозаменяемости.
2. Применение цифровых технологий при выполнении операций контроля, позволяющие снизить временные потери благодаря систематизации и моделированию собираемых данных и осуществления эффективного мониторинга производственных процессов.
3. Применение машиночитаемой цифровой маркировки в виде QR-кода и Data Matrix совместно с процессной моделью предприятия в нотациях IDEF0, BPMN и EPC, позволяющего реализовать автоматизацию сбора данных и ведения мониторинга эффективности процессов.
4. Обоснование замены аналоговых средств измерений на цифровые, что позволяет снизить количество неправильно принятых и неправильно забракованных деталей.

Результаты исследований рекомендованы к использованию в производстве и при ремонте соединений с зазором для сборочных единиц и агрегатов сельхозмашин, выпускаемых на ООО «Завод «АГРОМАШ».

Генеральный директор



И.В. Дроздов