

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

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2026

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

Научный руководитель **Леонов Олег Альбертович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой метрологии, стандартизации и управления качеством ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»

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

**Псюкало Сергей Петрович**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Эксплуатация и технический сервис наземных транспортно-технологических средств» Азово-Черноморского инженерного института – филиала ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет»

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

Защита состоится «25» июня 2026 года в 13.00 на заседании диссертационного совета 35.2.030.03 на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», по адресу: 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 19, тел: 8 (499) 976-17-14.

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

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

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета \_\_\_\_\_

Н. Н. Пуляев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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. 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.

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. 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.

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.

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.

**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 дефектации 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 тина 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;

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 робототехнических 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.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

**В первой главе «Состояние вопроса, цели и задачи исследования»** проведен 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 определенной мере гарантировать достоверность результатов измерений, но оценка метрологических рисков в виде определения ошибок первого и второго рода в ремонтном производстве практически не проводится.

В настоящее время выбор средств измерений (СИ) 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 документации размеры с отклонениями, а также допуск контролируемого параметра. СИ выбирают из определенного ряда так, чтобы предельная погрешность измерения ( $\Delta_{\text{lim}}$ ) не была больше допускаемой погрешности измерения ( $\delta_{\text{изм}}$ ):

$$\Delta_{\text{lim}} \leq \delta_{\text{изм}} . \quad (1)$$

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

$$\delta_{\text{изм}} = 0,33 \cdot T, \quad (2)$$

где  $T$  – допуск контролируемого параметра.

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, формулы (1) и (2). С другой стороны, показано, что допуски на диаметры коренных и шатунных опор блока цилиндров не были ужесточены у новых моделей двигателей. Например, если для ЯМЗ-238 допуск на диаметр коренной опоры составляет 21 мкм, а для ЯМЗ-536 он стал 22 мкм (6-й квалитет точности в стандартном диапазоне размеров от 80 до 120 мм), то есть точность осталась прежней.

**Во второй главе «Теоретические основы»** описан теоретический подход к оценке погрешности измерений  $\Delta$ , в котором наиболее рациональная точность измерений технологического параметра достигается при минимизации функции суммарных издержек  $S(\Delta)$ , которая складывается из затрат на проведение и метрологическое обслуживание измерений  $E(\Delta)$  и потерь, обусловленных неточностью погрешностью измерений  $L(\Delta)$ :

$$S(\Delta) = E(\Delta) + L(\Delta), \quad (3)$$

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

$$E(\Delta) = a_1 \cdot \Delta^{-b}, \quad (4)$$

$$L(\Delta) = a_2 \cdot \Delta^c, \quad (5)$$

где  $a_1$  и  $a_2$  – коэффициенты аппроксимации;  $b$  и  $c$  – эмпирические показатели степени.

В таком случае минимум суммарных издержек будет достигаться при равенстве нулю производной выражения (1) относительно переменной  $\Delta$ :

$$\frac{d}{d\Delta} [E(\Delta) + L(\Delta)] = 0 \rightarrow \frac{d}{d\Delta} (a_1 \times \Delta^{-b} + a_2 \times \Delta^c) = 0 . \quad (6)$$

После математических преобразований получим, что рациональная погрешность измерений определяется выражением:

$$\Delta_{\text{рац}} = \left[ \frac{(b \times a_1)}{(c \times a_2)} \right]^{\frac{1}{(b+c)}} . \quad (7)$$

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:  
 $D_{\min} \leq X \leq D_{\max}$ ; (8)

$H_1$ : «Деталь бракованная» - истинный размер выходит за пределы допуска:  
 $X < D_{\min}$  или  $X > D_{\max}$ . (9)

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 50-9 8-86 указанные риски количественно характеризуются следующими параметрами:

$n = 100 \cdot P_{\Gamma \rightarrow \text{д}}$  – доля неправильно забракованных годных изделий, %;

$m = 100 \cdot P_{\text{д} \rightarrow \Gamma}$  – доля неправильно принятых дефектных изделий, %,

где:  $P_{\Gamma \rightarrow \text{д}}$  – вероятность ошибки первого рода;  $P_{\text{д} \rightarrow \Gamma}$  – вероятность ошибки второго рода.

Таким образом, теоретически показано, что 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.

**В третьей главе «Методика экспериментальных исследований»** приведено описание методики оценки погрешности измерений нутромерами с помощью обработки результатов многократных наблюдений по ГОСТ 8.736-2011.

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.

Для упрощения и автоматизации обработки данных составлен алгоритм, на основе которого, разработана компьютерная программа, написанная на языке программирования Python.

**В четвертой главе «Результаты исследований и их анализ»** проведены исследования по оценке погрешности нутромеров путем проведения многократных измерений образцовой меры и по выбору рациональных средств измерений отверстий при контроле новых и дефектации изношенных отверстий блока цилиндров.

Чтобы определить стабильность измерительного процесса построены графики зависимости среднеквадратического отклонения рассеяния размеров  $\sigma_x$  от количества измерений, по результатам анализа данных, полученных в ходе всех трех серий измерений (рисунок 1).

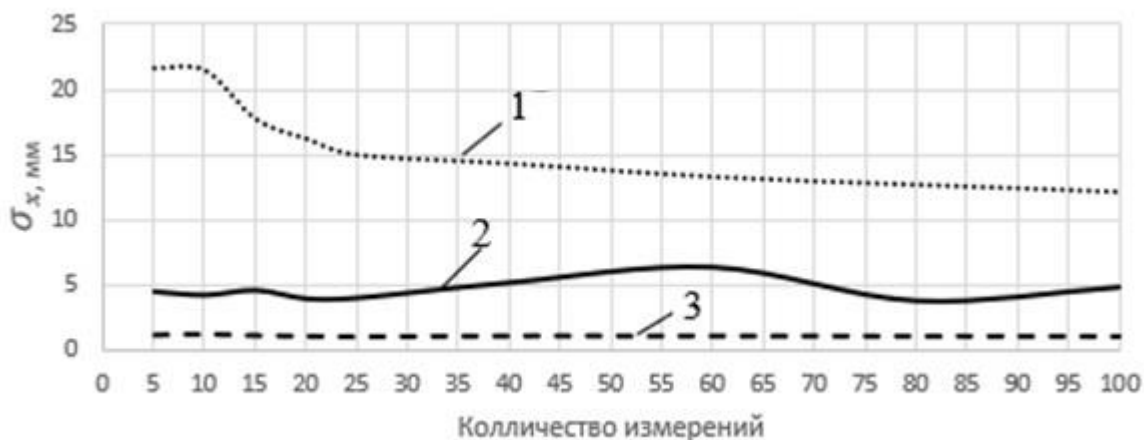


Рисунок 1 – Изменение  $\sigma_x$  при увеличении количества измерений (1 – рычажный нутромер, 2 – клиновой нутромер, 3 – трехточечный нутромер)

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 2).

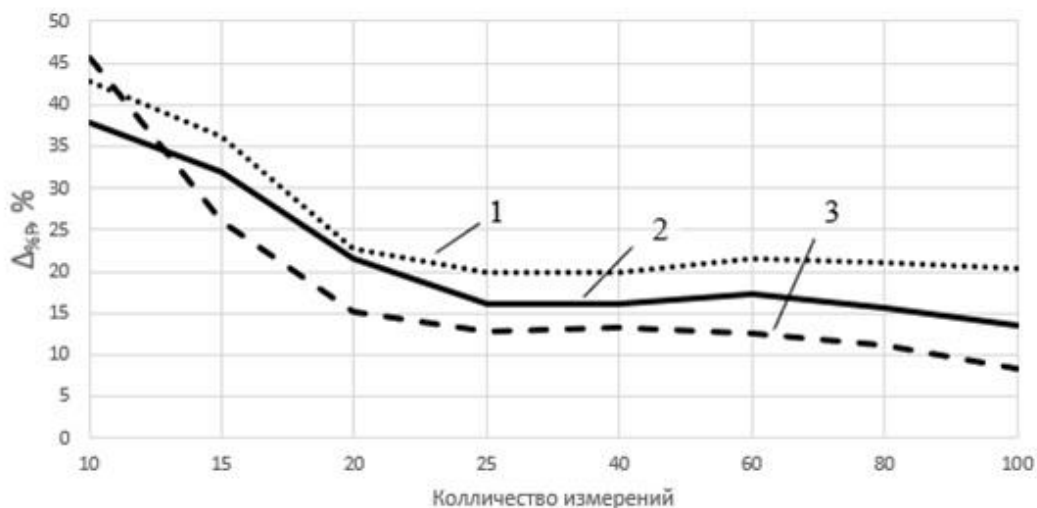


Рисунок 2 – Динамика изменения погрешности нутромеров при увеличении количества измерений (1 – трехточечный нутромер, 2 – клиновой нутромер, 3 – рычажный нутромер)

На основании анализа графиков установлено, что достаточно проводить 25 измерений для достоверной оценки рассеяния погрешности нутромеров.

На основе графиков определены математические зависимости изменения среднеквадратического отклонения в зависимости от числа измерений для всех

приборов (10) для трёхточечного нутромера, (11) для клинового нутромера, (12) для рычажного нутромера):

$$\sigma_x = -0,000002n^3 + 0,0003n^2 - 0,0163n + 1,2611; \quad (10)$$

$$\sigma_x = -0,000003n^3 + 0,0006n^2 - 0,0405n + 4,62; \quad (11)$$

$$\sigma_x = -0,00002n^3 + 0,0033n^2 - 0,2143n + 9,7084, \quad (12)$$

где  $n$  – число измерений.

Проведено исследование по 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 предлагаемому критерию.

Точностные параметры при дефектации контролируемого параметра – коренной опоры двигателя ЯМЗ-238 представлены в таблице 1.

Таблица 1 – 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

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 3).

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. Сплошной контроль здесь нецелесообразен, требуется только выборочная проверка качества отверстий новых блоков цилиндров.

А вот при дефектации блоков цилиндров наблюдается совсем другая картина. В технической документации по ремонту двигателя ЯМЗ-238 для проведения контроля отверстий коренных опор рекомендован нутромер НИ 100-160 (таблица 2) 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 условие (1).

Для анализа формирования рассеяния диаметров отверстий коренных опор в процессе контроля с целью сокращения количества неправильно принятых и неправильно забракованных опор были выбраны следующие средства измерений, таблица 2.

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 3 и 4, рисунок 4).

Таблица 2 – 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	$\pm 12$

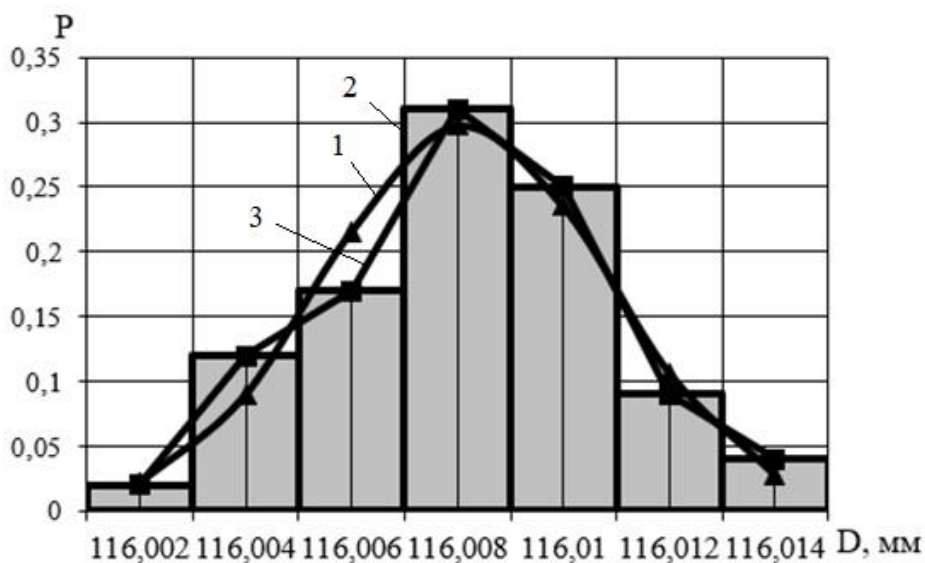


Рисунок 3 – Рассеяние размеров отверстий коренных опор двигателя ЯМЗ-238  $D=116^{+0,021}$  мм новых блоков цилиндров: 1 – теоретическая кривая; 2 – гистограмма; 3 – полигон

Данные по анализу рассеяния представлены в таблице 3, 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 3 – 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

Таблица 4 – Распределение размеров коренных опор двигателя ЯМЗ при дефектации

Параметр	Размер, мм	Процент деталей, %	Теоретическая вероятность
Количество годных деталей	$116^{+0,021}$	92	0,9927
Количество брака	Свыше 116,021	8	0,0037

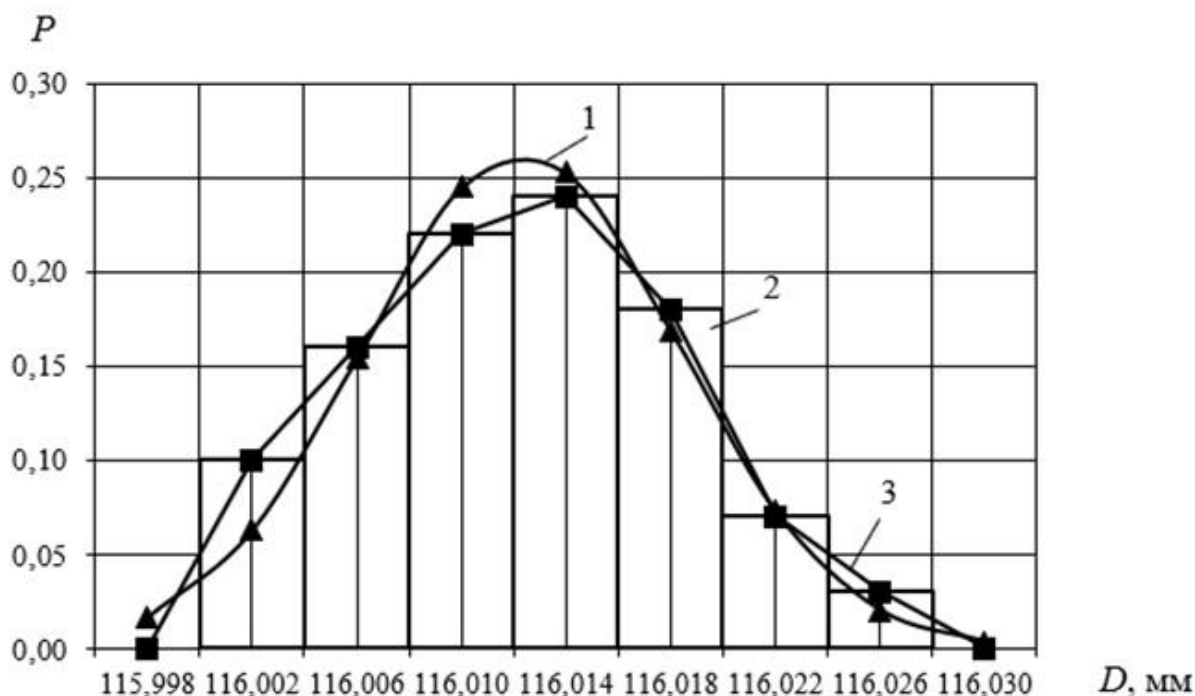


Рисунок 4 – Рассеяние изношенных размеров отверстий коренных опор двигателя ЯМЗ-238  $D=116^{+0,021}$  мм: 1 – теоретическая кривая; 2 – гистограмма; 3 – полигон

Определение вышеперечисленных параметров  $n$ ,  $m$  и  $s$ , характеризующих уровень брака от наличия погрешности измерений, производилось по методике, изложенной в РД 50-9 8-86, но с учетом реально сформированного неравенства центра распределения размеров середине поля допуска – среднему размеру (таблица 5, рисунок 5).

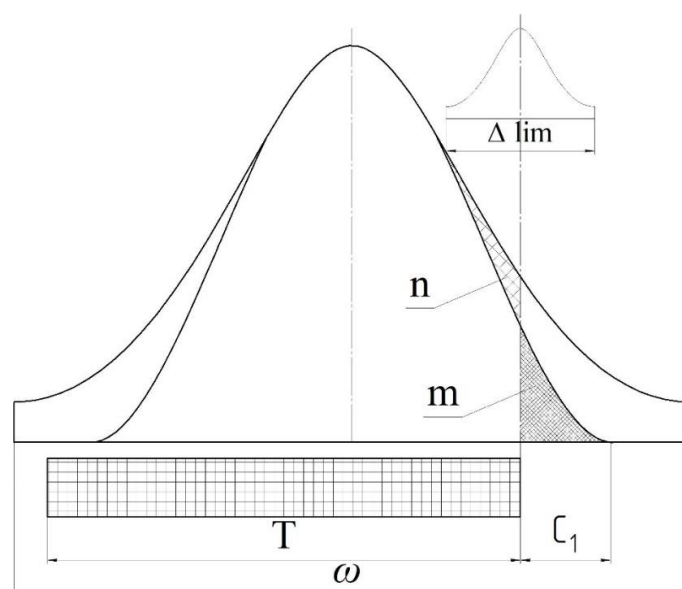


Рисунок 5 – Теоретическая модель формирования брака при дефектации коренных опор

Таблица 5 – 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	$2X/\sigma_{tex}$	-	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

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 и выражается величиной выхода измеряемого параметра за границу допуска у неправильно принятых.

Полученные данные позволили выявить зависимости количества (в процентах) неправильно принятых и неправильно забракованных отверстий коренных опор блоков цилиндров от погрешности СИ:

$$m = 0,5851\Delta^{1,3225} ; \quad (13)$$

$$n = 0,7533\Delta^{0,6342} . \quad (14)$$

где  $\Delta$  – погрешность нутромеров при контроле, мкм, таблица 5; размерности  $m$  и  $n$  – в процентах.

Коэффициенты корреляции данных степенных зависимостей – св. 0,99.

Следующим шагом в работе было проведено исследование метрологического обеспечения при контроле и дефектации отверстий втулок под шейки распределительного вала. Точностные параметры при дефектации отверстий втулок под шейки распределительного вала блоков цилиндров двигателей ЯМЗ ЯМЗ-238 представлены в таблицах 6 и 7, и на рисунке 6.

Таблица 6 – 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

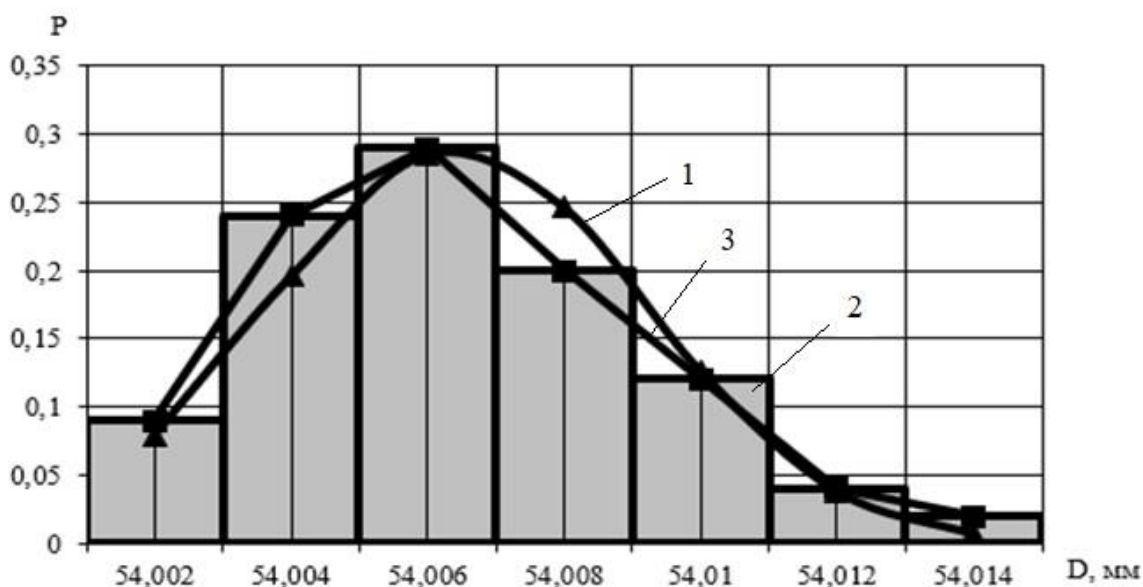


Рисунок 6 – Рассеяние размеров отверстий втулок под шейки распределительного вала блоков цилиндров двигателей ЯМЗ-238  $D=54^{+0,03}$  мм новых блоков цилиндров: 1 – теоретическая кривая; 2 – гистограмма; 3 – полигон

Таблица 7 – 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 таблиц 8 и 9 и рисунка 7 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 8 – Распределение размеров отверстий втулок под шейки распределительного вала двигателя ЯМЗ при дефектации

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

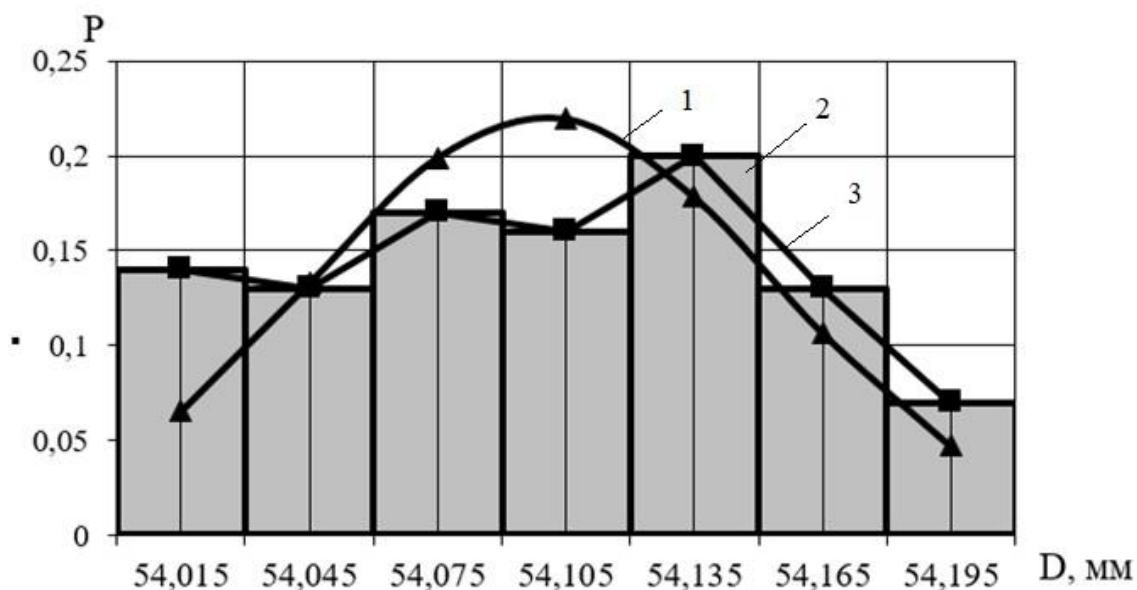


Рисунок 7 – Рассеяние изношенных размеров отверстий втулок под шейки распределительного вала распределительного вала двигателя ЯМЗ-238

$$D=54^{+0,03} \text{ мм:}$$

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

Таблица 9 – 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 <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	$X$	мм	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067
Отношение удвоенного $X$ к СКО рассеяния размеров	$2X/\sigma_{tex}$	-	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

Полученные данные позволили выявить зависимости количества (в процентах) неправильно принятых и неправильно забракованных отверстий втулок при дефектации от погрешности СИ:

$$m = 0,5499\Delta^{1,0817} ; \quad (15)$$

$$n = 0,0493\Delta^{1,0867} , \quad (16)$$

где  $\Delta$  – погрешность нутромеров при контроле, мкм, таблица 9; размерности  $m$  и  $n$  – в процентах.

Коэффициенты корреляции данных степенных зависимостей (13) и (14) – св. 0,99.

**В пятой главе «Технико-экономическая оценка результатов исследований»** проведен расчет экономии от повышения точности измерений.

Результаты расчета экономии от повышения точности измерений отверстий коренных опор при дефектации приведены в таблице 10.

В результате расчета и аппроксимации данных, представленных в таблице 10, получены следующие степенные зависимости, коэффициент корреляции которых выше 0,99:

потери от неправильно забракованных блоков цилиндров

$$P_{НЗ}^{Кор} = 468,05 \cdot \Delta^{1,3225} ; \quad (17)$$

потери от неправильно принятых блоков цилиндров

$$P_{НП}^{Кор} = 904,01 \cdot \Delta^{0,6342} ; \quad (18)$$

стоимость средств измерений

$$C_{СИ}^{Кор} = 438,7 \cdot \Delta^{-1,22} , \quad (19)$$

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

Таблица 10 – Результаты расчета экономии от повышения точности измерений отверстий коренных опор двигателя ЯМЗ при дефектации

Параметр	Обозначение	Единица измерений	Средство измерений				
			СИ5	СИ4	СИ3	СИ2	СИ1
Контролируемый размер	$D$	мм	116 <sup>+0,021</sup>				
Предельная погрешность СИ	$\Delta_{lim}$	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	$n$	%	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	$\mathcal{E}_n$	тыс. руб.	-	3040	8240	10800	11968
Экономия от уменьшения количества неправильно принятых блоков цилиндров	$\mathcal{E}_m$	тыс. руб.	-	240	1200	2088	2856

Согласно данным таблицы 10, 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.

В результате расчета и аппроксимации данных, представленных в таблице 11, получены следующие степенные зависимости, коэффициент корреляции которых выше 0,99:

потери от неправильно забракованных блоков цилиндров

$$P_{НЗ}^{Вр} = 659,92 \Delta^{1,0817} ; \quad (20)$$

потери от неправильно принятых блоков цилиндров

$$P_{НП}^{Вр} = 39,878 \Delta^{1,0756}; \quad (21)$$

стоимость средств измерений

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

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

Таблица 11 – Результаты расчета экономии от повышения точности измерений отверстий коренных опор отверстий втулок под шейки распределительного вала двигателя ЯМЗ при дефектации

Параметр	Обозначение	Единица измерений	Средство измерений				
			СИ5	СИ4	СИ3	СИ2	СИ1
Контролируемый размер	$D$	мм	$54^{+0,03}$				
Предельная погрешность СИ	$\Delta_{lim}$	мкм	$\pm 12$	$\pm 10$	$\pm 6,5$	$\pm 3,5$	$\pm 2,0$
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	$P_{нз}$	тыс. руб.	560	460	320	160	80
Потери от неправильно принятых втулок	$P_{пн}$	тыс. руб.	9960	8160	4680	2520	1440
Экономия от уменьшения неправильно забракованных блоков цилиндров	$\mathcal{E}_n$	тыс. руб.	-	100	240	400	480
Экономия от уменьшения количества неправильно принятых блоков цилиндров	$\mathcal{E}_m$	тыс. руб.	-	1800	5280	7440	8520

Согласно данным таблицы 11, 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.

## 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 погрешно-

сти 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.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ**

### **Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ**

1. Зимогорский, В. К. Износ коренных опор блока цилиндров дизелей ЯМЗ / В. К. Зимогорский, А. Ю. Кульчев, У. Ю. Антонова // Сельский механизатор. – 2024. – № 4. – С. 43-45. – DOI 10.47336/0131-7393-2024-4-43-44-45.

2. Инструментальный контроль дефектов коренных опор блока цилиндров / О. А. Леонов, В. К. Зимогорский, Ю. Г. Вергазова [и др.] // Агроинженерия. – 2024. – Т. 26, № 2. – С. 65-70. – DOI 10.26897/2687-1149-2024-2-65-70.

3. 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.

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

1. 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.

2. Assessment of piston quality using QFD-analysis / U. Antonova, P. Golitskiy, E. Cherkasova [et al.] // E3S Web of Conferences. – 2024. – Vol. 531. – P. 01003. – DOI 10.1051/e3sconf/202453101003.

### **Публикации в других научных изданиях**

1. 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.

2. Зимогорский, В. К. Использование гистограммы для анализа результатов дефектации коренных опор двигателей ЯМЗ при ремонте / В. К. Зимогорский // Чтения академика В. Н. Болтинского : сборник статей научно-практической конференции, посвященный 90-летию Шарова Николая Михайловича, Москва, 23-24 октября 2024 года. – М. : ООО «Сам Полиграфист», 2024. – С. 166-170.

3. Зимогорский, В. К. Определение износа коренных опор двигателей ЯМЗ при дефектации / В. К. Зимогорский // 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 , Москва, 19-20 декабря 2023 года. – М. : Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, 2023. – С. 176-180.

### **Авторские свидетельства, патенты, лицензии**

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024663185 Российская Федерация. «Цифровой контрольный листок» : № 2024661663 : заявл. 23.05.2024 : опубл. 05.06.2024 / П. В. Голиницкий, В. К. Зимогорский, У. Ю. Антонова, Э. И. Черкасова ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева».