VI Всероссийская (национальная) научная конференция: «Наука, технологии, общество: Экологический инжиниринг в интересах устойчивого развития территорий» (НТО-VI-2025)

17 (2025)

УДК 658.562.44
https://www.doi.org/10.47813/nto.6.2025.1001

EDN RWPIRQ

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

ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», ул. Тимирязева, 49, Москва, 127434, Россия

*E-mail: zimogorskij@rgau-msha.ru

Аннотация. В статье проводится всесторонний анализ существующих методов выбора средств измерений (СИ) для контроля линейных размеров отверстий при ремонте двигателей сельскохозяйственной техники. Особое внимание уделено методикам, разработанным в диссертационных исследованиях А.Р. Журавлевой и Н.Ж. Шкарубы, которые предлагают переход от традиционного подхода, основанного на стоимости или коэффициенте уточнения, к технико-экономической оптимизации, ориентированной на минимизацию суммарных потерь, включающих как затраты на измерения, так и экономический ущерб от ошибок контроля (неправильного забракования и принятия деталей). Рассматриваются недостатки классических методов (выбор по коэффициенту уточнения, по допускам калибров, по принципу безошибочности) и обосновывается необходимость комплексного подхода, учитывающего специфику ремонтного производства. Приводятся графические зависимости, иллюстрирующие эффективность предложенной методики на примере выбора СИ для контроля коренных и шатунных опор двигателей ЯМЗ-238, что подтверждает ее практическую значимость для повышения качества и экономической эффективности ремонтных работ в агропромышленном комплексе.

Ключевые слова: метрологическое обеспечение, ремонт двигателей, контроль отверстий, средства измерений, выбор средств измерений, технико-экономическая оптимизация, потери от погрешности измерений, неправильное забракование, неправильное принятие, АПК.

Metrological support for hole inspection in engine repair for agricultural machinery: analysis of existing measurement instrument selection methods

V.K. Zimogorskiy*, D.A. Pupkova, Ya.K. Zimogorskiy

Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Timiryazevskaya street, 49, Moscow, 127434, Russia

*E-mail: zimogorskij@rgau-msha.ru

Abstract. This article provides a comprehensive analysis of existing methods for selecting measuring instruments (MI) for controlling linear hole dimensions during the repair of agricultural machinery engines. Particular attention is paid to the methodologies developed in the dissertations of A.R. Zhuravleva and N.Zh. Shkaruba, which propose a shift from the traditional cost-based or refinement coefficient approach to a techno-economic optimization focused on minimizing total losses, including both measurement costs and the economic damage caused by control errors (incorrect rejection and acceptance of parts). The shortcomings of classical methods (selection by refinement coefficient, by gauge tolerances, by the principle of error-free control) are examined, and the necessity of a comprehensive approach that accounts for the specifics of repair production is substantiated. Graphical dependencies are presented, illustrating the effectiveness of the proposed methodology using the example of selecting MIs for controlling main and connecting rod bearings of YaMZ-238 engines, confirming its practical significance for improving the quality and economic efficiency of repair work in the agro-industrial complex

Keywords: metrological support, engine repair, hole inspection, measuring instruments, selection of measuring instruments, techno-economic optimization, losses from measurement error, incorrect rejection, incorrect acceptance, agro-industrial complex.

1. Введение

Качество ремонта сельскохозяйственных машин, их надежность и долговечность напрямую зависят от точности выполняемых технологических операций, одной из ключевых среди которых является контроль геометрических параметров деталей [1]. Особенно критичным является контроль размеров отверстий в ответственных соединениях, таких как коренные и шатунные опоры коленчатых валов двигателей, где даже незначительные отклонения могут привести к преждевременному выходу двигателя из строя, значительным экономическим потерям для сельхозпроизводителя и снижению конкурентоспособности отечественного ремонтного сектора [2]. В этой связи, обеспечение высокого уровня метрологического обеспечения ремонтного производства, а именно — рациональный выбор средств измерений (СИ), становится одной из важнейших задач [3].

Традиционные подходы к выбору СИ, основанные на упрощенных критериях, таких как стоимость прибора или коэффициент уточнения, зачастую не позволяют достичь оптимального баланса между затратами на измерения и качеством контроля. Они не учитывают экономический ущерб, возникающий в результате ошибок первого и второго рода — неправильного забракования годных деталей и неправильного принятия бракованных. В условиях ремонтного производства, где детали имеют широкий разброс размеров и часто находятся на пределе допустимого износа, этот ущерб может многократно превышать затраты на приобретение и эксплуатацию более точных, но дорогих СИ [4].

В данной статье проводится анализ существующих методов выбора СИ для контроля отверстий, с акцентом на современные технико-экономические подходы, разработанные в диссертационных работах А.Р. Журавлевой и Н.Ж. Шкарубы. Целью анализа является демонстрация того, что наиболее эффективной стратегией является выбор СИ, обеспечивающего минимум суммарных издержек, включающих как прямые затраты на измерения, так и косвенные потери от ошибок контроля.

2. Классификация и критический анализ традиционных 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 [5]. Существующие методы можно условно разделить на несколько групп.

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. Коэффициент уточнения k_T определяется как отношение допуска на изготовление T к нормативной погрешности измерения [Δ *изм*] [6]:

$$k_T = \frac{T}{2[\Delta \text{ изм}]} \quad (1)$$

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…6, что соответствует погрешности измерения 16,7...33,3% от допуска [7]. Согласно ГОСТ 8.549-86, для линейных размеров [Δ *изм*] принимается равной 20...35% от T, что соответствует k_T= 2,5…1,4.

Недостатки метода:

1. 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.
2. Статичность. Не учитывает изменчивость процесса и объем производства. Для мелкосерийного ремонта применение дорогостоящего высокоточного СИ может быть экономически нецелесообразно.
3. Упрощенность. Не рассматривает вероятностную природу погрешностей измерения и контролируемых параметров, что не позволяет оценить реальный риск ошибок I и II рода.

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 [7]. Расчетная предельная погрешность измерений Δ_{lim} определяется по формуле:

$$\Delta_{lim} = \sqrt{(\frac{T}{2})^2 + l_{max}^2 * k_z^2} \quad (2)$$

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

Недостатки метода:

1. 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.
2. Сложность расчетов. Требует знания параметров калибров, что не всегда применимо при выборе универсальных СИ.
3. Недостаточная точность. Не обеспечивает высокой достоверности контроля для ответственных соединений.

2.3. Выбор по принципу безошибочности контроля

Основная идея этого метода заключается в ограничении вероятностей ошибок I рода (браковка годных деталей — P_I) и II рода (принятие бракованных деталей — P_{II}) [8]. 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:

$$N_0 = 1 - P_I - P_{II} \quad (3)$$

Недостатки метода:

1. Высокая стоимость. Для достижения очень малых значений PI и PII требуется применение СИ с исключительно высокой точностью, что экономически нецелесообразно для большинства ремонтных операций.
2. Сложность реализации. Требует сложных расчетов вероятностных характеристик, знания законов распределения контролируемых параметров и погрешностей измерений, что в условиях ремонтного предприятия зачастую затруднительно.

2.4. Выбор по технико-экономическим показателям

Этот подход, пытается связать точность измерений с удельными издержками на контрольные операции [9]. Целевая функция минимизации суммарных издержек G представлена как:

$$G = B(\sigma) + C(\sigma) \rightarrow min \quad (4)$$

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

Недостатки метода:

1. Упрощенные зависимости. Функции B(σ) и C(σ) 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.
2. 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.

3. 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 [2] и Н.Ж. Шкарубы [3], 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 (ΣЗГ). Включают в себя амортизационные отчисления, затраты на поверку, заработную плату контролеров, затраты на энергоресурсы и материалы.
2. Годовых потерь от погрешности измерений (ΣПГ). Включают в себя потери, возникающие из-за ошибок контроля:
   - Потери от неправильного забракования годных деталей (ошибки I рода).
   - Потери от неправильного принятия бракованных деталей (ошибки II 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:

$$\Sigma И_{\Gamma} = \Sigma З_{\Gamma} + \Sigma П_{\Gamma} \rightarrow min \quad (5)$$

А.Р. Журавлева в своей диссертации [2] 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 ЦД3М, несмотря на ее высокую стоимость [2].

Н.Ж. Шкаруба в своей докторской диссертации [3] 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 Шкарубой Н.Ж. 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. На рисунке 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 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%.

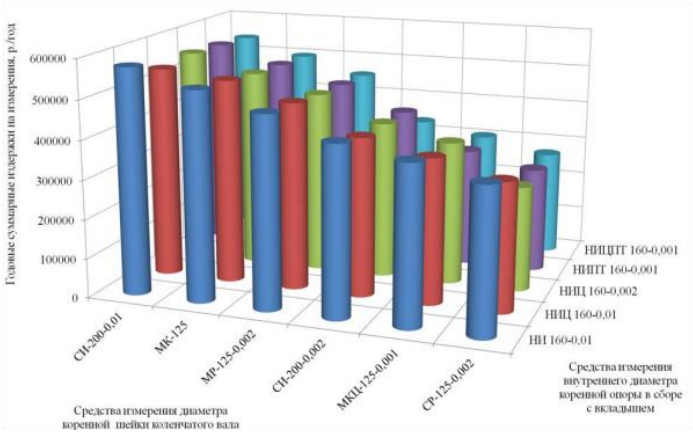

Рисунок 1. Суммарные годовые издержки измерительного процесса деталей, образующих соединение «коренная шейка коленчатого вала, восстановленного под 1-й ремонтный размер — коренная опора в сборе с ремонтным вкладышем» двигателей ЯМЗ-238.

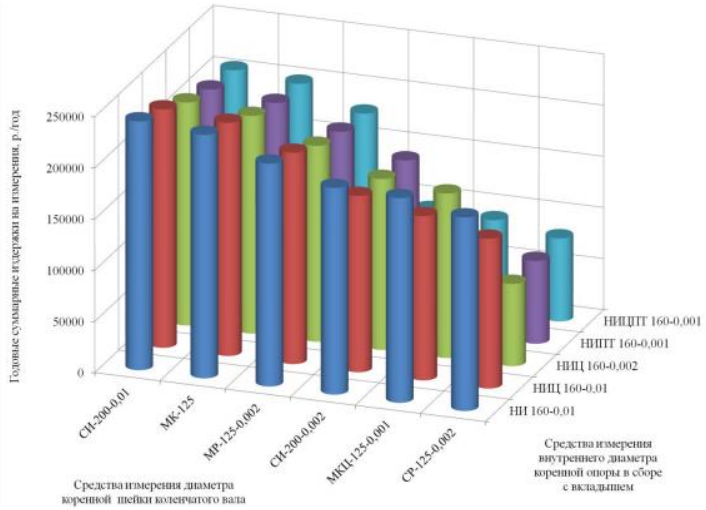

Рисунок 2. Суммарные годовые издержки измерительного процесса деталей, образующих соединение «коренная шейка нового коленчатого вала — коренная опора в сборе с новым вкладышем» двигателей ЯМЗ-238.

4. Заключение

Проведенный анализ существующих методов выбора средств измерений для контроля отверстий при ремонте двигателей машин АПК позволяет сделать следующие выводы.

Традиционные методы (по коэффициенту уточнения, по допускам калибров, по принципу безошибочности) обладают рядом существенных недостатков, главным из которых является игнорирование экономической составляющей процесса измерения. Они не позволяют найти оптимальное решение, обеспечивающее баланс между затратами на контроль и качеством выпускаемой продукции.

Наиболее перспективным и научно обоснованным подходом является технико-экономическая оптимизация, предложенная в диссертационных работах А.Р. Журавлевой и Н.Ж. Шкарубы. Суть этого подхода заключается в выборе СИ, обеспечивающего минимум суммарных годовых издержек, которые включают как прямые затраты на измерения, так и косвенные потери от ошибок контроля (неправильного забракования и принятия деталей).

Методика, разработанная Н.Ж. Шкарубой, является наиболее комплексной, так как она учитывает влияние погрешности измерения на качество сборки сопрягаемых деталей и позволяет выбрать оптимальную пару СИ для контроля отверстия и вала. Подтвержденная практическими расчетами и графическими зависимостями (рис. 1, 2) эффективность этой

методики делает ее незаменимым инструментом для повышения качества и экономической эффективности ремонтного производства в агропромышленном комплексе.

Внедрение подобных методик на ремонтных предприятиях позволит не только снизить издержки, но и повысить надежность и ресурс отремонтированной техники, что является стратегически важной задачей для сельского хозяйства России.

Таким образом, переход от интуитивного или упрощенного выбора СИ к научно обоснованному, основанному на минимизации суммарных потерь, является необходимым шагом для совершенствования метрологического обеспечения и повышения конкурентоспособности отечественного ремонтного сектора АПК.

Список литературы

1. Леонов О.А. Метрологическое обеспечение производства: Учеб. Пособие / О.А. Леонов, Н.Ж. Шкаруба. – М.: РНИИИТЭИ, 2017. – 180 с.
2. Журавлева А.Р. Разработка методики выбора средств измерений для контроля отверстий при ремонте сельскохозяйственной техники: дис. ... канд. техн. Наук / А.Р. Журавлева. – М., 2012. – 176 с.
3. Шкаруба Н.Ж. Совершенствование метрологического обеспечения ремонтного производства АПК: автореф. дис. ... д-ра техн. Наук / Н.Ж. Шкаруба. – М., 2019. – 40 с.
4. Алексеев В.В. Метрология, стандартизация, сертификация / В.В. Алексеев. – М.: Академия, 2010. – 384 с.
5. Артемьев Б.Г. Справочное пособие для работников метрологических служб / Б.Г. Артемьев, С.М. Голубев. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 279 с.
6. Дунин-Барковский И.В. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения / И.В. Дунин-Барковский. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 352 с.
7. РД 50-98-86. Методические указания. Выбор универсальных средств измерений линейных размеров до 500 мм (по применению ГОСТ 8.051-81). – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 84 с.
8. Бородачев Н.А. Основные вопросы теории точности производства / Н.А. Бородачев. – М.: Изд-во АН СССР, 1950. – 196 с.
9. Миф Н.П. Оптимизация точности измерений в производстве / Н.П. Миф. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 136 с.