

ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС В АПК

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.815

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-75-81>



Оценка качества процесса обработки опорных шеек распределвалов под ремонтный размер с помощью статистических инструментов контроля

O.A. Леонов¹, Г.Н. Темасова^{2✉}, П.В. Голиницкий³, И.Н. Кравченко⁴, А.Н. Самордин⁵

^{1,2,3,4,5} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия

¹ oaleonov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8469-8052>

² temasova@rgau-msha.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-0555-2758>

³ gpv@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7303-1658>

⁴ kravchenko-in71@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1826-3648>

⁵ asamordin@rgau-msha.ru

Аннотация. Качественный ремонт и регулярное обслуживание распределительного вала обеспечивают надежную и эффективную работу двигателя. Качество восстановленных деталей зависит от прецизионной механической обработки. Исследования проведены с целью оценки качества настройки оборудования при выполнении операции обработки под ремонтный размер опорных шеек распределительного вала двигателя ЯМЗ-236. Для оценки качества процесса восстановления распределала применены контрольные листки, контрольные карты Шухарта и гистограмма. Диаметры 20 опорных шеек распределвалов до ремонта и после него в двух сечениях и в двух взаимно перпендикулярных плоскостях определяли рычажной скобой СР-75. Контрольные листки позволили собрать и обработать первичную информацию для статистического анализа процесса ремонта распределительных валов двигателей ЯМЗ-236. Анализ контрольных карт показал, что вариации размахов внутри валов и между ними обусловлены случайными причинами. Это указывает на стабильность и управляемость технологического процесса. Гистограмма позволила оценить вероятность возникновения исправимого брака менее 0,5%, а неисправимого брака – 0%. Рассчитанный индекс воспроизводимости 1,66 свидетельствует о соответствии технологического процесса требованиям. Качество настройки станка для обработки опорных шеек соответствует требованиям. Гипотеза о поддержании качества процесса обработки регулярным применением статистических методов контроля подтверждена.

Ключевые слова: ремонт; распределительный вал; опорные шейки; качество; брак; контрольный листок; контрольная карта; гистограмма

Для цитирования: Леонов О.А., Темасова Г.Н., Голиницкий П.В., Кравченко И.Н., Самордин А.Н. Оценка качества процесса обработки опорных шеек распределвалов под ремонтный размер с помощью статистических инструментов контроля // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 6. С. 75-81. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-75-81>

ORIGINAL ARTICLE

Quality assessment of machining the main bearings journals of camshafts to oversize dimensions using statistical process control tools

O.A. Leonov¹, G.N. Temasova^{2✉}, P.V. Golinitzkiy³, I.N. Kravchenko⁴, A.N. Samordin⁵

^{1,2,3,4,5} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia

¹ oaleonov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8469-8052>

² temasova@rgau-msha.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-0555-2758>

³ gpv@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7303-1658>

⁴ kravchenko-in71@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1826-3648>

⁵ asamordin@rgau-msha.ru

Abstract. High-quality repair and regular maintenance of the camshaft ensure reliable and efficient engine operation. The quality of restored parts depends on precision machining. The research aimed to evaluate the quality of equipment settings to machine the main bearing journals of the YaMZ-236 engine camshaft to oversize dimensions. To assess

the quality of the camshaft restoration process, the authors applied control sheets, Shewhart control charts, and a histogram. The diameters of 20 camshaft bearing journals, both before and after repair, were determined in two cross-sections and in two mutually perpendicular planes using an SR-75 lever gauge. The check sheets allowed for the collection and processing of primary data for the statistical analysis of the repair of the YaMZ-236 engine camshaft. Analysis of the control charts showed that the variations in ranges (spreads) within and between the shafts are due to random causes. This indicates the stability and controllability of the technological process. The histogram allowed for the estimation of the probability of repairable defects at less than 0.5%, and irreparable defects (scrap) at 0%. The calculated reproducibility index of 1.66 shows that the technological process complies with the requirements. The quality of the machine settings for machining the bearing journals complies with the requirements. The study has confirmed a hypothesis regarding maintaining the machining quality through the regular application of statistical control methods.

Keywords: agricultural machinery repair; camshaft; main bearing journals; process quality; defects; checklist; control chart; histogram

For citation: Leonov O.A., Temasova G.N., Golinitkiy P.V., Kravchenko I.N., Samordin A.N. Quality assessment of machining the main bearings journals of camshafts to oversize dimensions using statistical process control tools. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(6):75-81 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-75-81>

Введение

Обеспечение высокого качества выпускаемой продукции и оказываемых услуг невозможно без использования различных статистических методов. Статистическое регулирование качества процесса ремонта сельскохозяйственной техники обеспечивает повышение эффективности ремонтных работ и снижение количества возникающих дефектов [1-4]. Данный метод основан на применении статистических подходов для анализа вариаций параметров, влияющих на качество ремонтируемых узлов и агрегатов, позволяя своевременно обнаруживать и устранять причины отклонений [5-7].

Статистическое регулирование технологических процессов не должно рассматриваться как изолированная задача или отдельный элемент управления производством [8]. Это лишь один из элементов системы менеджмента качества предприятия, направленный на поддержание и улучшение производственных процессов посредством систематического сбора, анализа и интерпретации данных.

Представление данных в виде графиков, таблиц и отчетов делает информацию доступной и понятной руководителям всех уровней. Однако визуализация сама по себе недостаточна – необходимы механизмы обратной связи и реакция на выявленные проблемы.

Статистическое регулирование не может существовать отдельно от остальных функций управления предприятием. Его успех зависит от интеграции с общей стратегией улучшения качества, правильной постановки целей, эффективного взаимодействия подразделений и постоянного обучения персонала. Только комплексный подход позволит эффективно решать задачи обеспечения высокого качества продукции и минимизировать затраты на устранение дефектов.

Распределительный вал играет ключевую роль в работе двигателя внутреннего сгорания [9]: управляя открытием и закрытием клапанов цилиндров, он обеспечивает своевременную подачу топливно-воздушной смеси и удаление отработавших газов. Правильная работа распределительного вала напрямую влияет на мощность, экономичность и долговечность двигателя. Повреждения или неисправности распределительного вала приводят к сбоям в работе двигателя, потере мощности, увеличенному расходу топлива и даже к выходу двигателя из строя. Следовательно, качественный ремонт и регулярное обслуживание распределительного вала являются обязательными условиями надежной и эффективной работы любого двигателя. Можно ожидать, что регулярное применение статистических методов контроля позволит оценить качество процесса обработки деталей и соответствие технологического процесса и оборудования требованиям точности.

Цель исследований: оценка качества настройки оборудования для восстановления опорных шеек распределительного вала до ремонтных размеров.

Материалы и методы

Объект исследований – процесс обработки опорных шеек распределителя ЯМЗ-236 при ремонте.

Предмет исследований – классические инструменты контроля качества применительно к анализу процесса обработки опорных шеек распределителя.

Во время работы двигателя на распределительный вал действуют силы трения, вибрация, знакопеременные скручивающие и изгибающие моменты, среда. В результате опорные шейки изнашиваются, и возникают отказы газораспределительного механизма (рис. 1) [10].

Износ опорных шеек устраняют обработкой под ремонтные размеры.

В процессе исследований измеряли диаметры опорных шеек распределительных валов двигателей ЯМЗ-236. Измерения каждой шейки производили в сечениях I-I и II-II и в двух взаимно перпендикулярных плоскостях А-А и Б-Б (рис. 2).

В большинстве случаев морально и физически устаревшее металлокрежущее технологическое оборудование ремонтных предприятий имеет пониженную точность, что отражается на качестве обработки поверхностей [11].

Ввод в производственный процесс ремонтных предприятий операций контроля и грамотная обработка полученных статистических данных позволяют существенно повысить качество отремонтированных сборочных единиц [12, 13, 14]. Такой контроль подразумевает регулярные проверки и калибровку оборудования для обеспечения высокой точности и качества выполнения ремонтных работ. Правильная настройка и контроль за процессами восстановления распределительного вала могут существенно повысить его эксплуатационные характеристики и срок службы.

Статистическое управление технологическим процессом восстановления распределительного вала позволяет своевременно обнаружить вариабельность и вмешаться в систему.

Для проведения статистического анализа качества процесса ремонта распределительного вала замерили диаметры опорных шеек до ремонта и после него; объем выборки составил 20 шт. Номинальный размер опорных шеек распределительного вала двигателя ЯМЗ-236 – $54_{-0,105}^{+0,065}$ мм. Предельно допустимый

размер без ремонта – 53,88 мм. При превышении значения предельного размера опорные шейки обрабатывают под категорийный ремонтный размер. Ремонтные размеры опорных шеек распределительного вала должны соответствовать ремонтным размерам отверстий втулок, запрессованных в блок цилиндров.

Ремонтные размеры:

1-й ремонтный размер – $53,7_{-0,105}^{+0,065}$ мм;

2-й ремонтный размер – $53,4_{-0,105}^{+0,065}$ мм.

В ходе контроля диаметров опорных шеек распределительного вала двигателя ЯМЗ-236 применяли рычажную скобу СР-75 с точностью 0,001 мм и погрешностью измерений $\pm 0,001$ мм.

Выбор инструмента статистического анализа качества процесса зависит от специфики конкретного процесса, целей анализа и имеющихся ресурсов. Комбинация нескольких методов позволяет достичь наилучших результатов в повышении качества и эффективности производства.

Для оценки качества технологического процесса и статистического анализа полученных данных применяли комплекс инструментов:

1. Контрольный листок – для сбора статистических данных, оценки брака по величине размера и отклонений формы поверхности.

2. Контрольные карты Шухарта – для оценки стабильности и качества технологического процесса обработки шеек под ремонтный размер.

3. Гистограмма – для оценки зоны рассеяния действительных размеров при обработке и смещения центра распределения по отношению к допуску с целью установления величин и причин исправимого и неисправимого брака.

Собранные данные обработали с помощью методов теории вероятностей и математической статистики [15]. Это позволило провести количественный анализ, определить среднее значение, стандартное отклонение и другие статистические характеристики, необходимые для оценки точности и стабильности технологического процесса. Использование комбинации инструментальных и статистических методов обеспечило всесторонний контроль размеров диаметров деталей.

Результаты и их обсуждение

Контрольный листок целесообразно использовать как инструмент анализа появления брака и как статистическую форму отчетности рабочего при выполнении операции обработки вала под ремонтный размер.

При дефектации заполнили контрольный листок и рассчитали значения отклонения от цилиндричности опорных шеек (табл. 1).

Данная форма контрольного листка заполняется по каждому проконтролированному



Рис. 1. Износ опорных шеек

Fig. 1. Wear of main bearing journals

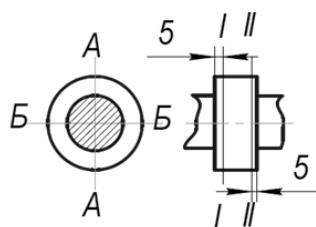


Рис. 2. Схема измерений опорных шеек распределительного вала двигателя ЯМЗ-236

Fig. 2. Measurement diagram for camshaft bearing journals of the YaMZ-236 engine

Таблица 1

Контролируемые параметры опорных шеек распределительного вала двигателя ЯМЗ-236

Table 1

Checklist for monitoring the main bearing journals of the YaMZ-236 engine camshaft

Контролируемый параметр	Сечение/Плоскость	Номера шеек			
		I	II	III	IV
Диаметр шейки, мм	Сечение I-I	Плоскость А-А	53,713	53,711	53,719
		Плоскость Б-Б	53,715	53,713	53,722
	Сечение II-II	Плоскость А-А	53,714	53,714	53,720
		Плоскость Б-Б	53,716	53,715	53,721
Конусность, мм	Плоскость А-А	0,0005	0,0015	0,0005	0,0005
	Плоскость Б-Б	0,0005	0,001	0,0005	0,0005
Овальность, мм	Сечение I-I	0,001	0,001	0,0015	0,0005
	Сечение II-II	0,001	0,0005	0,0005	0,0005
Износ		0,182	0,184	0,176	0,169
Итоговое заключение по валу		Обработка под 1-й ремонтный размер			

распределительному валу. На основании контрольного листка осуществляется механическая обработка опорных шеек распределительного вала двигателя ЯМЗ-236 под 1-й или 2-й ремонтные размеры. После обработки опорных шеек проводится контроль их диаметров и строится контрольная карта средних значений и размахов для проведения анализа самого процесса обработки опорных шеек под ремонтный размер.

Данные для построения контрольных карт средних арифметических значений и размахов диаметров опорных шеек распределительного вала двигателя ЯМЗ-236 после ремонта представлены в таблице 2.

С использованием данных таблицы 2 были построены контрольные карты (рис. 3).

На контрольной карте средних значений границы (Х-карта) поля допуска значительно шире контрольных границ карты. Контрольная карта средних значений предназначена для проверки стабильности среднего значения процесса относительно случайных колебаний, вызванных внутренними факторами процесса. Границы поля допуска же задаются техническими требованиями изделия и отражают приемлемые пределы отклонений размеров деталей или параметров продукции. Несмотря на то, что фактические размеры редко выходят за пределы поля допуска, контрольные карты средних значений играют важную роль в поддержании стабильного качества и надежности процесса. Их использование служит эффективным средством предупреждения возможных нарушений и поддержания высокого уровня управляемости технологического процесса.

На основании карты средних арифметических значений и размахов можно отметить, что не наблюдается выхода значения параметра за пределы

контрольных границ, также интервал допуска шире границ регулирования карты средних значений, соответственно в данный момент брак при обработке опорных шеек распределительного вала под первый ремонтный размер не обнаружен. Но на карте размахов (R-карта) имеются убывающая последовательность точек (7-12) и последовательность из 9 точек, лежащих по одну сторону от центральной

Таблица 2

Данные для построения контрольных карт при анализе качества обработки шеек распределительного вала двигателя ЯМЗ-236

Table 2

Data for constructing control maps of arithmetic averages and diameter ranges of the camshaft bearing journals of the YaMZ-236 engine

Параметр контрольной карты	Значение, мм
Наибольший предельный размер	53,635
Значение середины допуска	53,615
Наименьший предельный размер	53,595
Среднеквадратичное отклонение	0,0036
Верхняя контрольная граница \bar{X} -карты	53,631
Двухсигмовая граница от среднего значения вверх	53,628
Односигмовая граница от среднего значения вверх	53,624
Средняя линия \bar{X} -карты	53,620
Односигмовая граница от среднего значения вниз	53,617
Двухсигмовая граница от среднего значения вниз	53,613
Нижняя контрольная граница \bar{X} -карты	53,609
Верхняя контрольная граница R-карты	0,034
Средняя линия R-карты	0,015
Нижняя контрольная граница R-карты	0

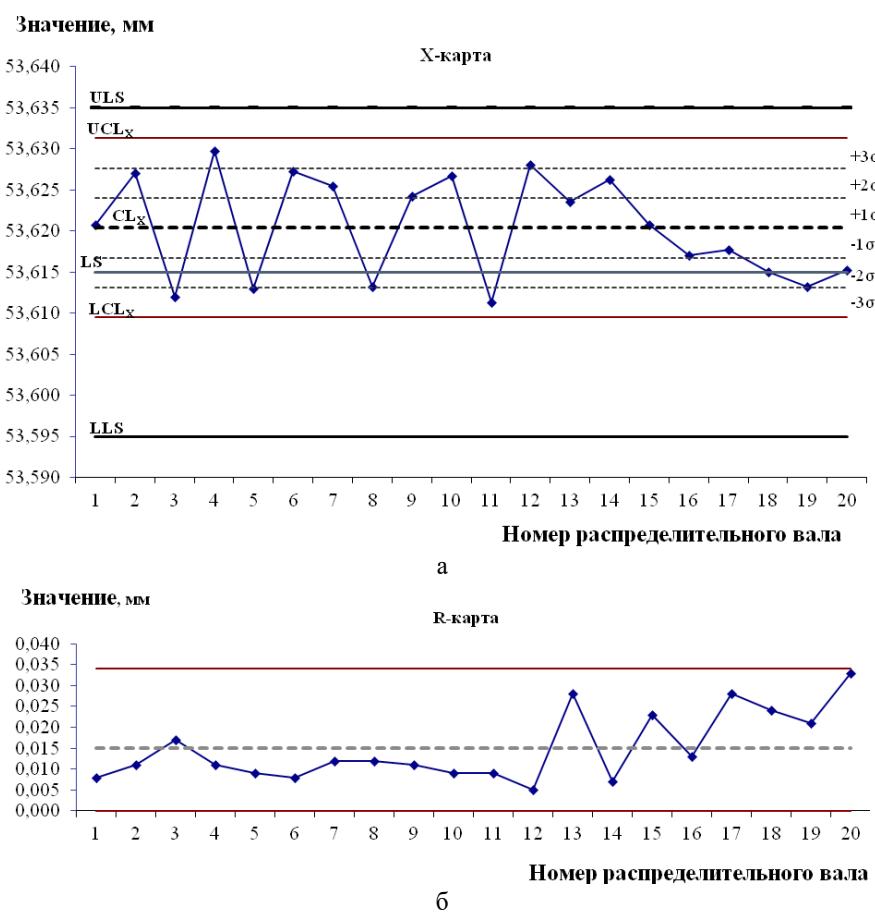


Рис. 3. Карты средних арифметических значений (а) и размахов (б) диаметров опорных шеек распределительных валов двигателя ЯМЗ-236

Fig. 3. Maps of arithmetic averages and diameter ranges of the camshaft bearing journals of the YaMZ-236 engine

линии (4-12). Данное расположение точек указывает на то, что в течение определенного времени на процесс воздействуют неслучайные причины изменчивости, выводящие процесс из управляемого состояния.

Статистическую стабильность и управляемость процесса можно определить, используя индекс воспроизводимости:

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma_x}$$

Индекс воспроизводимости процесса C_p составил 1,66. Соответственно можно считать, что процесс управляем при контроле.

При обнаружении брака в контрольном листке требуется строить гистограмму. Гистограмма, как важнейший инструмент анализа исправимого и неисправимого брака при допусковом контроле, может быть построена по полученным статистическим данным (табл. 3).

Критерий согласия χ^2 -квадрат показал, что с вероятностью 85% исследуемое распределение можно считать нормальным.

Рассчитанный коэффициент настроенности процесса обработки шеек под ремонтный размер равен 0,125.

Это говорит о том, что центр распределения смещен в сторону исправимого брака.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что процессом управляет опытный рабочий, исключающий появление неисправимого брака.

Гипотеза о поддержании качества процесса обработки регулярным применением статистических методов контроля подтверждена.

Таблица 3
Данные для построения гистограммы по оценке качества обработки опорных шеек распределительных валов

Table 3
Data for constructing a histogram to evaluate the machining quality of camshaft bearing journals

Границы интервала, мм		Относительная частота	Теоретическая частота
нижняя	верхняя		
53,609	53,613	0,100	0,131
53,613	53,617	0,250	0,227
53,617	53,620	0,100	0,257
53,620	53,624	0,150	0,206
53,624	53,627	0,300	0,131
53,627	53,631	0,100	0,049

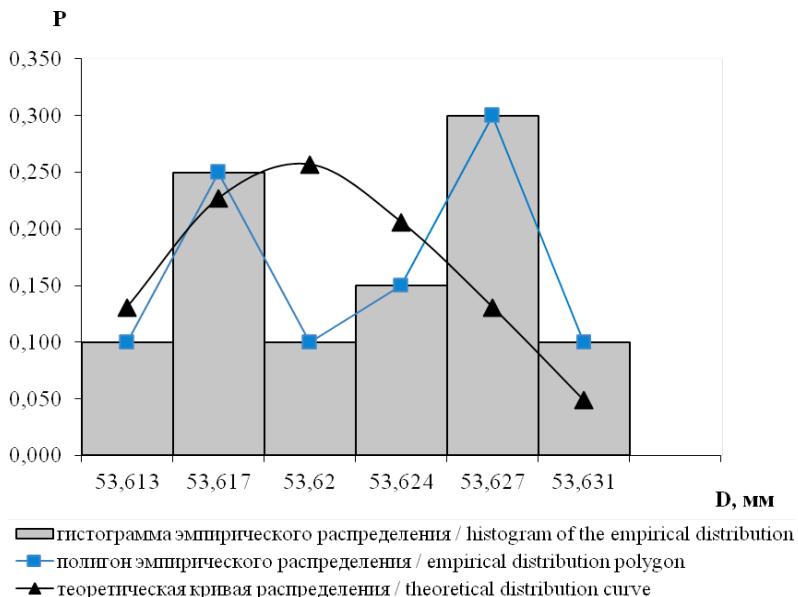


Рис. 4. Рассеяние диаметров опорных шеек распределительных валов двигателей ЯМЗ-236 при ремонте

Fig. 4. Dispersion of the diameters of the camshaft bearing journals of the YaMZ-236 engines during repair

Выводы

Оценка качества процесса обработки опорных шеек распределительного вала двигателя ЯМЗ-236 под ремонтный размер, выполненная с помощью контрольных листков, контрольных карт и гистограммы, показала следующее:

– целесообразно раз в квартал строить контрольные карты Шухарта для определения уровня настроенности процесса;

– рассчитанный индекс воспроизводимости 1,66 свидетельствует о соответствии технологического

процесса требованиям, технологический процесс обработки шеек под ремонтный размер можно считать стабильным и управляемым, оборудование отвечает предъявляемым требованиям по точности;

– вероятность возникновения исправимого брака составляет менее 0,5%, а неисправимого брака – 0%, центр распределения смещен в сторону исправимого брака, процессом управляет опытный рабочий, исключающий появление неисправимого брака, а в случае появления исправимого (шайки по диаметру больше положенного) доводит размер до требуемого значения по технической документации.

Список источников

- Дальский Н. Восстановление сельхозтехники – новая жизнь агрегатов! // Наше сельское хозяйство. 2023. № 13 (309). С. 64-67. EDN: JPPVBR
- Силина М.И., Костомахин М.Н. Спрос на модернизацию сельскохозяйственной техники на ремонтно-технических предприятиях // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. 2024. № 5. С. 3-9. EDN: CKUJNH
- Ерохин М.Н., Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж. и др. Производство и ремонт отечественных машин для агропромышленного комплекса с позиции принципа 5M // Вестник машиностроения. 2023. Т. 102. № 8. С. 701-704. EDN: BUMPSG
- Кушнарев Л.И. Обеспечение работоспособности техники в гарантийный период эксплуатации // Сельский механизатор. 2020. № 4. С. 2-3. EDN: WVFDGT
- Абдрашитов В.В., Калугин В.Е. Исследование, анализ и разработка статистических методов контроля качества // Техника и технологии строительства. 2024. № 1 (37). С. 56-61. EDN: ZPBVZE
- Голубкова И.В., Прокофьев О.В. Реализация алгоритмов статистического управления качеством на основе контрольных карт // Современные информационные технологии. 2019. № 29. С. 112-116. EDN: RXNTXD
- Аксенова Ж.А. Контрольные карты Шухарта как инструмент управления качеством готовой продукции

References

- Dalskiy N. Farm machinery repair: reliable new life for units. *Nashe selskoe khozyaystvo*. 2023;13(309):64-67. (In Russ.)
- Silina M.I., Kostomakhin M.N. Demand for the modernization of agricultural machinery in repair and technical enterprises. *Selskohozyajstvennaya tekhnika: obsluzhivanie i remont*. 2024;5:3-9. (In Russ.) <https://doi.org/10.33920/sel-10-2405-01>
- Erokhin M.N., Leonov O.A., Shkaruba N.Zh. et al. Production and repair of domestic machines for agroindustrial complexes from the position of the 5m principle. *Vestnik mashinostroeniya*. 2023;8:701-704. (In Russ.) <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2023-102-8-701-704>
- Kushnarev L.I. Ensuring the operability of equipment during the warranty period of operation. *Selskiy mekhanizator*. 2020;4:2-3. (In Russ.)
- Abdrashitov V.V., Kalugin V.E. Research, analysis and development of statistical methods of quality control. *Tekhnika i tekhnologii stroitelstva*. 2024;1(37):56-61. (In Russ.)
- Golubkova I.V., Prokofiev O.V. Implementation of statistical quality management algorithms based on control charts. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii*. 2019;29:112-116. (In Russ.)
- Aksenova Zh.A. Shekhart control charts as a tool for managing the quality of finished products. *Ekonomika i predprinimatelstvo*. 2019;7(108):1184-1188. (In Russ.)

- // Экономика и предпринимательство. 2019. № 7 (108). С. 1184-1188. EDN: BWZMSI
8. Горовенко В.А. Теоретические основы и методы управления качеством продукции // Вестник Автомобильно-дорожного института. 2020. № 1 (32). С. 104-110. EDN: UADVK
9. Тойгамбаев С.К., Шамуратов Д.Д. Организация участка по восстановлению распределительных валов машин // International Journal of Professional Science. 2024. № 7-2. С. 32-39. EDN: RTTSSU
10. Слинко Д.Б., Мурзаев В.П., Варламова Л.Д. Восстановление распределительных валов ДВС // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. 2021. № 8. С. 49-53. EDN: EPCSGP
11. Бураева Г.М. Оценка внешних и внутренних факторов организации технического сервиса машин в АПК // Технический сервис машин. 2022. № 4 (149). С. 13-20. EDN: OXUHEG
12. Кокиева Г.Е. Технологические основы эффективности обслуживания машин ремонтно-обслуживающих предприятий // Столыпинский вестник. 2023. Т. 5. № 6. EDN: PNWKHА
13. Черноиванов В.И. История развития ремонтной базы сельскохозяйственной техники в России // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2024. Т. 18, № 1. С. 4-12. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2024-18-1-4-12>
14. Шистеев А.В., Бебиков Д.В. Техническое обслуживание и ремонт тракторов Zoomlion RS в условиях Иркутской области // Актуальные вопросы аграрной науки. 2023. № 46. С. 35-44. EDN: DLONRG
15. Бриш В.Н., Старостин А.В., Осипов Ю.Р. Применяемость статистических методов анализа и контроля качества продукции машиностроения на разных этапах производства // Фундаментальные исследования. 2016. № 12-4. С. 719-724. EDN: XIITVZ

Информация об авторах

- ¹Леонов Олег Альбертович, д-р техн. наук, профессор; oaleonov@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8469-8052>; SPIN-код: 9399-5650
- ²Темасова Галина Николаевна, д-р техн. наук, доцент; temasova@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0555-2758>; SPIN-код: 8805-3016
- ³Голиницкий Павел Вячеславович, канд. техн. наук, доцент; gpv@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7303-1658>; SPIN-код: 2323-0797
- ⁴Кравченко Игорь Николаевич, д-р техн. наук, профессор; kravchenko-in71@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1826-3648>; SPIN-код: 8272-6031
- ⁵Самордин Андрей Николаевич, инженер; asamordin@rgau-msha.ru; SPIN-код: 4839-2231
- ^{1,2,3,4,5} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Вклад авторов

О.А. Леонов – научное руководство исследованиями;
Г.Н. Темасова – концептуализация, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;
П.В. Голиницкий – методология, проведение исследований;
И.Н. Кравченко – администрирование проекта, проверка результатов обработки статистической информации;
А.Н. Самордин – проведение исследований, сбор и обработка статистической информации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за plagiat

Статья поступила 02.06.2025, после рецензирования и доработки 29.10.2025; принятая к публикации 03.11.2025

Author Information

- Oleg A. Leonov¹, DSc (Eng), Professor; oaleonov@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8469-8052>; Scopus Author ID: 57209748174; ResearcherID: ABC-5873-2020
- Galina N. Temasova², DSc (Eng), Associate Professor; temasova@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0555-2758>; ResearcherID: AAD-6551-2022
- Pavel V. Golinitskiy³, CSc (Eng), Associate Professor; gpv@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7303-1658>; Scopus Author ID: 57216809753
- Igor N. Kravchenko⁴, DSc (Eng), Professor; kravchenko-in71@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1826-3648>; Scopus Author ID: 7004969160; ResearcherID: B-9463-2018
- Andrey N. Samordin⁵, engineer; asamordin@rgau-msha.ru
- ^{1,2,3,4,5} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation

Author Contributions

O.A. Leonov – research supervision;
G.N. Temasova – conceptualization, writing – review and editing of the manuscript;
P.V. Golinitskiy – methodology, investigation;
I.N. Kravchenko – project administration, writing – original draft;
A.N. Samordin – investigation.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests and are responsible for plagiarism

Received 02.06.2025; Revised 29.10.2025; Accepted 03.11.2025