

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.824.33:658.562.3:303.094.7

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-81-89>

Оптимизация процесса входного контроля распределительных валов при помощи имитационного моделирования

П.В. Голиницкий¹✉, У.Ю. Антонова², Э.И. Черкасова³, А.Н. Самордин⁴, Д.А. Пупкова⁵

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

¹ gpv@rgau-msha.ru✉; <https://orcid.org/0000-0001-7303-1658>

² uantonova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0126-3550>

³ e.cherkasova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2495-2028>

⁴ metr@rgau-msha.ru

⁵ bogolyubova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0273-2796>

Аннотация. Согласно исследованиям до 35% распределительных валов выбраковываются при дефектации как не подлежащие ремонту, из них 50% – по причине износа кулачков (2/3) и опорных шеек (1/3). Остальные дефекты распределены относительно равномерно. Данная статистика собрана на основе обработки большого массива данных и может не соответствовать конкретному предприятию, поэтому создание однозначной модели не представляется возможным. Нотации позволяют графически отобразить процесс и провести его имитационное моделирование для выявления уязвимых мест. К одной из таких нотаций можно отнести BPMN. С целью повышения производительности процесса дефектации распределительных валов создали две модели в нотации BPMN: равномерное распределение по операциям вероятности обнаружения брака и неравномерное распределение вероятности в соответствии со статистикой. Имитационное моделирование процесса дефектации 100 распределительных валов двигателя ЯМЗ-236, построенного в нотации BPMN, проводилось в программе Business Studio. В реальном процессе контроль параметров 100 валов осуществлялся в условиях специализированного ремонтного предприятия АБ-Инжиниринг универсальными и специализированными средствами измерений. В результате сравнения реального процесса и его модели более близкие результаты получены при неравномерном распределении, что было учтено при оптимизации. Оптимизация процесса входного контроля производилась исходя из процента выбракованных изделий и продолжительности операции. Затрачиваемое время на процесс дефектации после оптимизации сократилось в 1,35 раза, расхождение между моделью и реальными данными процесса не превысило 5%, что говорит о правильном подходе к моделированию процессов, связанных с высокой степенью неопределенности.

Ключевые слова: вал; дефектация; процесс дефектации; контроль; оптимизация процесса входного контроля; имитационное моделирование; неравномерное распределение; равномерное распределение

Для цитирования: Голиницкий П.В., Антонова У.Ю., Черкасова Э.И., Самордин А.Н., Пупкова Д.А. Оптимизация процесса входного контроля распределительных валов при помощи имитационного моделирования // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 3. С. 81-89. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-81-89>

ORIGINAL ARTICLE

Optimization of the incoming inspection of camshafts using simulation modeling

P.V. Golitskiy¹✉, U.Yu. Antonova², E.I. Cherkasova³, A.N. Samordin⁴, D.A. Pupkova⁵

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

¹ gpv@rgau-msha.ru✉; <https://orcid.org/0000-0001-7303-1658>

² uantonova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0126-3550>

³ e.cherkasova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2495-2028>

⁴ metr@rgau-msha.ru

⁵ bogolyubova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0273-2796>

Abstract. According to research, up to 35% of camshafts are rejected as unrepairable, of which 50% are due to wear of cams (2/3) and bearing journals (1/3). The remaining defects are distributed relatively evenly. These statistics are collected based on the processing of a large data set and may not correspond to a particular enterprise, so it is not possible to make a universal model. Notations can graphically represent the process and provide its simulation

modelling to identify vulnerabilities. A typical example of notations of BPMN. In order to increase the productivity of the camshaft fault inspection, the authors have made two models in the BPMN notation: uniform distribution of probability of defect detection by operations and non-uniform distribution of probability, according to statistics. Simulation modelling of the fault inspection of 100 camshafts of the YaMZ-236 engine built in the BPMN notation was carried out in the Business Studio software. In the real process, the parameters of 100 shafts were controlled in the conditions of the specialized repair enterprise AB-Engineering by universal and specialized measuring instruments. After comparing the real process and its model, closer results were obtained with non-uniform distribution, which was taken into account during the optimization. The input inspection procedure was optimized based on the percentage of rejected products and the operation duration. The time spent on fault inspection after optimization was reduced in 1.35 times, the discrepancy between the model and the real process data did not exceed 5%, which indicates a correct approach to modelling processes associated with a high degree of uncertainty.

Keywords: shaft; fault inspection; fault inspection procedure; inspection; input inspection optimization; simulation modelling; non-uniform distribution; uniform distribution

For citation: Golinitzkiy P.V., Antonova U.Yu., Cherkasova E.I., Samordin A.N. Optimization of the incoming inspection of camshafts using simulation modeling. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(3):81-89 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-81-89>

Введение

Входной контроль при ремонте двигателя позволяет определить возможные дефекты и оценить результат [1]. Дефектация позволяет определить возможность дальнейшего использования или проведения восстановления изношенных деталей [2]. Особую роль при дефектации играет метрологическое обеспечение, позволяющие установить годность деталей [3, 4]. Дефектация является одним из ключевых процессов на производстве. В случае неправильного решения могут возрасти как процент бракованных изделий, так и затрачиваемое время, что приводит к росту экономических потерь. Для сокращения затрачиваемого времени необходимо проводить оптимизацию процесса. Имитационное моделирование позволяет до внедрения оптимизированного процесса оценить его эффективность.

Для предотвращения негативных последствий оптимизации можно использовать нотации, позволяющие графически отобразить процесс и провести его имитационное моделирование для выявления уязвимых мест [5, 6]. Поддерживать двухстороннюю связь с реальным процессом, собирать данные в автоматизированном режиме и быстро внедрять оптимизированный процесс позволяют программные продукты BPMN (Business Process Model and Notation) и EPC (Event-Driven Process Chain) [7, 8].

Нотация BPMN на текущий момент насчитывает 5 поколений, последняя версия 2.0.2 выпущена в 2014 г. В стандарте ISO/IEC19510 закреплена версия BPMN2.0.1. Помимо элементов, необходимых для описания процессов, BPMN содержит математическое ядро и автоматизированное описание в формате XPDЛ, позволяющие передавать модель в неизменном

виде между различными видами программного обеспечения [9].

Отличительной особенностью BPMN является возможность расположения дорожек как вертикально, так и горизонтально. Важную роль при построении модели играет верификация, то есть соответствие описанного процесса реальному [10].

Проведение имитационного моделирования для машиностроительного производства не представляет больших трудностей, поскольку процессы зачастую стабильны, что позволяет с высокой точностью прогнозировать результат, но на ремонтном предприятии высока степень неопределенности, особенно при дефектации изношенных деталей.

Согласно исследованиям до 35% распределительных валов выбраковываются во время дефектации как не подлежащие ремонту, из них 50% – по причине износа кулачков (2/3) и опорных шеек (1/3) [11]. Остальные дефекты распределены относительно равномерно. Данная статистика собрана на основе обработки большого массива данных и может не соответствовать конкретному предприятию, поэтому создание однозначной модели не представляется возможным. Для решения данной проблемы воспользуемся нотацией BPMN.

Цель исследований: повышение производительности процесса дефектации распределительных валов с помощью имитационного моделирования.

Материалы и методы

Имитационное моделирование процесса дефектации распределительного вала двигателя ЯМЗ-236, построенного в нотации BPMN, проводилось в программе Business Studio согласно базовому процессу, представленному на рисунке 1.

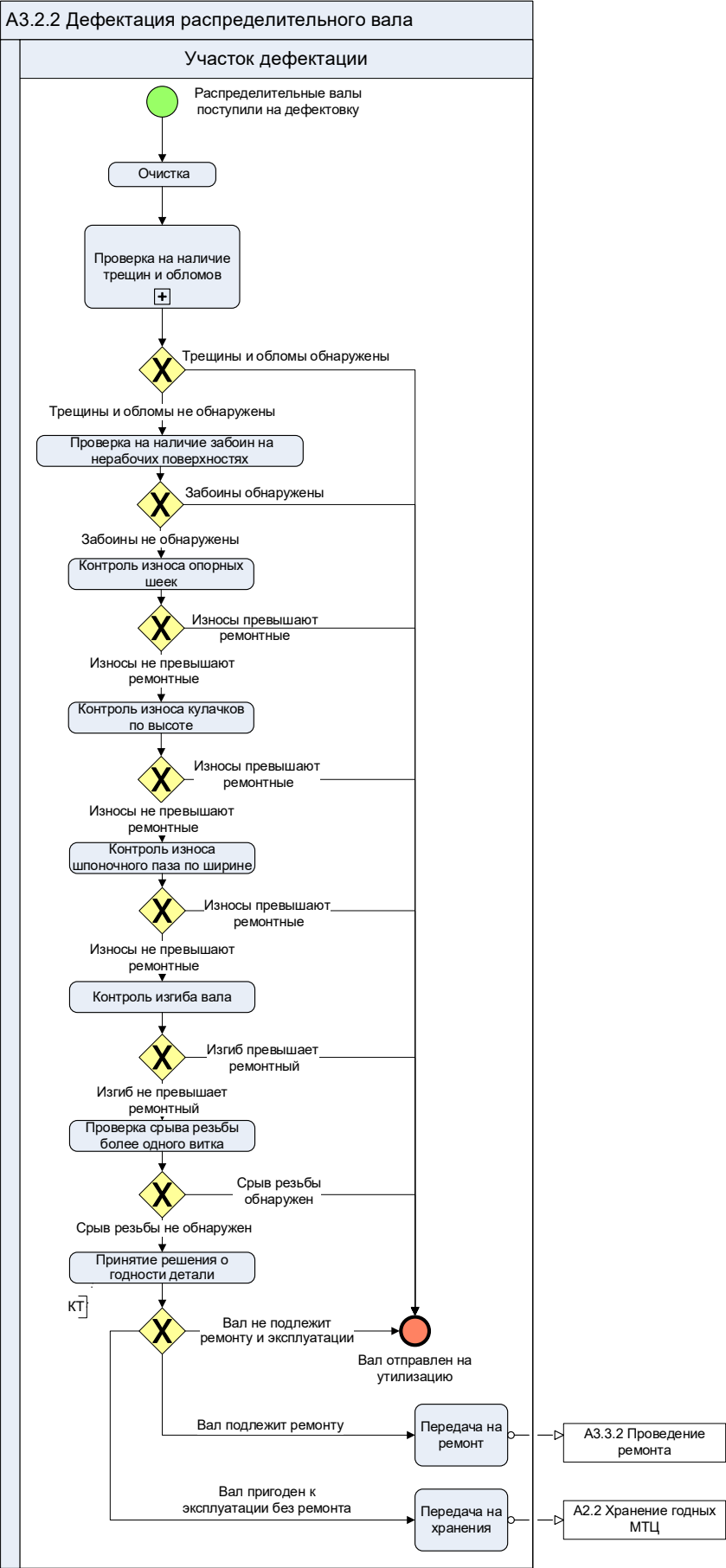


Рис. 1. Процесс дефектации распределительного вала двигателя ЯМЗ-236
Fig. 1. Fault inspection of the camshaft of the YaMZ-236 engine

Фактическое время проведения операций контроля при дефектации распределительного вала представлено в таблице 1.

Контроль параметров 100 валов осуществлялся в условиях специализированного ремонтного предприятия (АБ-Инжиниринг) универсальными и специализированными средствами измерений: микрометр Dasqua 4230-2005 для опорных шеек; штангенциркуль Dasqua 2000-2005 для кулачков; индикатор Dasqua 5260-3705 для контроля изгиба; калибр для шпоночного паза.

Результаты и их обсуждение

В нотации BPMN создали две модели, описывающие равномерное распределение по операциям вероятности обнаружения брака и неравномерное распределение вероятности в соответствии со статистикой.

Для получения более объективных результатов ввели следующие ограничения: количество проверенных валов равно целому числу; на проверку поступило 100 валов; суммарно отправлено на ремонт и в утилизацию 100 валов; процент брака стремится к 35%; вероятность обнаружения дефекта снижается по мере прохождения операций.

Результаты моделирования дефектации при равномерном и неравномерном распределении

дефектов распределительных валов представлены в таблице 2.

В результате проведенного моделирования определили, что дефектация 100 валов осуществляется быстрее при равномерном распределении дефектов (рис. 2).

При неравномерном распределении получены результаты, более близкие к реальному процессу. Оптимизация процесса входного контроля производилась исходя из процента выбракованных изделий и продолжительности операции.

Оптимизированный процесс дефектации распределительного вала представлен на рисунке 3.

Время, затраченное на операции контроля при дефектации 100 валов в моделированном и реальном процессах, отражено на рисунке 4.

Результаты моделирования оптимизированного процесса при равномерном и неравномерном распределении дефектов распределительных валов приведены в таблице 3.

Процесс дефектации после оптимизации на основе процессной модели ускорился в 1,35 раза. Расхождение между моделью и реальными данными процесса не превысило 5%, что говорит о правильном подходе к моделированию процессов, связанных с высокой степенью неопределенности.

Таблица 1

Фактическое время проведения операций контроля при дефектации распределительного вала двигателя ЯМЗ-236

Table 1

Actual time of control operations during camshaft inspection

Вид контроля <i>Type of control</i>	Время проведения, с <i>Time spent on the operation, s</i>
Проверка на наличие трещин и обломов <i>Checking for cracks and breaks</i>	173
Проверка на наличие забоин на нерабочих поверхностях <i>Checking for nicks on non-working surfaces</i>	162
Контроль износа опорных шеек / <i>Checking the wear of bearing journals</i>	23
Контроль износа кулачков по высоте / <i>Control of cam wear by height</i>	9
Контроль износа шпоночного паза по ширине <i>Control of keyway wear across the width</i>	3
Контроль изгиба вала / <i>Shaft bending control</i>	36
Проверка срыва резьбы более одного витка <i>Checking for thread stripping of more than one turn</i>	3
Всего / <i>Total</i>	409

Таблица 2

Результаты моделирования дефектации распределительных валов двигателя ЯМЗ-236

Table 2

Results of fault inspection modeling in the camshafts of the YaMZ-236 engine

Вид контроля Type of control	При равномерном распределении дефектов распределительных валов <i>In case of uniform distribution of camshaft defects</i>			При неравномерном распределении дефектов распределительных валов <i>In case of non-uniform distribution of camshaft defects</i>		
	Количество проверенных валов <i>Number of shafts tested</i>	Количество забракованных валов <i>Number of rejected shafts</i>	Затраченное время, с <i>Time spent, s</i>	Количество проверенных валов <i>Number of shafts tested</i>	Количество забракованных валов <i>Number of rejected shafts</i>	Затраченное время, с <i>Time spent, s</i>
Проверка на наличие трещин и обломов <i>Checking for cracks and breaks</i>	100	8	17300	100	4	17300
Проверка на наличие забоин на нерабочих поверхностях <i>Checking for nicks on non-working surfaces</i>	92	6	14904	96	4	15552
Контроль износа опорных шеек <i>Checking the wear of bearing journals</i>	86	5	1978	92	6	2116
Контроль износа кулачков по высоте <i>Control of cam wear by height</i>	81	5	729	86	12	774
Контроль износа шпоночного паза по ширине <i>Control of keyway wear across the width</i>	76	4	228	74	4	222
Контроль изгиба вала <i>Shaft bending control</i>	72	4	2592	70	3	2520
Проверка срыва резьбы более одного витка <i>Checking for thread stripping of more than one turn</i>	67	3	201	67	2	201
Брак, % / Faults, %	35			35		
Время дефектации 100 валов, с <i>Fault inspection time for 100 shafts, s</i>	37932			38685		

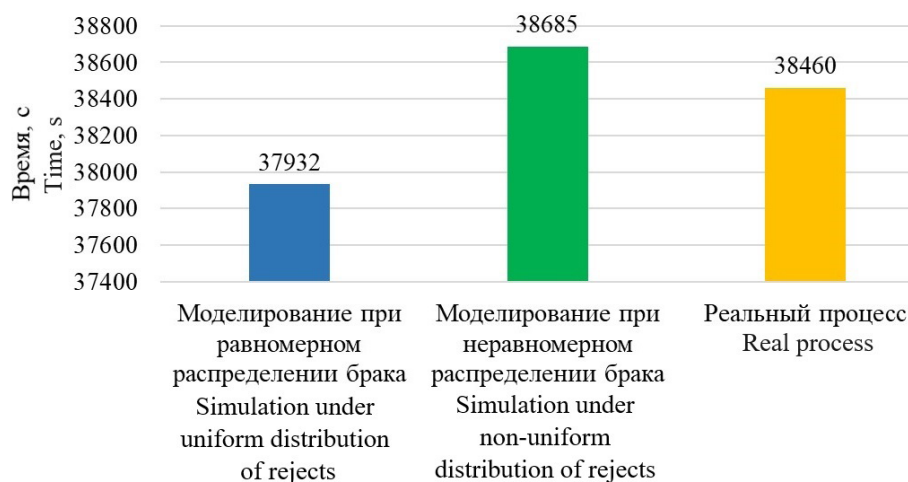


Рис. 2. Сравнение времени дефектации 100 валов

Fig. 2. Comparing fault inspection time of 100 shafts

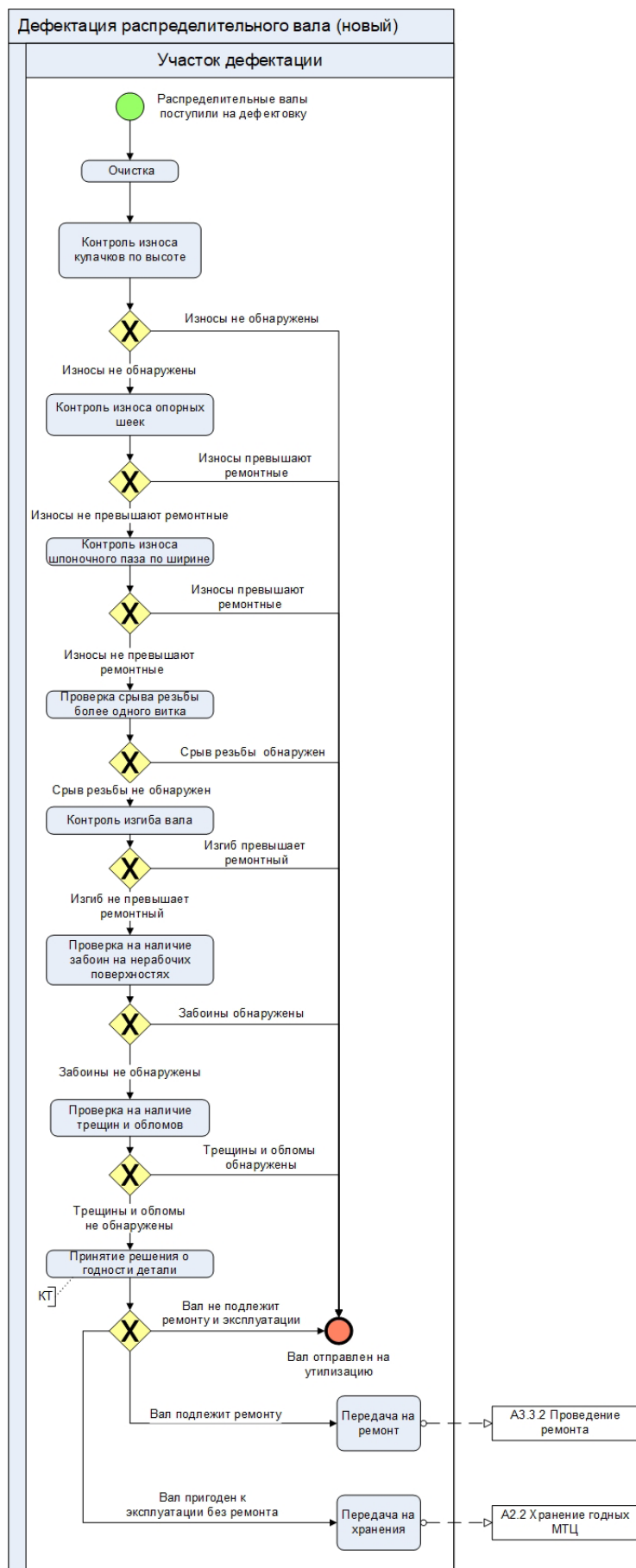


Рис. 3. Оптимизированный процесс дефектации распределительного вала двигателя ЯМЗ-236

Fig. 3. Optimized process of fault inspection of the camshaft of the YaMZ-236 engine

Таблица 3

Результаты моделирования оптимизированного процесса при равномерном и неравномерном распределении дефектов распределительных валов двигателя ЯМЗ-236

Table 3

Results of modeling the optimized process with uniform distribution of faults in the camshafts of the YaMZ-236 engine

Вид контроля <i>Type of control</i>	При равномерном распределении дефектов распределительных валов <i>With uniform distribution of camshaft defects</i>			При неравномерном распределении дефектов распределительных валов <i>In case of uneven distribution of camshaft defects</i>		
	Количество проверенных валов <i>Number of shafts tested</i>	Количество забракованных валов <i>Number of rejected shafts</i>	Затраченное время, с <i>Time spent, s</i>	Количество проверенных валов <i>Number of shafts tested</i>	Количество забракованных валов <i>Number of rejected shafts</i>	Затраченное время, с <i>Time spent, s</i>
Контроль износа кулачков по высоте <i>Control of cam wear by height</i>	100	8	900	100	12	900
Контроль износа опорных шеек <i>Checking the wear of bearing journals</i>	92	6	2116	88	7	2024
Контроль износа шпоночного паза по ширине <i>Control of keyway wear across the width</i>	86	5	258	81	6	243
Проверка срыва резьбы более одного витка <i>Checking for thread stripping of more than one turn</i>	81	5	243	75	3	225
Контроль изгиба вала <i>Shaft bending control</i>	76	4	2736	72	3	2592
Проверка на наличие забоин на нерабочих поверхностях <i>Checking for nicks on non-working surfaces</i>	72	4	11664	69	3	11178
Проверка на наличие трещин и обломов <i>Checking for cracks and breaks</i>	67	3	11591	66	1	11418
Брак, % / Faults, %	35			35		
Время дефектации 100 валов, с <i>Fault inspection time for 100 shafts, s</i>	29508			28580		

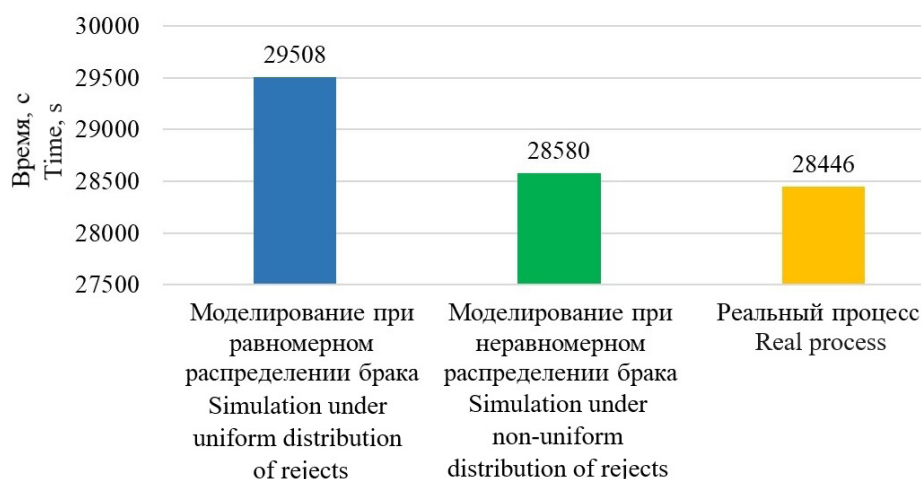


Рис. 4. Сравнение времени оптимизированного процесса дефектации

Fig. 4. Comparing the time requirements of optimized fault inspection

Выводы

Для процесса дефектации распределительного вала наиболее эффективным является неравномерное

распределение на основе больших данных, которое позволило с погрешностью не более 5% провести оптимизацию процесса, сократив затрачиваемое время в 1,35 раза.

Список источников

1. Shkaruba N.Z., Leonov O.A. Permissible measurement error in monitoring the shape and position of surfaces. *Russian Engineering Research*. 2021;41(3):211-214. <https://doi.org/10.3103/S1068798X21030175>
2. Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Вергазова Ю.Г. Дефектация валов и шестерен с позиции обеспечения качества соединений при ремонте редукторов сельхозмашин // *Агроинженерия*. 2022. Т. 24, № 4. С. 48-52. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-4-48-52>
3. 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. EDN: WJHSVG
4. Leonov O.A., Shkaruba N.Z. Normalization of the indirect measurement errors of acceptance engine tests. *Measurement Techniques*. 2022;65:564-568. <https://doi.org/10.1007/s11018-023-02121-z>
5. Kheifetz M.L. Design of mechatronic engineering systems in digitalized traditional and additive manufacturing. *Journal of Advanced Materials and Technologies*. 2021;6(1):18-29. <https://doi.org/10.17277/jamt.2021.01.pp.018-029>
6. Шендрикова О.О., Елфимова И.Ф. Исследование процессов цифровизации промышленных предприятий // *Организатор производства*. 2019. Т. 27, № 1. С. 16-24. <https://doi.org/10.25987/VSTU.2019.88.65.002>
7. Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Гринченко Л.А., Пупкова Д.А. Создание цифровой модели процесса комплектации и сборки для ремонтного производства // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование*. 2023. № 2 (70). С. 458-466. EDN: YIHLXR
8. Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Вергазова Ю.Г., Гринченко Л.А. Цифровая модель процесса комплектации и сборки при ремонте двигателей // *Сельский механизатор*. 2024. № 5. С. 39-40. EDN: CUUAJP
9. Голиницкий П.В., Антонова У.Ю., Гринченко Л.А., Видникович С.Ю. Применение цифровых инструментов для совершенствования производственного процесса // *Компетентность*. 2023. № 5. С. 32-37. EDN: CHXXCZ
10. Бондарева Г.И., Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж. и др. Разработка алгоритма верификации запасных частей при ремонте машин // *Сельский механизатор*. 2022. № 10. С. 27-29. EDN: EFMNHY
11. Хасанов Р.Х. Прогнозирование ресурса составных частей автомобильных двигателей // *Прогрессивные технологии в транспортных системах: Сборник докладов VII Российской научно-практической конференции, Оренбург, 1-2 декабря 2005 г. Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2005. С. 333-337. EDN: TMFNOV*

References

1. Shkaruba N.Z., Leonov O.A. Permissible measurement error in monitoring the shape and position of surfaces. *Russian Engineering Research*. 2021;41(3):211-214. <https://doi.org/10.3103/S1068798X21030175>
2. Leonov O.A., Shkaruba N.Zh., Vergazova Yu.G. Fault inspection of shafts and gears while repairing farm machinery reduction mechanisms to assure the quality of connections. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2022;24(4):48-52. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-4-48-52>
3. Shkaruba N.Z., Leonov O.A. Substantiation of the allowable measurement error when controlling deviations of the shape and location of the surfaces of parts. *Vestnik Mashinostroyeniya*. 2020;12:42-45. (In Russ.)
4. Leonov O.A., Shkaruba N.Z. Normalization of the indirect measurement errors of acceptance engine tests. *Measurement Techniques*. 2022;65:564-568. <https://doi.org/10.1007/s11018-023-02121-z>
5. Kheifetz M.L. Design of mechatronic engineering systems in digitalized traditional and additive manufacturing. *Journal of Advanced Materials and Technologies*. 2021;6(1):18-29. <https://doi.org/10.17277/jamt.2021.01.pp.018-029>
6. Shendrikova O.O., Elfimova I.F. The study of processes related to digitalization of industrial enterprises. *Organizator proizvodstva = Organizer of Production*. 2019;27(1):16-24. <https://doi.org/10.25987/VSTU.2019.88.65.002> (In Russ.)
7. Leonov O.A., Shkaruba N.Zh., Grinchenko L.A., Pupkova D.A. Creating a digital process model packages and assembly for repair production. *Proceedings of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education*. 2023;2(70):458-466. (In Russ.)
8. Leonov O.A., Shkaruba N.Zh., Vergazova Yu.G., Grinchenko L.A. Digital model of the process of packaging and assembly during engine repair. *Selskiy mekhanizator*. 2024;5:39-40. (In Russ.)
9. Golinitzkiy P.V., Antonova U.Yu., Grinchenko L.A., Vidnikovich S.Yu. Digital tools to improve the manufacturing process. *Competency (Russia)*. 2023;5:32-37. (In Russ.)
10. Bondareva G.I., Leonov O.A., Shkaruba N.Zh., Vergazova Yu.G., Tamasova G.N. Development of an algorithm for the verification of spare parts during the repair of machines. *Selskiy mekhanizator*. 2022;10:27-29. (In Russ.)
11. Khasanov R.Kh. Forecasting the service life of automobile engine components. *Progressive Technologies in Transport Systems: Proceedings of the VII Russian scientific and practical conference, Orenburg, December 1-2, 2005. Orenburg: Orenburg State University, 2005. P. 333-337. (In Russ.)*

Информация об авторах

¹ **Голиницкий Павел Вячеславович**, канд. техн. наук, доцент;
gpv@rgau-msha.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0001-7303-1658>;
SPIN-код: 2323-0797, AuthorID: 784381

² **Антонова Ульяна Юрьевна**, канд. техн. наук, доцент;
uantonova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0126-3550>;
SPIN-код: 5691-6381, AuthorID: 889756

³ **Черкасова Эльмира Исламовна**, канд. с.-х. наук, доцент;
e.cherkasova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2495-2028>;
SPIN-код: 5691-6381, AuthorID: 889756

⁴ **Самордин Андрей Николаевич**, соискатель ученой степени кандидата наук; metr@rgau-msha.ru; SPIN-код: 4839-2231, AuthorID: 758456

⁵ **Пупкова Дарья Александровна**, канд. техн. наук,
bogolyubova@rgau-msha.ru; SPIN-код: 4290-2003;
AuthorID: 1114336; <https://orcid.org/0000-0002-0273-2796>

^{1, 2, 3, 4, 5} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Вклад авторов

П.В. Голиницкий – методология, концептуализация;
У.Ю. Антонова – обзор литературы, визуализация, создание черновика рукописи;

Э.И. Черкасова – информационные ресурсы и аналитика, создание окончательной версии рукописи и ее редактирование;

А.Н. Самордин – программное обеспечение;

Д.А. Пупкова – обзор литературы.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 23.01.2025, после рецензирования и доработки 04.04.2025; принята к публикации 08.04.2025

Author Information

Pavel V. Golitskiy^{1✉}, CSc (Eng), Associate Professor;
gpv@rgau-msha.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0001-7303-1658>;
Scopus Autor ID: 57216809753;
Researcher ID: AAD-6305-2022

Uliana Yu. Antonova², CSc (Eng), Associate Professor;
uantonova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0126-3550>;
Scopus Autor ID: 57216809631;
Researcher ID: AAD-5690-2022

Elmira I. Cherkasova³, CSc (Ag), Associate Professor;
e.cherkasova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2495-2028>;
Scopus Autor ID: 57216812784;
Researcher ID: AAD-5493-2022

Andrey N. Samordin⁴, CSc degree seeker; metr@rgau-msha.ru

Daria A. Pupkova⁵, CSc (Eng); bogolyubova@rgau-msha.ru;
<https://orcid.org/0000-0002-0273-2796>

^{1, 2, 3, 4, 5} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 127434, Russian Federation, Moscow, Timiryazevskaya Str., 49

Authors Contribution

P.V. Golitskiy – methodology, conceptualization;

U.Yu. Antonova – literature review, visualization, writing – original draft;

E.I. Cherkasova – information resource and analytics, writing – manuscript review and editing;

A.N. Samordin – software;

D.A. Pupkova – literature review.

Conflict of interests

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

Received 23.01.2025; Revised 04.04.2025; Accepted 08.04.2025