

## АГРОИНЖЕНЕРИЯ

### 4.3.2. Электротехнологии, электрооборудование и энергоснабжение агропромышленного комплекса

Научная статья  
УДК 621.313  
doi: 10.28983/asj.y2024i12pp149-155

#### Уровни варьирования факторов для испытания на надежность генераторов мобильной техники по обслуживанию системы сельского водоснабжения

Владимир Андреевич Буторин<sup>1</sup>, Анастасия Асхатовна Тлеуова<sup>2</sup>, Руслан Тофикович Гусейнов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Южно-Уральский государственный аграрный университет, г. Челябинск, Россия

<sup>2</sup>Казахский агротехнический университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, Республика Казахстан

e-mail: butorin\_chgau@list.ru

**Аннотация.** Важнейшим звеном мобильной техники для обслуживания системы водоснабжения сельского хозяйства являются автомобили. Статистические исследования показали, что 25 % отказов автомобилей связано с неисправностями электрооборудования, значительная доля которых приходится на контактно-щеточные узлы генераторов. Для разработки мероприятий по повышению надежности контактно-щеточных узлов генераторов необходимо проведение стендовых испытаний на долговечность. При этом важнейшим звеном являются уровни варьирования факторов, воздействующих на надежность. В исследовании установлены факторы, главным образом влияющие на работоспособность контактно-щеточных узлов генераторов. На основании статистических сведений и экспериментальных исследований, для данных факторов установлены законы и параметры распределения, которые позволили выбрать уровни воздействующих факторов при многофакторном планировании испытаний контактно-щеточных узлов генераторов на надежность.

**Ключевые слова:** контактно-щеточный узел; биение контактных колец; распределение отказов; уровни варьирования факторов

**Для цитирования:** Буторин В. А., Тлеуова А. А., Гусейнов Р. Т. Уровни варьирования факторов для испытания на надежность генераторов мобильной техники по обслуживанию системы сельского водоснабжения // Аграрный научный журнал. 2024. № 12. С. 149–155. <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2024i12pp149-155>.

## AGRICULTURAL ENGINEERING

Original article

#### Levels of variation of factors for testing the reliability of generators of mobile equipment for the maintenance of rural water supply systems

Vladimir A. Butorin<sup>1</sup>, Anastasia A. Tleuova<sup>2</sup>, Ruslan T. Guseynov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>South Ural State Agrarian University, Chelyabinsk, Russia

<sup>2</sup>S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Republic of Kazakhstan

e-mail: butorin\_chgau@list.ru

**Abstract.** The most important element of mobile equipment for servicing the agricultural water supply system is motor vehicles. Statistical studies have shown that 25 % of vehicle failures are related to electrical equipment failures, a significant portion of which is the contact brush assemblies of generators. To develop measures to improve the reliability of the contact brush assemblies of generators, it is necessary to conduct bench tests for durability. The most important link is the levels of variation of factors affecting reliability. In this regard, factors have been identified, mainly affecting the operability of the contact brush assemblies of generators. Based on statistical data and experimental studies, laws and distribution parameters were established for these factors, which made it possible to select the levels of influencing factors during multifactorial planning of tests of contact brush assemblies of generators for reliability.





**Keywords:** contact brush assembly; runout of contact rings; distribution of failures; levels of variation of factors

**For citation:** Butorin V. A., Tleuova A. A., Huseynov R. T. Levels of variation of factors for testing the reliability of generators of mobile equipment for the maintenance of rural water supply system. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agrarian Scientific Journal*. 2024;(12):149–155. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2024i12pp149-155>.

**Введение.** Важнейшей составляющей в мобильной лаборатории по обслуживанию системы сельского водоснабжения являются автомобили. Анализ эксплуатации автомобильного парка в условиях сельского хозяйства показывает, что до 25 % от общего числа автомобилей выходит из строя из-за отказов электрооборудования. Из этого количества до 50 % отказов связано с неисправностями системы электропитания [3].

Генератор при работающем двигателе автомобиля является главным источником поступающей электрической энергии для его электроснабжения и подзарядки аккумуляторов. В таблице 1 представлены результаты исследования видов отказов автомобильных генераторов и доля издержек на их устранение в общем объеме затрат на восстановление генераторов сельскохозяйственных предприятий Челябинской области [2]. Из таблицы 1 следует, что наибольшие относительные издержки (0,32) в общих затратах на устранение отказов и наибольшая доля (0,39) в общем числе отказов связаны с восстановлением работоспособности контактно-щеточных узлов генераторов [2].

**Таблица 1 – Распределение видов отказов и относительных издержек на их устранение**

**Table 1 – Distribution of types of failures and relative costs of their elimination**

Название узла генератора	Число отказов	Доля отказов	Относительные издержки на ремонт
Обмотка статора	0/20	0,10	0,24
Обмотка возбуждения	0/5	0,03	0,05
Подшипниковый узел	31/28	0,33	0,29
Выпрямительный блок	8/6	0,08	0,08
Контактно-щеточный узел	53/17	0,39	0,32
Дефекты механические	3/9	0,07	0,02
Результат	95/85	1	1

В колонке «число отказов» числитель отношения показывает количество вышедших из строя узлов генератора, восстановленных путем проведения текущего ремонта, знаменатель – количество вышедших из строя узлов генератора, восстановленных путем проведения капитального ремонта.

Для оценки мероприятий, направленных на повышение надежности наиболее «слабого звена» генератора, необходимы сведения о факторах, определяющих его работоспособность.

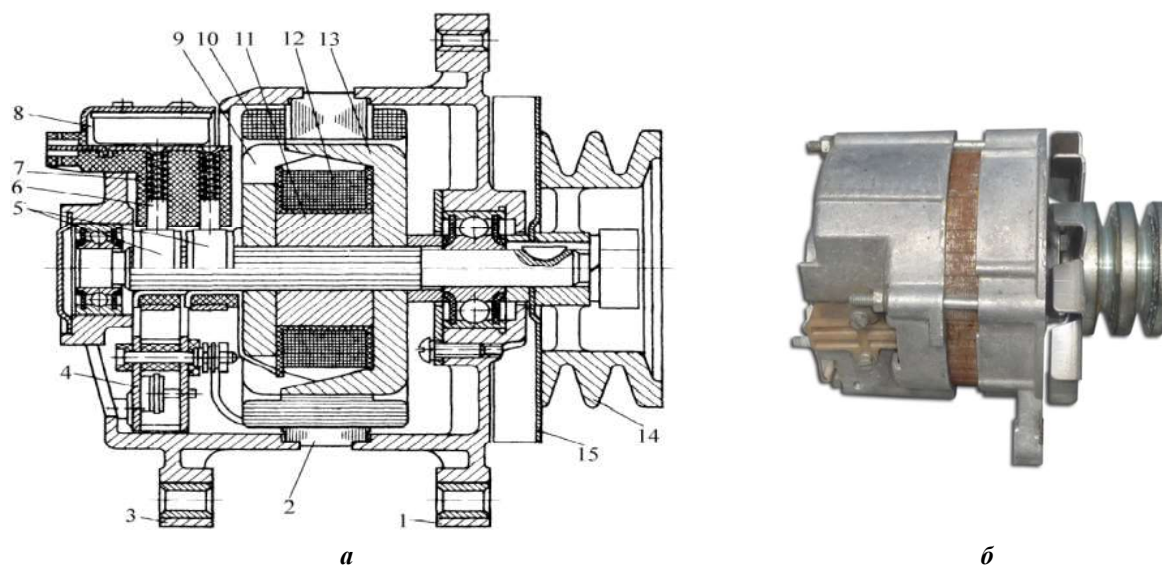
Цель исследования – выявить факторы, влияющие на работоспособность генераторов автомобилей мобильных лабораторий по обслуживанию системы водонасосных установок, определить их законы распределения, на основании которых установить уровни их воздействия при испытании генераторов на надежность.

**Материалы и методы.** Используемые методы базировались на сведениях о причинах и видах отказов генераторов, предоставленных специалистами ремонтно-обслуживающих организаций, на статистических сведениях о распределениях частоты вращения вала двигателя и запыленности воздуха при эксплуатации автомобиля, на экспериментальных данных величины биения контактных колец и величины электрической нагрузки генераторов. Для доказательства соответствия экспериментальных данных теоретическому распределению использовался критерий согласия Пирсона  $\chi^2$ .

**Результаты исследований.** Экспериментальные исследования проводились на генераторах Г250, используемых на автомобилях марок ГАЗ и УАЗ для мобильных лабораторий системы сельского водоснабжения. Конструктивная схема и общий вид рассматриваемого генератора представлены на рисунке 1.

Данные таблицы 1 показывают, что наиболее слабым звеном генератора является контактно-щеточный узел, включающий в себя щетки и контактные кольца 9 (см. рисунок 1). Щетки легко

меняются при техническом обслуживании и текущем ремонте, замена контактных колец является трудоемкой операцией, которая производится при капитальном ремонте генератора [6, 9]. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать факторы, влияющие на надежность контактных колец генератора.



**Рисунок 1 – Конструктивная схема (а) и общий вид (б) генератора Г250:**  
 1, 3 – передняя и задняя крышки; 2 – магнитопровод статора; 4 – выпрямительный узел;  
 5 – кольца; 6 – щетки; 7 – щеточный узел; 8 – регулятор напряжения;  
 9, 13 – клювообразные полюсные половины ротора; 10, 12 – обмотки статора и возбуждения;  
 11 – втулка; 14 – шкив; 15 – крыльчатка вентилятора

**Figure 1 – Design diagram (a) and general view (b) of the G250 generator:**  
 1,3 – front and rear covers; 2 – stator magnetic circuit; 4 – rectifier assembly; 5 – rings;  
 6 – brushes; 7 – brush assembly; 8 – voltage regulator; 9, 13 – claw tooth rotor;  
 10, 12 – stator and excitation windings;  
 11 – bushing; 14 – pulley; 15 – fan impeller

Из большого количества факторов, влияющих на износ контактных колец, выбраны основные. К этим факторам относятся запыленность окружающей среды, частота вращения ротора, ток нагрузки и биение ротора [4].

При обследовании условий эксплуатации автомобиля ГАЗ-3307 в сельском хозяйстве установлено, что распределения частоты вращений генератора и запыленности окружающей среды подчиняются нормальному закону [4], при этом распределение частоты вращения генератора  $\text{мин}^{-1}$  имеет вид

$$f(n) = 0,56 \exp[-0,99(n - 2,9)^2], \quad (1)$$

где  $n$  – частота вращения генератора,  $\text{мин}^{-1}$ .

Статистические характеристики распределения (1) имеют следующие значения:

$$\bar{n} = 2900 \text{ мин}^{-1}; \sigma_n = 712 \text{ мин}^{-1}.$$

Запыленность воздуха окружающей среды,  $\text{м}^3/\text{г}$ , при эксплуатации автомобилей в условиях сельскохозяйственного производства удовлетворительно согласуется с нормальным распределением [8], которое описывается выражением

$$f(c) = 0,443 \exp[-0,617(c - 1,92)^2], \quad (2)$$

где  $c$  – запыленность воздуха,  $\text{г}/\text{м}^3$ .

Статистические характеристики распределения (2) имеют следующие значения:

$$\bar{c} = 1,92 \text{ г}/\text{м}^3; \sigma_c = 0,90 \text{ г}/\text{м}^3.$$

Для установления статистических характеристик нагрузки генератора автомобиля в условиях сельского хозяйства рассмотрено шесть основных режимов его работы: 1) лето – освещение отключено; 2) лето – включен ближний свет; 3) лето – включен дальний свет; 4) зима – включено



освещение и выключена печка; 5) зима – включены ближний свет и печка; 6) зима – включены дальний свет и печка.

Средний ток нагрузки  $I$ , А, автомобиля [5, 7] вычисляли с помощью выражения

$$I = \sum_{i=1}^l P_i I_i, \quad (3)$$

где  $l$  – число режимов работы генераторов;  $P_i$  – вероятность применения генератора в  $i$ -м режиме работы;  $I_i$  – ток нагрузки в  $i$ -м режиме работы, А.

Испытание нагрузки генератора производилось на 44 автомобилях ГАЗ-3307 – мобильных средствах по обслуживанию системы водоснабжения сельскохозяйственных предприятий Челябинской области. Расчетное значение Пирсона  $\chi^2$ , полученное в таблице 2, подтвердило целесообразность использования усеченного экспоненциального распределения (см. рисунок 2) для описания нагрузки генераторов, поскольку  $\chi_{\text{рас}}^2 < \chi_{\text{таб}}^2$ .

Таблица 2 – Проверка гипотезы принадлежности опытного распределения нагрузки генератора усеченному экспоненциальному закону

Table 2 – Verification of the hypothesis that the experimental load distribution of the generator belongs to a truncated exponential law

Режим	Интервал нагрузки, А	$n_i$	$x_i$	$P_i$	$\tilde{n}_i$	$n_i - \tilde{n}_i$	$\frac{(n_i - \tilde{n}_i)^2}{n_i}$
1	10–15	17	12,5	0,386	14,579	2,421	0,3450
2	15–20	10	17,5	0,227	10,376	–0,376	0,0141
3	20–25	7	22,5	0,159	7,385	–0,385	0,0212
4	25–30	5	27,5	0,114	5,256	–0,256	0,0131
5	30–35	3	32,5	0,068	3,741	–0,741	0,1830
6	35–40	2	37,5	0,045	2,663	–0,663	0,2200
		44					$\chi_{\text{рас}}^2 = 0,796$

В таблице 2 значения  $n_i$  и  $\tilde{n}_i$  являются соответственно опытной и теоретической частотой нагрузки, попадающей в указанный интервал режима работы;  $x_i$  – среднее значение  $i$ -го интервала нагрузки. Из таблицы 2 следует, что  $\chi_{\text{рас}}^2 = 0,796$ . Табличное значение  $\chi_{\text{таб}}^2(0,05; 4) = 9,888$ .

Выражение плотности распределения нагрузки генераторов автомобилей для обслуживания системы водоснабжения,  $1/A$ , имеет следующий вид:

$$f(I) = 0,051 \exp[-0,051(I - 10)]. \quad (4)$$

Статистические параметры распределения нагрузки генератора:

$$\bar{I} = 19,43 \text{ А}; \sigma_I = 7,35 \text{ А}.$$

Параметр усеченного экспоненциального распределения:

$$\lambda = 0,051(\text{а}^{-1}).$$

Определение биения контактных колец генератора автомобилей ГАЗ-3307 проводили с помощью разработанного устройства [10] на партии генераторов, восстановленных на ОАО «Челябинский электромеханический завод». Конструкция устройства для измерения биения контактных колец генератора и его применение по назначению приведены на рисунке 3.

Обработка полученной информации показала, что распределение биения контактных колец согласуется с нормальным законом (см. таблицу 3, рисунок 4).

Из таблицы следует:

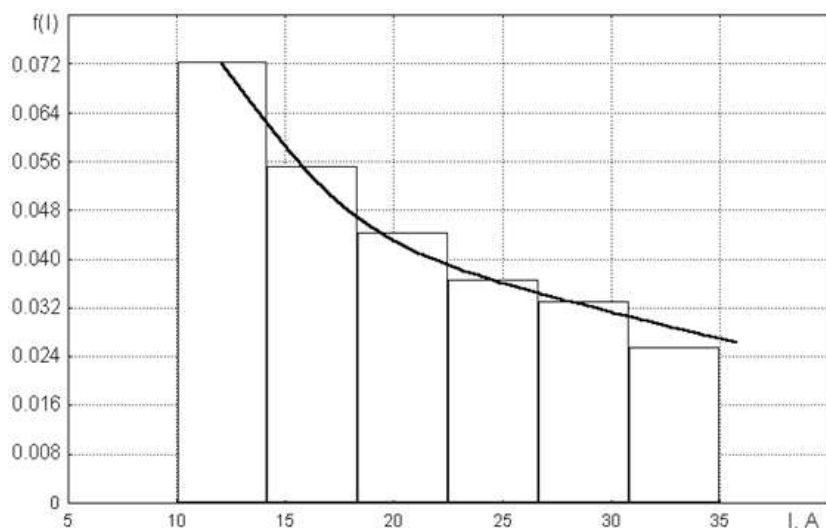
$$\chi_{\text{рас}}^2 = 4,78 < \chi_{\text{таб}}^2(0,05; 3) = 7,8.$$

Выражение плотности биения контактных колец генератора автомобилей для обслуживания системы водоснабжения,  $1/\text{мм}$ , имеет следующий вид:

$$f(B) = 42,44 \exp[-5555(B - 0,045)^2], \quad (5)$$

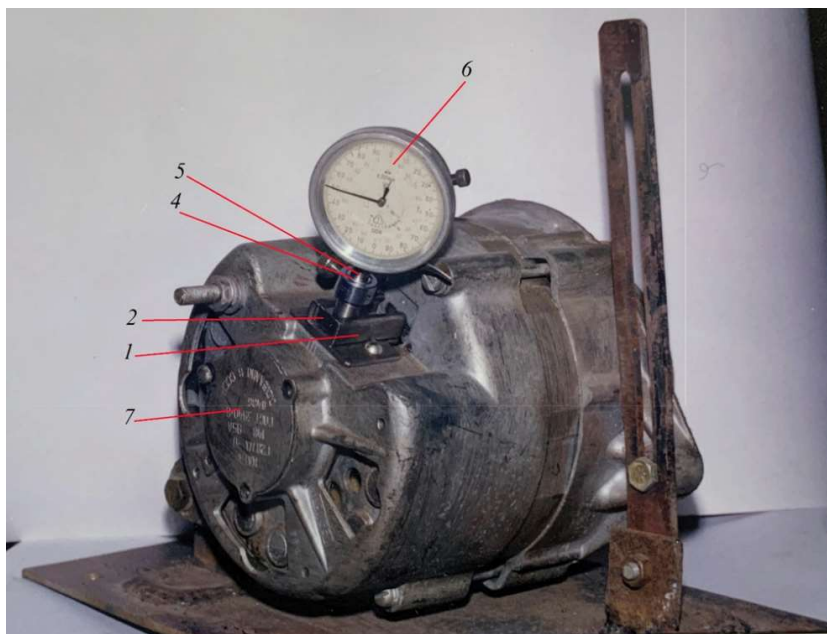
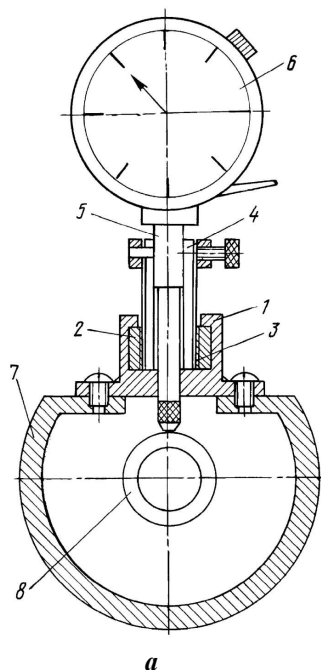
где  $B$  – биение колец генератора, мм.





**Рисунок 2 – Плотность распределения нагрузки генераторов автомобилей**

**Figure 2 – Load distribution density of vehicle generators**



**Рисунок 3 – Устройство для измерения биения контактных колец: а – конструкция; б – применение по назначению;**

**1 – корпус; 2 – винт суппорта; 3 – отверстие; 4 – втулка стопорная; 5 – неподвижный стержень; 6 – индикатор часового типа; 7 – генератор; 8 – контактное кольцо**

**Figure 3 – Device for measuring the runout of contact rings: a – design; b –intended use;**

**1 – housing; 2 – caliper screw; 3 – hole; 4 – locking sleeve; 5 – fixed rod; 6 – dial indicator; 7 – generator; 8 – contact ring**

Статистические характеристики биения контактных колец генераторов:

$$\bar{B} = 0,045 \text{ мм} ; \sigma_B = 0,0094 \text{ мм.}$$

Для реализации многофакторного эксперимента с целью оценки интенсивности изнашивания контактных колец генератора автомобилей установлены уровни варьирования факторов (см. таблицу 4), необходимых для проведения стендовых испытаний на надежность. Данные уровни брались из условия  $m \pm 2\sigma$  [1], в котором  $m$  и  $\sigma$  соответственно являются математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением воздействующих на износ факторов.



Таблица 3 – Проверка гипотезы принадлежности опытного распределения биения контактных колец генераторов к нормальному закону

Table 3 – Verification of the hypothesis that the experimental runout distribution of the contact rings of generators belongs to the normal law

Режим	Интервал, мм	$n_i$	$x_i$	$P_i$	$\tilde{n}_i$	$n_i - \tilde{n}_i$	$\frac{(n_i - \tilde{n}_i)^2}{n_i}$
1	0,020–0,028	6	0,024	0,0680	2,67	3,33	1,8480
2	0,028–0,037	9	0,032	0,1020	12,10	–3,10	1,0680
3	0,037–0,045	29	0,041	0,3290	28,30	0,70	0,0169
4	0,045–0,053	28	0,049	0,3180	28,30	–0,30	0,0032
5	0,053–0,062	11	0,057	0,1250	13,90	–2,90	0,7650
6	0,062–0,070	5	0,066	0,0568	2,67	2,33	1,0860
$\Sigma$		88					$\chi^2_{\text{рас}} = 4,787$

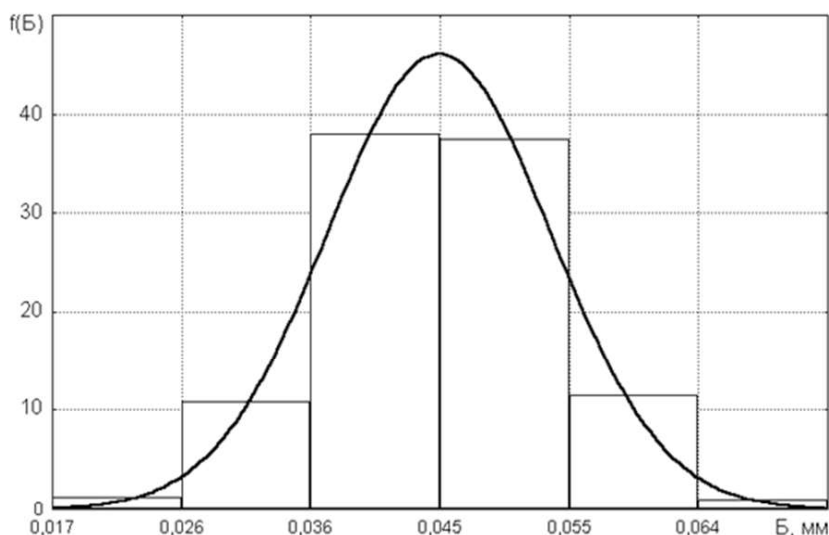


Рисунок 4 – Плотность распределения биения контактных колец генераторов автомобилей

Figure 4 – Runout distribution density of contact rings of vehicle generators

Таблица 4 – Значение уровней воздействующих факторов

Table 4 – The value of the levels of influencing factors

Условие планирования	Натуральные и кодированные значения факторов							
	Запыленность $c$ , г/м <sup>3</sup>		Частота вращения $n$ , мин <sup>-1</sup>		Ток нагрузки $I$ , А		Биение кольца $B$ , мм	
	Нат.	Код.	Нат.	Код.	Нат.	Код.	Нат.	Код.
Основной уровень	1,90	0	2973	0	25	0	0,045	0
Верхний уровень	3,71	+1	4397	+1	35	+1	0,070	+1
Нижний уровень	0,09	–1	1549	–1	15	–1	0,020	–1

**Заключение.** В условиях сельского хозяйства 15–25 % автомобилей выходит из строя вследствие отказа элементов электрооборудования, причем 45 % из этого количества приходится на систему электропитания. Наибольшие удельные затраты (0,32), связанные с устранением неисправности генераторов, приходятся на контактно-щеточный узел. В результате проведенного анализа установлено распределение эксплуатационных и ремонтно-технологического факторов, влияющих на износ контактных колец генераторов автомобилей. К данным факторам относятся: ток нагрузки, биение контактных колец, запыленность окружающей среды, частота вращения ротора. Коэффициенты вариации этих факторов: 0,378; 0,209; 0,469; 0,200 соответственно. При аппроксимации экспериментальных значений теоретическими законами уровень значимости равнялся  $\alpha = 0,05$ . Полученные значения уровней воздействующих на работоспособность контактно-щеточных узлов факторов необходимы для разработки стенда испытания на долговечность генераторов автомобилей, эксплуатирующихся в условиях сельского хозяйства.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арутюнян А. Д. Применение информационных технологий в курсе «Теория вероятностей и математическая статистика» // Вестник науки. 2023. Т. 2. № 12(69). С. 641–645. EDN HGMYYH.
2. Буторин В. А., Девятков В. Д. Изнашивание контактных колец автотракторных генераторов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2000. № 10. С. 47–48.
3. Буторин В. А., Девятков В. Д. Результаты стендовых послеремонтных испытаний на долговечность контактно-щеточных узлов автотракторных генераторов // Вестник ЧГАА. 2000. Т. 33. С. 103–106.
4. Буторин В. А., Девятков В. Д. Факторы, влияющие на надежность контактно-щеточного узла автотракторных генераторов // Вестник ЧГАУ. 1996. Т. 17. С. 101–104.
5. Гриценко А. В., Куков С. С. Диагностирование автомобильных генераторов по осциллограммам напряжения // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2010. № 2. С. 13–15.
6. Диагностирование автомобильных генераторов методом осциллографирования на стенде с имитацией неисправностей / А. В. Гриценко [и др.] // Транспорт Урала. 2016. № 4(51). С. 101–107. DOI 10.20291/1815-9400-2016-4-101-107.
7. Куков С. С., Гриценко А. В., Пеньков М. В. Диагностирование генераторов легковых автомобилей методом осциллографирования // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2016. Т. 4. № 5–4(25–4). С. 263–267.
8. Овчинникова Н. И., Быкова М. А. Определение энергозатрат механизатора при эксплуатации мобильной сельскохозяйственной техники // Актуальные вопросы аграрной науки. 2022. № 43. С. 6–12. EDN IIQNH.
9. Пузаков А. В. Прогнозирование работоспособности генераторов транспортных средств. Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2019. 332 с. ISBN 978-5-7410-2332-7. EDN OKFVCE.
10. Устройство для измерения износа и биения контактных колец автотракторных генераторов: Патент № 2163349 С1 Российская Федерация / В. А. Буторин, В. Д. Девятков; заявл. 14.12.1999; опубл. 20.02.2001. EDN KSVTDL.

## REFERENCES

1. Arutyunyan A. D. Use of information technology in course probability theory and mathematical statistics. *Vestnik Nauki*. 2023;2(12(69)):641–645. EDN HGMYYH. (In Russ.).
2. Butorin V. A., Devyatkov V. D. Wear of contact rings of tractor generators. *Traktory i Sel'hozmašiny*. 2000;(10):47–48. (In Russ.).
3. Butorin V. A., Devyatkov V. D. Results of bench post-repair tests for durability of contact brush assemblies of tractor generators. *Vestnik CSAA*. 2000;(33):103–106. (In Russ.).
4. Butorin V. A., Devyatkov V. D. Factors affecting the reliability of the contact brush assembly of tractor generators. *Vestnik CSAU*. 1996;(17):101–104. (In Russ.).
5. Gritsenko A. V., Kukov S. S. Diagnostics of automobile generators by voltage oscillograms. *Mechanization and Electrification of Agriculture*. 2010;(2):13–15. (In Russ.).
6. Diagnosing automobile generators by oscillography on a testbed with imitation of failures / A. V. Gritsenko, S. S. Kukov, O. N. Larin, K. V. Glemba. *Transport of the Urals*. 2016;4(51):101–107. DOI 10.20291/1815-9400-2016-4-101-107. (In Russ.).
7. Kukov S. S., Gritsenko A. V., Penkov M. V. Diagnostics of generators of passenger cars by the method of oscillography. *Aktual'nye Napravleniâ Naučnyh Issledovanij XXI Veka: Teoriâ i Praktika*. 2016;4(5–4(25–4)):263–267. (In Russ.).
8. Ovchinnikova N. I., Bykova M. A. Determination of the power consumption of a machine operator during the operation of mobile agricultural machinery. *Actual Issues of Agrarian Science*. 2022;(43):6–12. EDN IIQNH. (In Russ.).
9. Puzakov A. V. Forecasting the operability of generators of vehicles. Orenburg: Orenburg State University, 2019. 332 p. ISBN 978-5-7410-2332-7. EDN OKFVCE. (In Russ.).
10. Gear measuring wear and beats of contact rings of motor vehicle generators: Patent No. 2163349 C1 Russian Federation / V. A. Butorin, V. D. Devyatkov; appl. 14.12.1999; publ. 20.02.2001. EDN KSVTDL. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 18.03.2024; одобрена после рецензирования 20.04.2024; принята к публикации 29.04.2024.  
The article was submitted 18.03.2024; approved after reviewing 20.04.2024; accepted for publication 29.04.2024.

