

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.313

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-5-53-58>

Выбор задаваемых параметров для оценки соответствия восстановленных погружных электродвигателей требованиям на капитальный ремонт

В.А. Буторин¹, Л.А. Саплин², Р.Т. Гусейнов³

^{1,2,3} Южно-Уральский государственный аграрный университет; г. Троицк, Россия

¹ butorin_chgau@list.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5180-8742>

² lsaplin49@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0009-2045-2059>

³ ruslan-ural8@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0001-4784-4249>

Аннотация. Надежность является основной характеристикой работоспособности погружных электродвигателей после капитального ремонта. Для оценки соответствия показателей надежности восстановленных погружных электродвигателей техническим требованиям на капитальный ремонт наиболее приемлем метод стендовых контрольных испытаний на основе последовательного анализа отказов исследуемых электродвигателей. Для его реализации необходим выбор задаваемых параметров, что и являлось целью исследований. В работе, на основе использования технических требований на изготовление и ремонт погружных электродвигателей, были установлены задаваемые средние наработки на отказ новых электродвигателей до первого капитального ремонта и после него. В результате проведения стендовых испытаний изучалось две партии погружных электродвигателей: прошедших и капитальный ремонт и не бывших в капитальном ремонте. В каждой партии исследовалось по 20 электродвигателей. В результате эксперимента среднее квадратическое отклонение наработки на отказ новых электродвигателей составило 3,54 тыс. ч, после капитального ремонта – 2,37 тыс. ч. Коэффициенты вариации составляли 0,3 и 0,34 соответственно. Обоснованы значения задаваемых параметров математической модели, обеспечивающих возможность использования метода последовательного анализа отказов: задаваемая средняя наработка на отказ до первого капитального ремонта – 16 тыс. ч; задаваемая средняя наработка на отказ после капитального ремонта – 12,8 тыс. ч; риски производителя и заказчика ремонта – 0,05; задаваемое среднее квадратическое отклонение наработки на отказ электродвигателей до первого капитального ремонта – 4,8 тыс. ч; задаваемое среднее квадратическое отклонение наработки на отказ после капитального ремонта электродвигателей – 4,35 тыс. ч. Установленные параметры могут быть использованы при испытаниях на надежность широкого круга типоразмеров погружных электродвигателей.

Ключевые слова: надежность, контрольные испытания, метод последовательного анализа, задаваемые параметры, выбор задаваемых параметров, ремонт погружных электродвигателей, отказ после капитального ремонта

Для цитирования: Буторин В.А., Саплин Л.А., Гусейнов Р.Т. Выбор задаваемых параметров для оценки соответствия восстановленных погружных электродвигателей требованиям на капитальный ремонт // *Агроинженерия*. 2024. Т. 26, № 5. С. 53-58. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-5-53-58>

ORIGINAL ARTICLE

Selection of preset parameters to assess the compliance of restored submersible electric motors with the overhaul requirements

V.A. Butorin¹, L.A. Saplin², R.T. Guseynov³

^{1,2,3} South Ural State Agrarian University, Troitsk, Russia

¹ butorin_chgau@list.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5180-8742>

² lsaplin49@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0009-2045-2059>

³ ruslan-ural8@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0001-4784-4249>

Abstract. The main characteristic of the performance of submersible electric motors after overhauls is their reliability. To assess the compliance of reliability indicators of restored submersible electric motors with

technical requirements for overhauls, various types of tests are used. The most acceptable of them is the bench test method based on a sequential failure analysis of the studied electric motors. To implement it, the specified parameters should be set. In this study, based on the use of technical requirements for the manufacture and repair of submersible electric motors, the authors determined the specified average operating times for failure of new electric motors (before the first overhaul) and after it. Bench tests were carried out for two batches of submersible electric motors: overhauled and non-overhauled. In each batch, 20 electric motors were studied. The experiment determined the standard deviation of the mean time between failures (MTBF) of new electric motors, which amounted to 3.54 thousand hours, after the overhaul – 2.37 thousand hours. The coefficients of variation were 0.3 and 0.34, respectively. The study results determined the values of the set parameters of the mathematical model, enabling the use of the method of successive failure analysis. The values included the set average MTBF before the first overhaul – 16 thousand hours; the set average MTBF after the overhaul – 12.8 thousand hours; the risks of the repair provider and the customer – 0.05; the set mean square deviation of the MTBF of electric motors before the first overhaul – 4.8 thousand hours; the set mean square deviation of the MTBF after the first overhaul – 4.8 thousand hours; the set mean square deviation of the MTBF after the overhaul – 2.37 thousand hours.

Keywords: reliability, control tests, sequential analysis method, set parameters, selection of set parameters, repair of submersible electric motors, failure after an overhaul

For citation: Butorin V.A., Saplin L.A., Guseynov R.T. Selection of preset parameters to assess the compliance of restored submersible electric motors with the overhaul requirements. *Agricultural Engineering (Moscow)*. (In Russ.). 2024;26(5):53-58. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-5-53-58>

Введение

Надежностью погружных электродвигателей в сельском хозяйстве в разные периоды занимались научные школы ФНАЦ ВИМ, ЮУрГАУ, КубГАУ, АЧИИ ДонГАУ и др. В одной из последних публикаций указывается, что средний срок службы погружных электродвигателей составляет 2,25 года¹. Исследования, проведенные в ФНАЦ ВИМ (ВИЭСХ), показывают, что срок службы электродвигателей после капитального ремонта в среднем в два раза меньше, чем у новых электродвигателей^{2,3}.

Основным показателем в соблюдении норм проведения капитального ремонта погружных электродвигателей является их надежность. Сведения о надежности можно получить на основании аналитических расчетов или экспериментальным путем [1, 2]. Аналитические расчеты показателей надежности применяются к отдельным узлам электродвигателей – например, к обмоткам, подшипниковым узлам, контактно-щеточным узлам, коллекторным узлам и т.д. Как показывает опыт, определение показателей надежности электродвигателей с использованием расчетных

методов приводит к большему разбросу полученных результатов вследствие применения множества допущений и экстраполяции. По этой причине данный метод для оценки соответствия требованиям на капитальный ремонт рассматриваться не будет.

Экспериментальные исследования широко используются при проведении определительных и контрольных испытаний надежности электродвигателей. Определительные и контрольные испытания могут быть эксплуатационными или стендовыми. Эксплуатационные испытания являются наиболее достоверными, однако значительный период их проведения может привести к ненужности полученных результатов. Стендовые испытания позволяют сократить сроки получения информации о надежности, поэтому они находят все большее применение для оценки работоспособности электродвигателей⁴ [2].

Определительные испытания применяют для оценки фактических показателей надежности. Обычно они проводятся при разработке новых объектов электрооборудования или после их коренной модернизации. По результатам таких испытаний находят законы распределения отказов, которые несут исчерпывающую оценку надежности объекта. Результаты этих испытаний могут служить также для оценки соответствия требованиям на капитальный ремонт рассматриваемого объекта.

Контрольные испытания служат для сравнительной оценки полученных данных о надежности объектов

¹ Кроневальд А.Ф., Оськин С.В. Особенности работы фильтровой защиты от обрыва фазы погружных электродвигателей в сельском хозяйстве: Монография. Краснодар: Издательство КубГАУ, 2010. 110 с.

² Система планово-предупредительного ремонта и технического обслуживания электрооборудования с.-х. предприятий / Госагропром СССР. М.: ВО Агропромиздат, 1987. 191 с.

³ Сырых Н.Н., Кабдин Н.Е. Теоретические основы эксплуатации электрооборудования: учебное пособие. М.: Агробизнесцентр, 2007. 514 с.

⁴ Кузнецов Н.Л. Надежность электрических машин: учебное пособие. М.: Издательский дом МЭИ, 2006. 432 с.

электрооборудования с требованиями отраслевого стандарта, технического задания или технического условия. Результаты контрольных испытаний не предназначены для оценки закона распределения отказов исследуемых объектов. Объем контрольных испытаний, включая число исследуемых объектов и проведенных опытов, будет значительно меньшим по сравнению с определяющими испытаниями на надежность. Вследствие этого для оценки соответствия отремонтированных погружных электродвигателей требованиям на капитальный ремонт были выбраны контрольные испытания.

Цель исследований: обоснование задаваемых параметров теоретической модели проведения контрольных испытаний на соответствие надежности отремонтированных погружных электродвигателей техническим требованиям на капитальный ремонт.

Материалы и методы

Применены теория эксплуатации электронасосного оборудования, метод математической статистики и теории вероятностей, методы последовательного анализа и испытаний на надежность.

Оценка соответствия надежности объектов установленным нормативно-техническим требованиям проводилась с использованием контрольных испытаний с применением метода последовательного анализа⁵, который доказал свою эффективность при испытаниях на надежность погружных электродвигателей⁶ [3]. При использовании данного метода число опытов (отказов) не выбирается. После проведения некоторого числа испытаний отремонтированных электродвигателей делается один из трех возможных выводов: отремонтированные электродвигатели соответствуют требованиям на капитальный ремонт, не соответствуют, испытания следует продолжать.

На основе предложенного Вальдом метода последовательного анализа решение принимается на основе критерия отношения правдоподобия L ⁷ [4].

При несоответствии отремонтированных погружных электродвигателей техническим требованиям

$$L \geq \ln \frac{1-\beta}{\alpha}, \quad (1)$$

при соответствии –

$$L \leq \ln \frac{\beta}{1-\alpha}. \quad (2)$$

⁵ Кузнецов Н.Л. Надежность электрических машин: учебное пособие. М.: Издательский дом МЭИ, 2006. 432 с

⁶ Вальд А. Последовательный анализ. М.: Физматлит, 1960. 256 с.

⁷ Там же.

Испытания должны быть продолжены, если

$$\ln \frac{\beta}{1-\alpha} < L < \ln \frac{1-\beta}{\alpha}, \quad (3)$$

где L – критерий отношения правдоподобия; β – риск заказчика ремонта; α – риск производителя ремонта; $1 - \alpha$ – вероятность выпуска после капитального ремонта партии электродвигателей, соответствующих требованиям на этот ремонт; $1 - \beta$ – вероятность отбраковки партии отремонтированных электродвигателей, не соответствующей требованиям на капитальный ремонт⁸.

Изучалось две партии погружных электродвигателей: прошедших капитальный ремонт и не бывших в капитальном ремонте. В каждой партии было по 20 электродвигателей.

Результаты и их обсуждение

Согласно требованиям на капитальный ремонт погружных электродвигателей качество их восстановления оценивается надежностью, показателем которой является наработка на отказ. Это наработка должна составлять не ниже 80% наработки нового погружного электродвигателя⁹. Нарботка на отказ зависит от многих факторов, вследствие чего предполагается выполнение предельной теоремы А.М. Ляпунова. Для стареющих объектов принимается нормальный закон распределения отказов¹⁰ [5]. В наших исследованиях подтвердим правильность выбора этого закона.

После соответствующих преобразований значение L находится из выражения [3, 4]:

$$L = n \cdot \ln \frac{\sigma_{\alpha}}{\sigma_{\beta}} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left(\frac{(T_i - T_{\alpha})^2}{\sigma_{\alpha}^2} - \frac{(T_i - T_{\beta})^2}{\sigma_{\beta}^2} \right), \quad (4)$$

где n – число испытаний (опытов), необходимых для принятия вывода о соответствии или несоответствии отремонтированных электродвигателей требованиям на капитальный ремонт; σ_{α} – задаваемое среднее квадратическое отклонение наработки на отказ электродвигателей до первого капитального ремонта; σ_{β} – задаваемое среднее квадратическое отклонение наработки на отказ электродвигателей после капитального ремонта; T_i – наработка до отказа i -го испытываемого электродвигателя; T_{α} – задаваемая средняя наработка на отказ до первого капитального ремонта; T_{β} – задаваемая средняя наработка на отказ после капитального ремонта.

⁸ ГОСТ 30195-94. Электродвигатели асинхронные погружные. Общие технические условия. М.: Издательство стандартов, 1996.

⁹ ТК 70.0009.001-84. Электродвигатели трехфазные асинхронные короткозамкнутые водозаполненные погружные. Технические требования на капитальный ремонт. М.: ГосНИТИ, 1985. 80 с.

¹⁰ Вентцель Е.С. Теория вероятностей: учебник для ВТУЗ. М.: Высшая школа, 2001. 575 с.

Значение средней наработки на отказ $T_a = 16$ тыс. ч для партии новых (до первого капитального ремонта) испытываемых погружных электродвигателей ПЭДВ 1,1-95 установлено заводом-изготовителем¹¹. Значение средней наработки на отказ погружных электродвигателей после капитального ремонта $T_b = 12,8$ тыс. ч было взято из нормативно-технической документации¹². Назначенные значения риска заказчика $\alpha = 0,05$ и исполнителя ремонта $\beta = 0,05$ были взяты исходя из накопленного опыта решения подобных задач [1]. Данные значения риска являются достаточными и не приводящими к чрезмерным издержкам на испытания¹³.

Назначенные средние квадратические отклонения σ_a и σ_b от назначенных средних наработок на отказ T_a и T_b для погружных электродвигателей в литературе отсутствуют. Значения σ_a и σ_b были установлены на основании данных об отказах двух партий погружных электродвигателей. Для этих партий определялись также коэффициенты вариации v_n и v_p наработки на отказ. Рассматриваемые партии погружных электродвигателей ПЭДВ 1,1-95 электронасоса ЭЦВ 4-1,5, служащих для водоснабжения животноводческих ферм малых фермерских хозяйств, эксплуатировались на территории Красноармейского района Челябинской области. Состав воды по данному району представлен территориальным фондом геологической информации по Уральскому федеральному округу. Данный состав приведен в работе [6] (табл.).

Данные об отказах обеих партий электродвигателей были взяты на основе проведения ремонтных работ сервисной организации по обслуживанию водонасосного электрооборудования.

При выборе закона распределения отказов в качестве меры согласованности между теоретическим и статистическим распределением служил критерий χ^2 Пирсона¹⁴. Для этого на основе экспериментальных данных рассчитывалось значение $\chi^2_{наб}$. Исходя из табличных значений для выбранного уровня значимости (обычно для подобных задач равный 0,05) и числа степеней свободы выбирают

критическое значение $\chi^2_{таб}$. В случае $\chi^2_{наб} < \chi^2_{таб}$ различие экспериментального и теоретического распределения является незначимым.

Установлено, что наработка на отказ не бывавших ранее в капитальном ремонте электродвигателей распределена по нормальному закону:

$$f(t) = 0,112e^{-\frac{(t-11,8)^2}{25,18}} \tag{5}$$

Статистические характеристики представленного распределения и значения χ^2 Пирсона следующие:

$$T_{cp} = 11,8 \text{ тыс. ч; } \sigma_T = 3,54 \text{ тыс. ч;}$$

$$v_n = 3,54 / 11,8 = 0,3; \chi^2_{таб}(0,05; 2) = 5,99; \chi^2_{наб} = 1,309.$$

Гистограмма и плотность теоретического распределения наработки на отказ впервые прибывших в капитальный ремонт погружных электродвигателей приведены на рисунке 1.

Плотность распределения наработки на отказ бывших ранее в капитальном ремонте погружных электродвигателей также распределена по нормальному закону:

$$f(t) = 0,168e^{-\frac{(t-6,8)^2}{11,28}} \tag{6}$$

Статистические характеристики представленного распределения и значения χ^2 Пирсона:

$$T_{cp} = 6,8 \text{ тыс.ч; } \sigma_T = 2,37 \text{ тыс.ч;}$$

$$v_n = 2,37 / 6,8 = 0,34. \chi^2_{таб} = 7,8; \chi^2_{наб} = 0,5.$$

Гистограмма и плотность теоретического распределения наработки на отказ бывших ранее в капитальном ремонте погружных электродвигателей приведены на рисунке 2.

Таблица
Средние значения параметров состава скважинной воды
Красноармейского района Челябинской области

Average values of the parameters of the wellbore
water composition in the Krasnoarmeyskiy district
of the Chelyabinsk region

Table

Показатель скважинной воды <i>Factors in borehole water</i>	Среднее значение <i>Mean value</i>
Содержание песка, мг/дм ³ <i>Sand content, mg/dm³</i>	67,7
Жесткость, мг-экв/дм ³ <i>Hardness, mg-eq/dm³</i>	3,42
Окисляемость, мг/дм ³ <i>Oxidizability, mg/dm³</i>	3,03
Наличие ионов хлора, мг/дм ³ <i>Presence of chlorine ions, mg/dm³</i>	248,5

¹¹ ГОСТ 30195-94. Электродвигатели асинхронные погружные. Общие технические условия. М.: Издательство стандартов, 1996.

¹² ТК 70.0009.001-84. Электродвигатели трехфазные асинхронные короткозамкнутые водозаполненные погружные. Технические требования на капитальный ремонт. М.: ГосНИТИ, 1985. 80 с.

¹³ Кузнецов Н.Л. Надежность электрических машин: учебное пособие. М.: Издательский дом МЭИ, 2006. 432 с.

¹⁴ Вентцель Е.С. Теория вероятностей: учебник для ВТУЗ. М.: Высшая школа, 2001. 575 с.

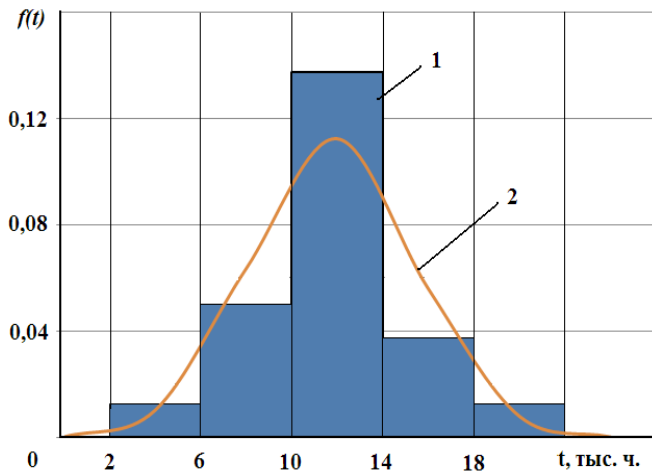


Рис. 1. Гистограмма наработки на отказ (1) впервые направленных на капитальный ремонт погружных электродвигателей и теоретическое распределение (2)

Fig. 1. MTBF histogram (1) of submersible electric motors subject to an overhaul for the first time and theoretical distribution (2)

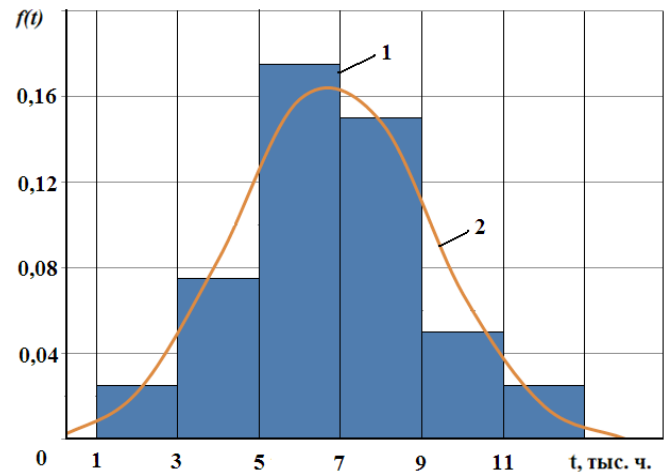


Рис. 2. Теоретическое распределение (1) и гистограмма наработки на отказ бывших ранее в капитальном ремонте погружных электродвигателей (2)

Fig. 2. Theoretical distribution (1) and an MTBF histogram of previously overhauled submersible electric motors (2)

Полученные гистограммы и теоретические распределения позволили установить задаваемые значения среднего квадратического отклонения наработки на отказ σ_α и σ_β :

$$\sigma_\alpha = v_n T_\alpha = 4,8 \text{ тыс. ч.};$$

$$\sigma_\beta = v_k T_\beta = 4,35 \text{ тыс. ч.}$$

Проведенные исследования позволили установить задаваемые параметры, открывающие возможность реализации метода оценки соответствия отремонтированных погружных электродвигателей установленным нормам на капитальный ремонт.

Установленные в исследованиях задаваемые параметры позволили реализовать математическую модель оценки качества ремонта погружных электродвигателей ПЭДВ 1,1-95 на предприятии ООО НПП «Гидромашсервис» г. Челябинска. При этом качество ремонта было установлено путем ускоренных испытаний последовательно, друг за другом, 6 погружных электродвигателей [7].

Выводы

1. Для оценки соответствия надежности восстановленных погружных электродвигателей техническим требованиям на капитальный ремонт

целесообразно использовать стендовые контрольные испытания на основе предложенного Вальдом метода последовательного анализа отказов испытываемых электродвигателей.

2. На основе нормативно-технической документации, накопленного опыта, и экспериментальных исследований обоснованы значения задаваемых параметров математической модели, обеспечивающих возможность использования предложенного метода последовательного анализа отказов для оценки соответствия надежности отремонтированных погружных электродвигателей требованиям на капитальный ремонт: задаваемая средняя наработка на отказ до первого капитального ремонта – 16 тыс. ч; задаваемая средняя наработка на отказ после капитального ремонта – 12,8 тыс. ч; риск производителя ремонта – 0,05; риск заказчика ремонта – 0,05; задаваемое среднее квадратическое отклонение наработки на отказ электродвигателей до первого капитального ремонта – 4,8 тыс. ч; задаваемое среднее квадратическое отклонение наработки на отказ электродвигателей после капитального ремонта – 4,35 тыс. ч.

Установленные параметры могут быть использованы для испытания на надежность широкого круга типоразмеров погружных электродвигателей.

Список источников

1. Кузнецов Н.Л., Котеленец Н.Ф. Надежность электрических машин и планирование эксперимента // *Электричество*. 2007. № 10. С. 42-44. EDN: KUZYJV
2. Буторин В.А., Молчан А.М. Системный подход к проблеме надежности восстановления погружных электродвигателей // *Вестник Курганской ГСХА*. 2020. № 2 (34). С. 53-57. EDN: AXVCSF
3. Саплин Л.А., Буторин В.А., Молчан А.М. Модель долговечности обмоток погружных электродвигателей // *АПК России*. 2022. Т. 29, № 1. С. 66-69. EDN: YFRQLY
4. Буторин В.А., Саплин Л.А., Молчан А.М. Математическая модель контрольных испытаний на надежность отремонтированных погружных электродвигателей // *АПК России*. 2021. Т. 28, № 2. С. 193-199. EDN: CLPRLW
5. Фефелова С.В., Туктаров М.Ф. Ускоренные испытания на надежность зерноочистительной машины // *Уральский научный вестник*. 2022. Т. 8, № 4. С. 100-106. EDN: OYATLK
6. Буторин В.А., Гусейнов Р.Т. Основные факторы, влияющие на ресурс подшипниковых узлов погружных электродвигателей // *Достижение науки – агропромышленному производству: Материалы ЛП Международной научно-технической конференции*. Челябинск: Челябинская государственная агроинженерная академия, 2014. Ч. 3. С. 241-246. EDN: SWSYXJ
7. Молчан А.М. Результаты контрольных испытаний на надежность капитально отремонтированных погружных электродвигателей // *Наука и инновации – современные концепции: Сборник научных статей по итогам работы Международного научного форума*. Уфа: Инфинити, 2021. С. 142-146. EDN: THUNMX

Информация об авторах

Владимир Андреевич Буторин¹, д-р техн. наук, профессор; butorin_chgau@list.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-5180-8742>
Леонид Алексеевич Саплин², д-р техн. наук, профессор; lsaplin49@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0009-2045-2059>
Руслан Тофикович Гусейнов³, канд. техн. наук, доцент; ruslan-ural8@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0001-4784-4249>
^{1,2,3} Южно-Уральский государственный аграрный университет; 457103, Челябинская область, г. Троицк, ул. им. Ю.А. Гагарина, 13

Вклад авторов

В.А. Буторин – научное руководство и постановка цели исследований;
 Л.А. Саплин – руководство теоретическими исследованиями и обработка экспериментальных данных;
 Р.Т. Гусейнов – сбор статистического материала о надежности погружных электродвигателей.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила в редакцию 25.03.2024; поступила после рецензирования и доработки 30.05.2024; принята к публикации 03.06.2024

References

1. Kuznetsov N.L., Kotelenets N.F. Reliability of electric machines and experiment planning. *Elektrichestvo*. 2007;10:42-44. (In Russ.)
2. Butorin V.A., Molchan A.M. Systematic approach to the reliability problem of submersible electric motor rehabilitation. *Vestnik Kurganskoy GSKhA*. 2020;2(34):53-57. (In Russ.)
3. Saplin L.A., Butorin V.A., Molchan A.M. Winding durability model for submersible motors. *APK Rossii*. 2022;29;1:66-69. (In Russ.)
4. Butorin V.A., Saplin L.A., Molchan A.M. The mathematical model of control tests for the reliability of repaired submersible electric motors. *APK Rossii*. 2021;28;2:193-199. (In Russ.)
5. Fefelova S.V., Tuktarov M.F. Accelerated reliability tests of a grain cleaning machine. *Ural'skiy Nauchniy Vestnik*. 2022;8;4:100-106. (In Russ.)
6. Butorin V.A., Guseynov R.T. Main factors affecting the life of bearing assemblies of submersible electric motors. *Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "Dostizhenie Nauki – Agropromyshlennimu Proizvodstvu"*, Chelyabinsk, 2014;3:241-246. (In Russ.)
7. Molchan A.M. Results of control tests for reliability of overhauled submersible electric motors. In: *Nauka i Innovatsii – Sovremennyye Kontseptsii. Proceedings of the International Scientific Forum*. Moscow, 2021. (In Russ.)

Author Information

Vladimir A. Butorin¹, DSc (Eng), Professor; butorin_chgau@list.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-5180-8742>
Leonid A. Saplin², DSc (Eng), Professor; lsaplin49@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0009-2045-2059>
Ruslan T. Guseynov³, CSc (Eng), Associate Professor; ruslan-ural8@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0001-4784-4249>
^{1,2,3} South-Ural State Agrarian University, 457103, Chelyabinsk Region, Troitsk, ul. Yu.A. Gagarina, 13

Author Contributions

V.A. Butorin – research supervision, conceptualization;
 L.A. Saplin – theoretical research supervision, experimental data curation;
 R.T. Guseynov – statistics curation.

Conflict of interests

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

Received 25.03.2024; Revised 30.05.2024; Accepted 03.06.2024.