

УДК 696.132.6-192

**ИНЖЕНЕРНЫЙ АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ТРОЛЛЕЙБУСА****ENGINEERING ANALYSIS OF OPERATIONAL RELIABILITY
OF TROLLEY'S ELECTRICAL EQUIPMENT**

Михайлов Илья Юрьевич,
аспирант. E-mail: mihaylov_iy@mail.ru

Цуа Yu. Mikhaylov, Grad. Student.

Муравлев Олег Павлович,
доктор техн. наук, профессор. E-mail: mop@tpu.ru

Oleg P. Muravlev, Dr. Sc. in Engineering, Professor

Федянин Александр Леонидович,

канд. техн. наук, доцент. E-mail: fedyanin@tpu.ru

Aleksandr L. Fedyanin, C. Sc. in Engineering, Associate Professor

ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»,
Россия, 634050, г. Томск, проспект Ленина, дом 30,
National Research Tomsk Polytechnic University, Russia, 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 30.

Аннотация.

Актуальность работы обусловлена необходимостью совершенствования практических методов повышения уровня надежности для обеспечения долговечности электрического оборудования троллейбуса и безопасности пассажироперевозок. Анализ надежности позволяет разработать комплекс мероприятий по повышению безотказности и долговечности, как отдельных элементов, так и троллейбуса в целом, обосновать систему технического обслуживания и ремонта, оценить реальный уровень безотказности, сформировать требования по надежности применительно к заданным условиям эксплуатации.

Цель работы: разработать методику проведения инженерного анализа эксплуатационной надежности электрического оборудования троллейбуса.

Методы исследования: статистические методы определения количественной оценки показателей эксплуатационной надежности, законов функций распределения.

Результаты: получена количественная оценка взаимосвязи приводов электрического оборудования троллейбуса. Получены количественные показатели оценки чувствительности изменения средней наработки на отказ. Табличные данные, полученные в работе, используются в качестве справочных материалов при совершенствовании системы технического обслуживания и ремонта.

Выводы: Разработана методика определения средней наработки на отказ при известных параметрах нормального распределения. Анализ оценки влияния изменения средних наработок на отказ, при увеличении средней наработки на отказ тягового электрического двигателя, электрического усилителя рулевого управления и компрессора на 5%, 10%...30% T_{CP} , показал стратегию увеличения надежности электрического оборудования троллейбуса. По разработанной математической модели оценки эксплуатационной надежности проанализированы взаимосвязи приводов электрического оборудования троллейбуса. Выявлена значительность оказываемого влияния изменения надежности обмотки статора на надежность приводного оборудования. Произведена оценка чувствительности изменения средней наработки на отказ подвижного состава.

Abstract.

Relevance of the work due to the need to improve the practical methods of increasing the level of reliability to ensure the durability of electrical equipment trolley and security. Reliability analysis allows you to develop a set of measures to improve the reliability and durability as separate elements and trolley as a whole, justify a system of maintenance and repair, to evaluate the real level of reliability, form the reliability requirements with respect to the given operating conditions.

Objective: To develop a methodology for engineering analysis of the operational reliability of electrical equipment trolley.

Methods: statistical methods for determining the quantitative assessment of operational reliability, the laws

of distribution functions. The quantitative indicators to assess the sensitivity of changes in mean time to failure.

Results: The quantitative assessments of the relationship drives electrical equipment trolley. The quantitative indicators to assess the sensitivity of changes mean time between failures. Tabular data obtained in this work are used as reference materials in improving the system of maintenance and repair.

Conclusions: The method of determining the mean time between failures when the parameters of the normal distribution. Analysis assessing the impact of changes in the mean operating time between failures, increasing the mean time between failures of the traction electric motor, electric power steering and the compressor 5%, 10% ... 30%, showed the strategy to increase the reliability of electrical equipment trolley. According to the developed mathematical model for assessing the reliability of drives to analyze the relationship of electrical equipment trolley. There was a significant change to influence the reliability of the stator winding on the reliability of the driven equipment. The estimation of the sensitivity variation of the mean time between failures of the rolling stock.

Ключевые слова: троллейбус, наработка на отказ, вероятность безотказной работы, оценка влияния изменения средних наработок на отказ, коэффициент важности.

Key words: trolleybus, the probability of failure-free operation, evaluation of the impact of changes in the mean operating time between failures, the importance factor.

Актуальность исследования. Совершенствование практических методов исследования надежности имеет основополагающее значение для всех отраслей народного хозяйства, особенно на стадии эксплуатации. Анализ надежности позволяет разработать комплекс мероприятий по повышению безотказности и долговечности, как отдельных элементов, так и троллейбуса в целом, обосновать систему технического обслуживания и ремонта, оценить реальный уровень безотказности, сформировать требования по надежности применительно к заданным условиям эксплуатации. К сожалению, известные методы исследования надежности сложных систем, применяемые радиоэлектронике, автоматике, электроэнергетике не всегда применимы для электромеханических систем. Такая особенность связана с эксплуатацией описанных выше систем. Любая сложная система автоматики и радиоэлектроники состоит из стандартных элементов (сопротивлений, конденсаторов, диодов, транзисторов и т.п.) со стабильными показателями безотказности. Исследование процессов старения таких элементов не имеет необходимости, поскольку в случае отказа таких элементов они заменяются запасными.

Конструкция электрических машин требует иного подхода к безопасности и долговечности сборочных единиц и деталей, так как замена элементов запасными в некоторых случаях достаточно трудоемка. Необходимо учитывать старение изоляционных материалов, износоустойчивость подшипников и др. Процессы старения в электрической машине (ЭМ) приводят к необходимости их ремонта в процессе эксплуатации, причем, обычно степень состояния обмоток нельзя оценить по выходным параметрам.

Применение статистических методов для определения показателей надежности обусловлено невозможностью определения технического ресурса для каждого конкретного асинхронного двигателя (АД). Эта особенность связана со старением изоляции обмоток при нагреве, который всегда

присутствует при работе. Так же не стоит забывать об условиях окружающей среды, существенно влияющих на процессы старения материалов. Описанные процессы невозможно контролировать методами технической диагностики.

Применение технической диагностики для тяговых электрических двигателей (ТЭД) возможно для оценки ресурса подшипников и смазки, но показатели надежности их не являются наиболее слабыми звеньями [1]. Удовлетворительное состояние этих элементов оценивается при плановом техническом обслуживании.

В случае, когда невозможно определить характеристики процессов старения, параметры распределения вероятностей приходится устанавливать путем статистической обработки опытных данных. Следует отметить, что статистическое моделирование позволяет исследовать фактическую надежность изделий по данным наблюдений в эксплуатации. В этом случае необходимо определение средних наработок и сроков службы до ремонта, наработок на отказ, коэффициентов готовности и других фактических показателей надежности [2-6].

Инженерный анализ асинхронного двигателя. Для поддержания необходимого уровня надежности троллейбуса в целом, необходимо провести инженерный анализ. Инженерный анализ состоит из двух основных этапов:

1) выявить «слабые звенья» электрооборудования (ЭО) троллейбуса и получить фактическую картину надежности элементов;

2) произвести исследование надежности тягового электрического двигателя на основе анализа отказов.

Эксплуатационная надежность тягового электрического двигателя зависит от параметров эксплуатационной надежности следующих его элементов: обмотка статора, обмотка ротора, подшипниковое устройство [7,8]. Основной характеристикой эксплуатационной надежности является функция вероятности безотказной работы, которая

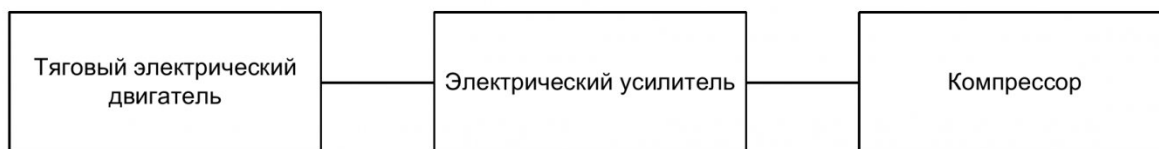


Рис.1. Блок-схема формирования надежности ЭО троллейбуса

определяется по формуле [9-12]:

$$P_i(t) = P_{OCi}(t) \cdot P_{OPi}(t) \cdot P_{ПУi}(t) \quad (1)$$

где $P_{OCi}(t)$ – вероятность безотказной работы (ВБР) обмоток статоров асинхронных двигателей i -го привода; $P_{OPi}(t)$ – ВБР обмотки ротора асинхронных двигателей i -го привода; $P_{ПУi}(t)$ – ВБР подшипниковых узлов асинхронных двигателей i -го привода.

$$P_{ПУi}(t) = P_{ПАi}(t) \cdot P_{ПВи}(t) \cdot P_{СМи}(t)$$

Однако, при ВБР, подчиняющейся нормальному закону распределения, расчет количественных показателей будет существенно проще. Для применения данного метода необходимо наличие статистических данных наработок на отказ исследуемых асинхронных двигателей. Данный метод не дает существенных погрешностей и применяется на основании дальнейшего проведения инженерного анализа электрического оборудования троллейбуса [13, 14].

По результатам моделирования были определены и получены параметры законов распределения, где σ – среднее квадратичное отклонение, μ – математическое ожидание (табл. 1)

Для количественной оценки ВБР и средней наработки на отказ необходимо определить временной интервал исследования в часах. В данной работе представлены статистические данные за период в 5 лет, при этом эксплуатация троллейбуса происходит в продолжительном режиме работы с изменяющейся частотой вращения и переменной нагрузкой. При этом учитывается режим работы троллейбусного парка и факт частого ремонта подвижного состава.

В качестве примера ниже представлен расчет ВБР ТЭД при $t = 500$ часов:

$$P_{ТЭД} = P_{OC}(t) \cdot P_{OP}(t) \cdot P_{ПУ}(t) \quad (2)$$

При этом:

$$P_{OC}(t) = \frac{(2\pi)^{-\frac{3}{2}}}{\sigma_{OC}} \cdot \int_t^\infty e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t-\mu_{OC}}{\sigma_{OC}}\right)^2} dt$$

$$P_{OP}(t) = \frac{(2\pi)^{-\frac{3}{2}}}{\sigma_{OP}} \cdot \int_t^\infty e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t-\mu_{OP}}{\sigma_{OP}}\right)^2} dt$$

$$P_{ПУ}(t) = \frac{(2\pi)^{-\frac{3}{2}}}{\sigma_{ПУ}} \cdot \int_t^\infty e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t-\mu_{ПУ}}{\sigma_{ПУ}}\right)^2} dt$$

Подставляя значения параметров законов распределений обмоток статоров и роторов в (1), получаем

$$P_{ТЭД} = 0,606$$

Представляемая математическая модель электрического оборудования описывает взаимосвязь наработок и вероятностей безотказной работы ЭО троллейбуса.

Инженерный анализ электрического оборудования троллейбуса. Для нахождения эксплуатационной надежности ЭО троллейбуса принимаем схему изображенную на рис.1. В соответствии с ней отказ любого из элементов ЭО троллейбуса приведет к отказу системы в целом. В общем случае ВБР троллейбуса примет вид:

$$P_{трол} = \prod_{i=1}^N P_i = P_{ТЭД} \cdot P_{Эл.Усил} \cdot P_K \quad (3)$$

Значения параметров вероятности безотказной работы вычисляются в пакете Mathcad.

Для нормальной модели распределения характерно совпадение средней наработки на отказ с параметром μ : $T_{CP} = m$ [15-20].

В результате моделирования автором были получены следующие значения.

Исходя из формулы ВБР нормального закона распределения (2) и закона сложения вероятностей (3):

$$P_{ЭО}(t) = P_{ТЭД}(t) \cdot P_{ЭУ}(t) \cdot P_K(t)$$

Таблица 1. Параметры нормального закона распределения приводов троллейбуса

Тип привода	Обмотка статора		Обмотка ротора		Подшипниковый узел		Привод	
	$\sigma, ч$	$\mu, ч$	$\sigma, ч$	$\mu, ч$	$\sigma, ч$	$\mu, ч$	$\sigma, ч$	$\mu, ч$
Тяговый двигатель	704,4	747,2	633,9	987,9	553,3	1131	630,5	955,3
Электрический усилитель	680,3	1235,6	951,2	1516,9	854,2	1462,2	828,5	1405
Компрессор	728,8	1073,5	781,1	1121,4	610,3	1122,4	706,7	1106

$$P_{ТЭД}(t) = \frac{(2\pi)^{\frac{3}{2}}}{\sigma_{ТЭД}} \cdot \int_t^{\infty} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t-\mu_{ТЭД}}{\sigma_{ТЭД}} \right)^2} dt$$

$$P_{ЭУ}(t) = \frac{(2\pi)^{\frac{3}{2}}}{\sigma_{ЭУ}} \cdot \int_t^{\infty} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t-\mu_{ЭУ}}{\sigma_{ЭУ}} \right)^2} dt$$

$$P_K(t) = \frac{(2\pi)^{\frac{3}{2}}}{\sigma_K} \cdot \int_t^{\infty} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t-\mu_K}{\sigma_K} \right)^2} dt$$

В качестве примера произведем расчет ВБР ЭО троллейбуса при $t=500$ ч:

$$P_{ЭО}(t) = 0,631$$

Средняя наработка ЭО троллейбуса

$$T_{CP} = \int_0^{\infty} P_{ЭО}(t) dt$$

Подставляя значения параметров нормального распределения, получим:

$$T_{CP} = 570,7$$

Для проведения анализа влияния средних наработок на вероятность безотказной работы всех рассматриваемых элементов ЭО троллейбуса, произведем расчет, увеличивая параметр μ на 5, 10, 15, 20, 25, 30 %, для каждого элемента в отдельности и для электрооборудования в целом.

В качестве примера определим ВБР и среднюю наработку ЭО троллейбуса при условии, что средняя наработка ТЭД увеличена на 20%, мы получаем новое значение параметра

$$\mu_{ТЭД20\%} = 1,2 \cdot \mu_{ТЭД} = 1,2 \cdot 570,7 = 684,84$$

Новая ВБР при $t=500$ ч будет равна

$$P_{ЭО20\%} = P_{ТЭД20\%}(t) \cdot P_{ЭУ}(t) \cdot P_K(t) = 0,688$$

Новая средняя наработка на отказ будет равна

$$T_{CP} = \int_0^{\infty} P_{ЭО}(t) dt = \int_0^{\infty} P_{ТЭД20\%}(t) dt \cdot P_{ЭУ}(t) dt \cdot P_K(t) dt = 637,24$$

Результаты расчетов ВБР и средней наработки и отказ представлены на рис. 2, который позволяет визуально оценить влияние изменения ВБР при увеличении наработки на отказ. Очевидно, что при повышении средней наработки на отказ каждого привода увеличивается надежность подвижного состава в целом. При этом легко заметить существенность изменения ВБР подвижного состава, при изменении наработки на отказ всех приводов. Зависимости рис.2. необходимы для совершенствования системы технического обслуживания и ремонта(ТОиР) ЭО троллейбуса.

Совершенствование ТОиР заключается в выявлении метода повышения средней наработки на отказ элемента ЭО троллейбуса, оказываемое при этом влияние возможно оценить по графикам представленным на рис.2.

На рис. 2. цифрами обозначено: 1 – зависимость ВБР при средней наработке на отказ без увеличения, 2 - зависимость ВБР при увеличении средней наработке на отказ на 5 %, 3 - зависимость ВБР при увеличении средней наработке на отказ на 10 %, 4 - зависимость ВБР при увеличении средней наработке на отказ на 15 %, 5- зависимость ВБР при увеличении средней наработке на отказ на 20 %, 6 - зависимость ВБР при увеличении средней наработке на отказ на 25 %, 7 - зависимость ВБР при увеличении средней наработке на отказ на 30 %.

Для проведения оценки чувствительности изменения средней наработки ЭО троллейбуса от изменений средних наработок тягового электрического двигателя, электрического усилителя рулевого управления и компрессора введем коэффициент относительной важности – $K_{ОВ}$.

$$K_{ОВ}^{ТЭД} = \frac{T_{CP.N} - T_{CP}}{T_{CP}},$$

где $T_{CP.N}$ средняя наработка на отказ электрического оборудования с приращением К (5, 10, 15, 20, 25, 30) %, T_{CP} – средняя наработка на отказ ЭО.

Таблица 2. Изменение ВБР ЭО троллейбуса при увеличении средней наработки на отказ

Процент прироста	Время работы, ч										
	0	150	300	450	600	750	900	1050	1200	1350	1500
0	1	0,767	0,675	0,568	0,454	0,342	0,239	0,156	0,093	0,051	0
5	1	0,777	0,687	0,582	0,468	0,355	0,251	0,165	0,1	0,055	0
10	1	0,786	0,698	0,594	0,481	0,368	0,262	0,174	0,106	0,059	0
15	1	0,794	0,708	0,606	0,494	0,38	0,273	0,183	0,113	0,064	0
20	1	0,801	0,717	0,616	0,505	0,391	0,284	0,191	0,119	0,068	0
25	1	0,807	0,725	0,626	0,516	0,402	0,294	0,2	0,125	0,072	0
30	1	0,812	0,732	0,634	0,525	0,412	0,303	0,208	0,132	0,077	0

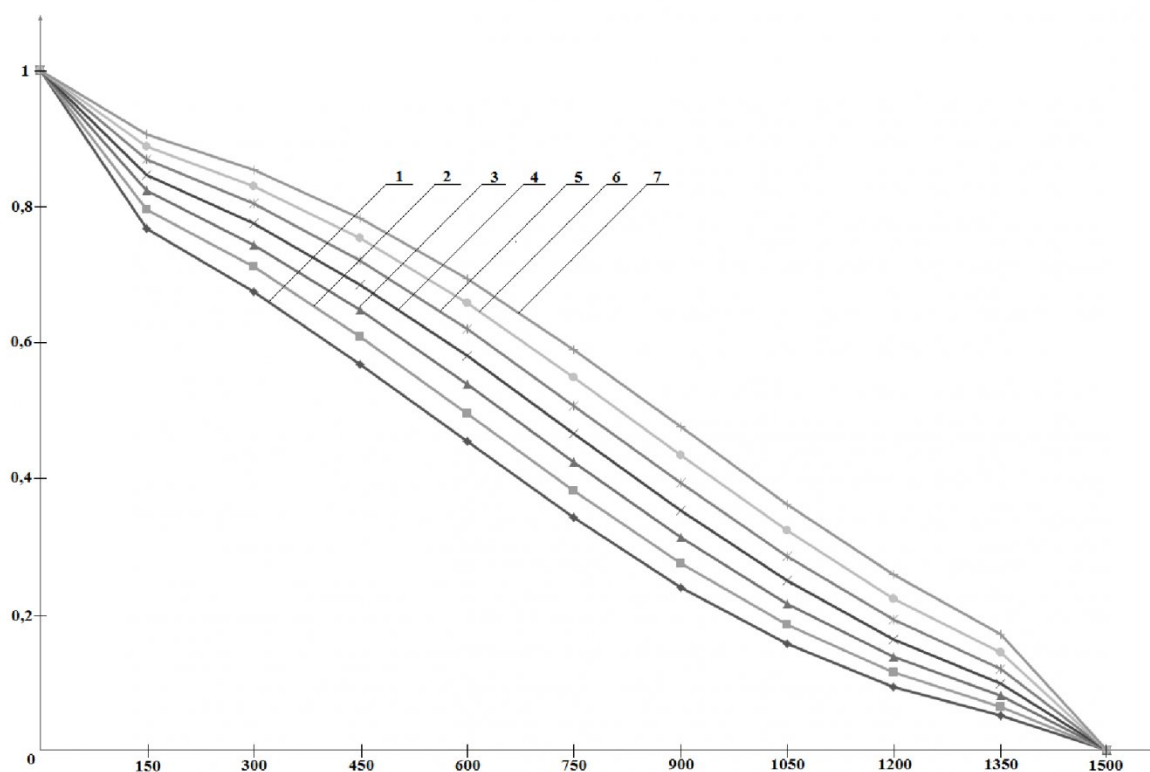


Рис. 2. Изменение ВБР ЭО троллейбуса при увеличении средней наработки на отказ

Коэффициент относительной важности определяет чувствительность изменения средней наработки ЭО от изменения средних наработок приводов троллейбуса. В качестве примера ниже представлен расчет коэффициента относительной важности при увеличении средней наработки на отказ ТЭД на 20%.

$$K_{OB}^{ТЭД} = \frac{T_{CP.20} - T_{CP}}{T_{CP}} = \frac{637,16 - 570,66}{570,66} = 0,117$$

Результаты моделирования коэффициентов относительной важности представлены на рис. 3. График показывает зависимость влияния процента прироста средней наработки от приращения средней наработки на отказ. Данный анализ необходим для выявления чувствительности оказываемого влияния на ВБР подвижного состава, каждого элемента ЭО. График рис.3. наглядно показывает, что самым чувствительным звеном ЭО является ТЭД, другими словами, при изменении средней наработки на отказ данного узла, ВБР всего подвижного состава изменится существенно больше всего, следовательно, этот факт необходимо учитывать при совершенствовании системы ТОиР троллейбуса.

Также рис. 3 позволяет количественно оценить чувствительность повышения надежности ЭО троллейбуса, при изменении наработки на отказ каждого привода на 5-30%.

Согласно данному графическому анализу, можно сделать вывод о необходимости увеличе-

ния надежности, прежде всего, тягового двигателя. Влияние комплексного увеличения средней наработки на отказ всех приводов электрооборудования троллейбуса, очевидно, оказывает существенный прирост средней наработки (межремонтного промежутка) всего подвижного состава.

Проведенный инженерный анализ элементов ЭО подвижного состава троллейбуса позволил накопить необходимые базовые знания для создания методики совершенствования ТОиР.

Выводы:

1. Инженерный анализ количественно определяет оценку взаимосвязи приводов, входящих в состав электрического оборудования 47 исследуемых троллейбусов, при этом выявлена чувствительность оказываемого влияния при изменении средней наработки на отказ тягового электрического двигателя троллейбуса на вероятность безотказной работы электрического оборудования. Проведение инженерного анализа необходимо для разработки методологии прогнозирования.

2. Разработанная методика определения средней наработки на отказ при известных параметрах нормального распределения позволяет оценить техническое состояние оборудования в заданный момент времени, что позволяет моделировать эксплуатационную надежность электрических узлов троллейбуса.

3. Математическая модель оценки экс-

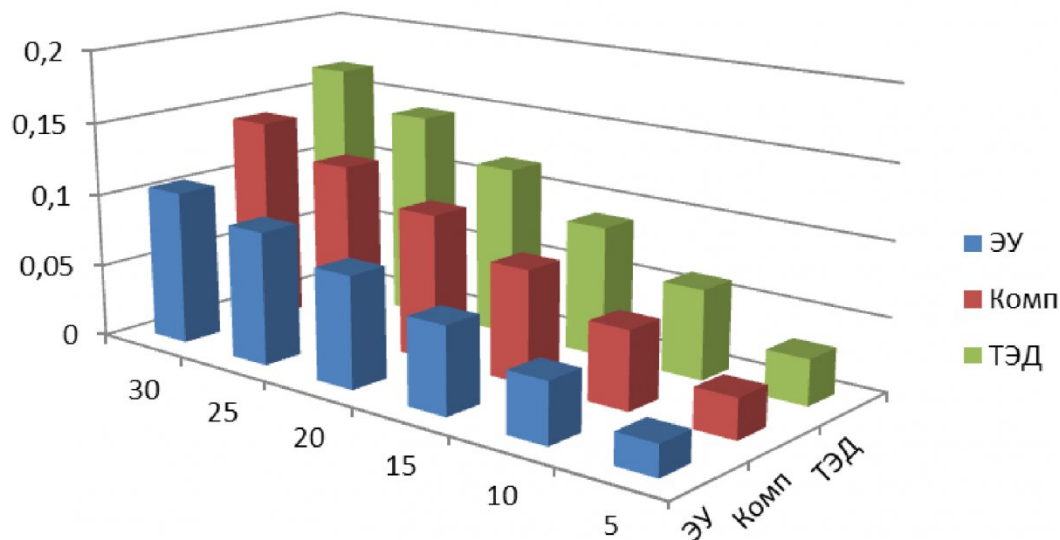


Рис. 3. Диаграмма зависимости коэффициента относительной важности от процента прироста средней наработки на отказ элементов подвижного состава

плуатационной надежности ЭО троллейбуса, включающая в себя количественное определение показателей надежности, позволяет оценить влияние изменения вероятности безотказной работы при изменении средней наработки на отказ, что необходимо для разработки стратегии поддержания удовлетворительного технического состояния

в процессе эксплуатации.

4. Представлены эксплуатационные данные зависимостей вероятности безотказной работы от изменения средней наработки на отказ элементов электрического оборудования троллейбуса, необходимые для совершенствования системы технического обслуживания и ремонта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яценко А.А. Организация обслуживания и ремонта оборудования// Материалы лекций. Владивостокский государственный университет экономики и сервиса. Каф. СТЭА. 2010. – 114 с.
2. Александровская Л.Н и др. Современные методы обеспечения безотказности сложных технических систем. М.: Логос, 2001, - 387 с.
3. Бортников С.П. Научный аппарат надежности, Ульяновск: УлГТУ, 2006. – 396 с.
4. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. – 2-е изд. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.
5. O'Connor P. and Kleynner A. Practical Reliability Engineering. Chichester: Wiley. 2012, - 345 p.
6. Колегаев Р.Н. Экономическая оценка качества и оптимизации системы ремонта машин. – М.: Машиностроение. 1980. – 239 с.
7. Пестрецов С.И. Надежность технологического оборудования. Тула: ТГТУ, 2005. – 224 с.
8. Основы технической диагностики (Модели объектов, методы и алгоритмы диагноза) / Под ред. П.П. Пархоменко. – М.: Энергия, 1976. – 464 с.
9. Кузнецов Н.Л. Надежность электрических машин: Учебник для вузов – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 432с.
10. Rausand M., Hoyland A. System reliability theory: models, statistical methods and applications. – Indianapolis: Wiley, 2004. – 664 p.
11. Gertsbach I. Reliability theory. – Liverpool: Springer, 2000. – 219 p.
12. Кузнецов Н.Л. Сборник задач по надежности электрических машин: Учеб. пособие. - М.: Изд.дом МЭИ, 2008. – 408 с.
13. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учебное пособие для вузов.– М.: Высшая школа, 2004.– 479 с.
14. Обеспечение надежности асинхронных двигателей / П.И. Захарченко, И.Г. Ширнин, Б.Н. Ванеев, В.М. Гостищев. - Донецк: УкрНИИВЭ, 1998. – 324 с.
15. Назарычев А. Н., Андреев Д.А. Методы и математические модели комплексной оценки технического состояния электрооборудования. - Иваново: Иван. гос. энерг. ун-т, 2005. – 224 с.
16. Животкевич И.М., Смирнов А.П. Надежность технических изделий. – М.: Олита, 2003. – 472 с.

17. Колпачков В.И., Яшура А.И. Производственная эксплуатация, техническое обслуживание и ремонт энергетического оборудования (Справочник). - М.: Энергосервис, 1999. - 439 с.
18. Birolini A. Reliability Engineering. Theory and Practice. – Liverpool: Springer, 2010 – 600 p.
19. Гусев В.В. Показатели безотказности электрических машин в реальных условиях эксплуатации алмазодобывающего комплекса//Известия Томского политехнического университета. – 2010 – Т. – №4 – С. 178–183.
20. Войтешонок И.И., Троллейбус низкопольный АКСМ-321//Белорусский транспорт – 2008. URL: <http://www.beltransport.by/ps/troll/aksm321.html> (дата обращения 24.10.2014)

REFERENCES

1. Yatsenko. A.A. Organizatsiya obslujivaniya i remonta oborudovaniya [Organization of maintenance and repair of equipment]// Lecture materials. Vladivostok State University of Economics and Service.- 2010. -114p. Материалы лекций.
2. Aleksandrovskaya L.N. and other. Sovremennye metodi obespecheniya bezotkaznosti slozhnikh tekhnicheskikh system [Modern methods of ensuring reliability of complex technical systems]. Moscow: Logos, 2001. – 387 p. Книга
3. Bortnikov S.P., Nauchniy apparat nadezhnosti [Scientific apparatus reliability]. Ulyanovsk: UIGTU, 2006. – 396 p. Книга
4. Polovko A.M., Gurov S.V. Osnovi teorii nadezhnosti [Foundations of the theory of reliability]. St.Petersburg. BHV-Peterburg, 2006. 704p. Книга
5. O'Connor P. and Kleynner A. Practical Reliability Engineering. Chichester: Wiley. 2012, - 345 p. Книга
6. Kolegaev R.N. Economicheskaya ocenka kachestva i optimizacii sistema remonta mashin [Economic evaluation of the quality and optimizing the system repair machines]. Moscow. Engineering, 1980. 239p. Книга
7. Pestretsov S.I. Nadezhnost tekhnologicheskogo oborudovaniya [Reliability of process equipment]. Tula, TGTU, 2005. – 224 p. Книга
8. Osnovi tekhnicheskoy diagnostiki (modeli ob'ektov, metodi i algoritmi diagnoza) [Fundamentals of technical diagnostics (Model objects, methods and algorithms for diagnosis)]. Edited by Parkhomenko P.P. Moscow: Energiya, 1976. – 464 p. Книга
9. Kuznetsov N.L. Nadezhnost elektricheskikh mashin [Reliability of electrical machines]: Textbook for universities - Moscow: Publishing House MEI 2006. – 432 p. Книга
10. Rausand M., Hoyland A. System reliability theory: models, statistical methods and applications. – Indianapolis: Wiley, 2004. – 664 p. Книга
11. Gertsbach I. Reliability theory. – Liverpool: Springer, 2000. – 219 p. Книга
12. Kuznetsov N.L. Sbornik zadach po nadezhnosti elektricheskikh mashin [Problems in reliability of electrical machines]: Textbook for universities. - Moscow: Publishing House MEI 2008. – 408 p. Книга
13. Gmurman V.E. Teoriya veroyatnostey i metameticheskaya statistika [Probability theory and mathematical statistics]. Moscow. High school, 2004. 479p. Книга
14. Zakharchenko P.I., Shirin I.G., Vaneev B.N. Obespechenie nadezhnosti asinhronnih dvigateley [Ensuring the reliability of induction motors]. Donetsk: UkrNIIVE, 1998. – 324 p. Книга
15. Nazarichev A.N., Andreev D.A., Metodi i matematicheskie modeli kompleksnoy otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya elektrooborudovaniya [Methods and mathematical models of complex technical condition assessment of electrical equipment]. Ivanovo: IGTU, 2005. – 472 p. Книга
16. Zhivotkevich I.M., Smirnov A.P. Nadezhnost tekhnicheskikh izdeliy [The reliability of technical products]. Moscow: Olita, 2003. – 472ю Книга
17. Kolpachkov V.I., Yashura A.I., Proizvodsvennaya ekspluatatsiya, tekhnicheskoe obsluzhivanie i remont energeticheskogo oborudovaniya [Manufacturing operation, maintenance and repair of power equipment]. Moscow: Energoservis, 1999. – 439 p. Справочник
18. Birolini A. Reliability Engineering. Theory and Practice. – Liverpool: Springer, 2010 – 600 p. Книга
19. Gusev V.V. Pokazateli bezotkaznosti elektricheskikh mashin v realnih usloviyah ekspluatatsii almazodobivayushhego kompleksa [Indicators of reliability of electrical machines in actual use diamond-mining complex]. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. – 2010, no. 4 – pp. 178–183. Материалы конференции
20. Voyteshonok I.I., Trolleybus nizkopolnyy AKSM-321 [Low-floor trolleybus ACSM-321]// Belorusskiy transport, 2008. URL: <http://www.beltransport.by/ps/troll/aksm321.html> (date of treatment 24.10.2014). Интернет-источник

Поступило в редакцию 26.09.2016

Received 26 May 2016