

УДК 621.333:004

РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ РАСЧЕТА КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ ТРОЛЛЕЙБУСА

Михайлов Илья Юрьевич,

аспирант кафедры электрических комплексов и материалов
Энергетического института Томского политехнического университета,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: mihaylov_ily@mail.ru

Муравлев Олег Павлович,

д-р техн. наук, профессор кафедры электрических комплексов и материа-
лов Энергетического института Томского политехнического университета,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: mop@tpu.ru

Федянин Александр Леонидович,

канд. техн. наук, доцент кафедры электрических комплексов и материалов
Энергетического института Томского политехнического университета,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: feydanin@tpu.ru

Проанализированы отказы 47 троллейбусов на базе Томского трамвайно-троллейбусного управления. Выявлено, что 69,7 % отказов являются эксплуатационными, из них более половины относится к отказам электрического оборудования, наиболее важной частью которого является тяговый электрический двигатель троллейбуса. Актуальность работы обусловлена частыми отказами тяговых двигателей троллейбусов и необходимостью разработать комплекс мероприятий по обеспечению требуемого уровня надежности.

Цель работы: разработать математическую модель статистического определения количественной оценки показателей эксплуатационной надежности тяговых электрических двигателей троллейбуса.

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

Результаты: представлен алгоритм математической модели определения показателей эксплуатационной надежности тяговых электрических двигателей троллейбуса. Получены количественные показатели надежности тягового двигателя троллейбуса, гистограмма и функции вероятности безотказной работы нормального, логарифмически-нормального закона распределения, а также закона распределения Вейбулла, полученные с помощью предлагаемой математической модели.

Выводы: Впервые разработана компьютерная модель расчета количественных показателей эксплуатационной надежности тяговых электрических двигателей троллейбусов, позволяющая оценить как электрический двигатель в целом, так и ротор, статор и подшипниковый узел в отдельности. Представленная и описанная компьютерная модель количественной оценки показателей эксплуатационной надежности, с применением методов статистического анализа, для трех законов распределения: нормального, логнормального и закона распределения Вейбулла, обладает высокой точностью. Алгоритм реализован в вычислительном комплексе Mathcad, позволяет облегчить и ускорить процесс выявления показателей надежности и анализ надежности тяговых электрических двигателей. Получены законы распределения эксплуатационной надежности тяговых электрических двигателей троллейбусов, количественная оценка показателей наработки на отказ, интенсивности отказа. Представленные данные использованы для создания программно-вычислительного комплекса количественной оценки показателей надежности тяговых электрических двигателей троллейбусов.

Ключевые слова:

Троллейбус, показатели надежности, вероятность безотказной работы, алгоритм определения показателей надежности.

Актуальность исследования. Экономика крупных городов полностью зависит от транспорта. Без надежной доставки трудовых ресурсов к рабочим местам производство остановится. И проблема циклически обостряется: по мере ухудшения работы общественного транспорта из-за заторов все больше горожан пересаживаются на индивидуальные автомобили – в результате потребность в дорожной сети для каждого пассажира увеличивается в 10 раз [1]. Одним из видов городского муниципального транспорта является троллейбус, надежность работы которого экономически целесообразна.

Тяговые асинхронные двигатели – основные электромеханические преобразователи электрической энергии в механическую для троллейбусов. Характерные особенности этих двигателей заклю-

чаются в том, что при отказе любого из них наступает отказ троллейбуса; «слабые звенья» этих двигателей – обмотки статора и ротора, для которых не существует методов технической диагностики и развивающийся дефект всегда приводит к аварийному отказу.

Получение точной информации о рабочем состоянии, производительности системы двигателя, часто имеет решающее значение в поддержании успешной коммерческой эксплуатации таких систем. Для двигателей требуются точные методы проверки состояния, его отказ может отрицательно сказаться на производстве и технологических процессах или других возможностях приносить доход. Экономическая и технологическая эффективности объекта находятся в прямой связи с его

безопасностью. В связи с этим необходимо разработать комплекс мероприятий по обеспечению требуемого уровня надежности. По данным зарубежных источников после внедрения системы технического обслуживания и ремонта с учетом показателей надежности электротехнического оборудования на Детройтском машиностроительном заводе средняя наработка на отказ электрических двигателей увеличилась с 3 до 10,6 лет, а экономическая эффективность увеличилась в 12 раз [2, 3].

Задача исследования надежности системы формулируется как задача исследования вероятностных свойств параметров системы, когда по заданным вероятностным характеристикам случайных параметров элементов определяются вероятностные характеристики параметров системы. Полной вероятностной характеристикой случайной величины является ее функция распределения, которую будем моделировать [4].

Для оценки надежности по принятой информации может быть использован показатель вероятности безотказной работы (ВБР) $P(t)$. Эта функция обладает хорошей наглядностью, по ней можно определить остальные показатели надежности (среднюю наработку на отказ T_{cp} , функцию вероятности отказа $Q(t)$, интенсивность отказов $\lambda(t)$ и т. д.).

В ходе исследований были проанализированы отказы электрооборудования (ЭО) 47 троллейбусов на базе Томского трамвайно-троллейбусного управления [5]. Классификация причин потери способности элементов оборудования выполнять заданные функции изображена на рис. 1, а. При этом, как представлено на круговой диаграмме, причины потери работоспособности ЭО во время эксплуатации преобладают (69,7 %) над остальными. Прежде всего, такие показатели связаны с климатическими факторами и агрессивной окружающей средой, проблемами питающей сети, а также некорректной эксплуатацией электрооборудования. Некорректной эксплуатацией оборудования является несвоевременное проведение технического обслуживания и ремонта, а также изменение конструкции без согласования с заводом-изготовителем, неверное прогнозирование остаточного срока службы. Косвенное влияние на эксплуатационную надежность ЭО оказывают конструкционные, производственно-технологические причины потери работоспособности и естественный износ [6–9]. При дальнейшем анализе отказов ЭО троллейбуса было выявлено, что подавляющее большинство случаев потери работоспособности происходит в элементах электрического оборудования (649 случаев из 1045 за 2008–2012 гг.), как показано на рис. 1, б. Большую часть отказов электрического оборудования составляют отказы тяговых электрических двигателей троллейбуса, в результате они имеют наибольшие показатели надежности. Разработана модель эксплуатационной надежности для асинхронных тяговых электрических двигателей троллейбусов, которая учитывает надежность статора, ротора и подшипникового узла.

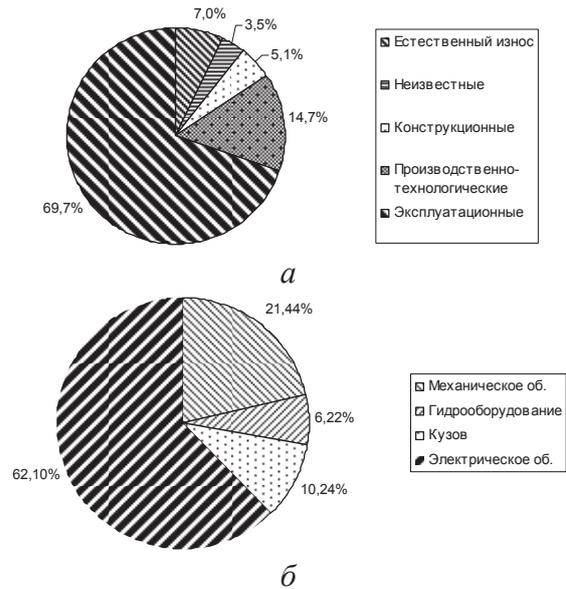


Рис. 1. а) диаграмма распределения причин потери способности элементов оборудования выполнять заданные функции; б) диаграмма распределения видов отказов оборудования во время эксплуатации

Разработанная математическая модель определяет количественные показатели надежности (ПН) описанных узлов асинхронного электрического двигателя. Для определения ПН использованы статистические методы определения надежности, основными начальными параметрами которых являются данные наработки на отказ исследуемых электрических двигателей за некоторый промежуток времени.

Согласно рекомендациям [10] для определения количественных показателей надежности, описанных выше, подходит нормальный закон распределения. На основе предельной теоремы нормальный закон распределения лучше отражает физику и имеет свою основу, в случае большого количества одинаково влияющих (не превалирующих) параметров. При возможных других законах распределения, и исходя из показателей, представленных в табл. 1, 2, принят нормальный закон распределения. В предлагаемой математической модели расчет показателей надежности производится для нормального, логнормального законов распределения, а также закона распределения Вейбулла.

Нормальная модель надежности подразумевает, что вероятность безотказной работы распределяется следующим образом:

$$P(t) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx,$$

где μ – математическое ожидание; σ – среднеквадратичное отклонение.

В логнормальной модели надежности вероятность безотказной работы распределяется по закону:

$$P(t) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu}{\sigma}\right)^2} dx,$$

где параметры μ и σ аналогичны параметрам нормального распределения.

Функция вероятности безотказной работы модели надежности Вейбулла имеет вид:

$$P(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta},$$

где β – параметр формы; η – параметр, определяющий масштаб распределения:

$$\eta = e^{-\frac{a}{b}},$$

$$\beta = b.$$

В свою очередь a и b определяются следующими выражениями:

$$a = \frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N y_i - b \sum_{i=1}^N x_i \right],$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i - \frac{\sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i}{N}}{\sum_{i=1}^N x_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^N x_i)^2}{N}}.$$

Точность вышеприведенных моделей оценивается с помощью коэффициента корреляции Пирсона [6]

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{P}(t_i) - \bar{P}) \cdot (P(t_i) - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (\hat{P}(t_i) - \bar{P})^2 \cdot \sum_{i=1}^N (P(t_i) - \bar{P})^2}},$$

где \bar{P} и \bar{P} – средние арифметические значения ВБР по результатам эксперимента и по одной из трех моделей надежности [11–15].

В табл. 1 представлены полученные ПН исследуемых элементов тягового электрического двигателя. Согласно представленным данным ротор тя-

гового двигателя имеет наименьшую наработку на отказ, что свидетельствует о малом количестве отработанных часов данного элемента по сравнению с остальными, а также подверженности разрушению. Нарботки на отказ статора и подшипникового узла почти одинаковы, что доказывает меньшую подверженность разрушениям в период эксплуатации. При этом показатели средней интенсивности отказов свидетельствуют о более частом выходе из строя подшипникового узла и ротора, по сравнению со статором, что противоречит общепринятой картине [16]. Также в данной таблице представлены функции распределения для каждого конкретного элемента и двигателя в целом.

В табл. 2 показаны параметры надежности и коэффициенты корреляции, полученные с помощью разработанной компьютерной модели. При анализе данных табл. 2 сделан вывод, что коэффициент корреляции нормального закона распределения для ротора ниже, чем при законе распределения Вейбулла, но в случае рассмотрения статора и подшипникового узла ситуация меняется в противоположную сторону. Сравнивая коэффициенты корреляции логнормального и нормального законов распределения, можно легко убедиться в точности нормального. Исходя из значений табл. 2 и особенностей нормального закона доказывается принятие за основу нормального закона распределения.

Следующим этапом исследования стала разработка компьютерной модели расчета ПН.

На рис. 2 представлен алгоритм компьютерной модели расчета показателей эксплуатационной надежности. Реализация компьютерной модели происходила в вычислительном комплексе Mathcad [17, 18].

Таблица 1. Количественные показатели надежности и функции распределения элементов тягового электрического двигателя троллейбуса

Элементы тягового электродвигателя	T_{cp} , ч	λ_{cp}	Функция распределения
Ротор	747,25	$2,08 \cdot 10^{-3}$	$f(x) = 5,663 \cdot 10^{-4} e^{-\frac{(x-747,25)^2}{9,926 \cdot 10^5}}$
Статор	987,92	$1,96 \cdot 10^{-3}$	$f(x) = 6,293 \cdot 10^{-4} e^{-\frac{(x-987,92)^2}{8,037 \cdot 10^5}}$
Подшипниковый узел	910,29	$2,10 \cdot 10^{-3}$	$f(x) = 5,741 \cdot 10^{-4} e^{-\frac{(x-910,28)^2}{9,657 \cdot 10^5}}$
Электрический двигатель в целом	816,94	$2,15 \cdot 10^{-3}$	$f(x) = 5,824 \cdot 10^{-4} e^{-\frac{(x-816,94)^2}{9,385 \cdot 10^5}}$

Таблица 2. Параметры моделей надежности и коэффициенты корреляции

Элементы тягового электродвигателя	Закон распределения								
	Вейбулла			Нормальный			Логнормальный		
	η	β	r	Σ	μ	r	Σ	μ	r
Ротор	794,39	0,916	0,9855	704,49	747,25	0,9554	1,405	6,078	0,9578
Статор	1158	1,151	0,9574	633,91	987,92	0,9840	1,143	6,577	0,9005
Подшипниковый узел	1028	0,96	0,9436	694,89	910,28	0,9747	1,363	6,360	0,8893
Электрический двигатель в целом	874,44	1,104	0,9905	685,01	816,94	0,9707	1,183	6,257	0,9579

Описание алгоритма:

1. Ввод исходных данных, реализованный путем чтения файла Excel с данными наработок на отказ, как только поступивших в эксплуатацию тяговых электродвигателей, так и вышедших после ремонта. Также оператору необходимо ввести значение для расчета гамма-процентной наработки и значение доверительной вероятности.
2. Анализ и обработка получившегося исходного массива данных, которая включает в себя определение среднего значения и стандартного отклонения. Рассчитанные значения являются основополагающими для дальнейших статистических расчетов.
3. Формирование массива данных для функции Median Rank, с помощью которой происходит вычисление всех представленных законов распределения. При использовании метода Median Rank необходимо взять все ранги, соответствующие каждому элементу, и расположить их в порядке неубывания. Затем вычислить для каждого элемента медиану – среднее арифметическое центральных членов вариационного ряда, и построить ранжировку согласно принципу – чем меньше ранг, тем предпочтительней элемент [19].
4. Расчет вспомогательных функций для нормального, логарифмически-нормального законов распределения и закона распределения Вейбулла.
5. Расчет точностных характеристик параметров, при котором происходит уточнение значений и определение границ применимости соответствующего закона.
6. Вывод количественного значения показателей надежности двигателя (вероятности безотказной работы, наработки на отказ, интенсивности отказа и т. д.), графиков функций распределения $P(t)$, $Q(t)$, $f(t)$, $\Lambda(t)$ и точностных характеристик параметров распределения.

Гистограмма, представленная на рис. 3, а, доказывает низкие показатели эксплуатационной надежности, а также изъяны производственно-технологической надежности на начальном этапе эксплуатации. Представленные на рис. 3, б, в, г характеристики распределения ВБР свидетельствуют о более точном определении зависимости нормального закона распределения и закона распределения Вейбулла, относительно фактических значений. На рис. 3 представлены распределения ВБР для электрического двигателя в целом. Учитывая происходящие физические процессы во время эксплуатации и беря во внимание коэффициенты корреляции статора, ротора и подшипникового узла, представленные в табл. 2, авторами принято решение о выборе нормального закона распределения как более точного для построения модели эксплуатационной надежности электрооборудования троллейбуса.

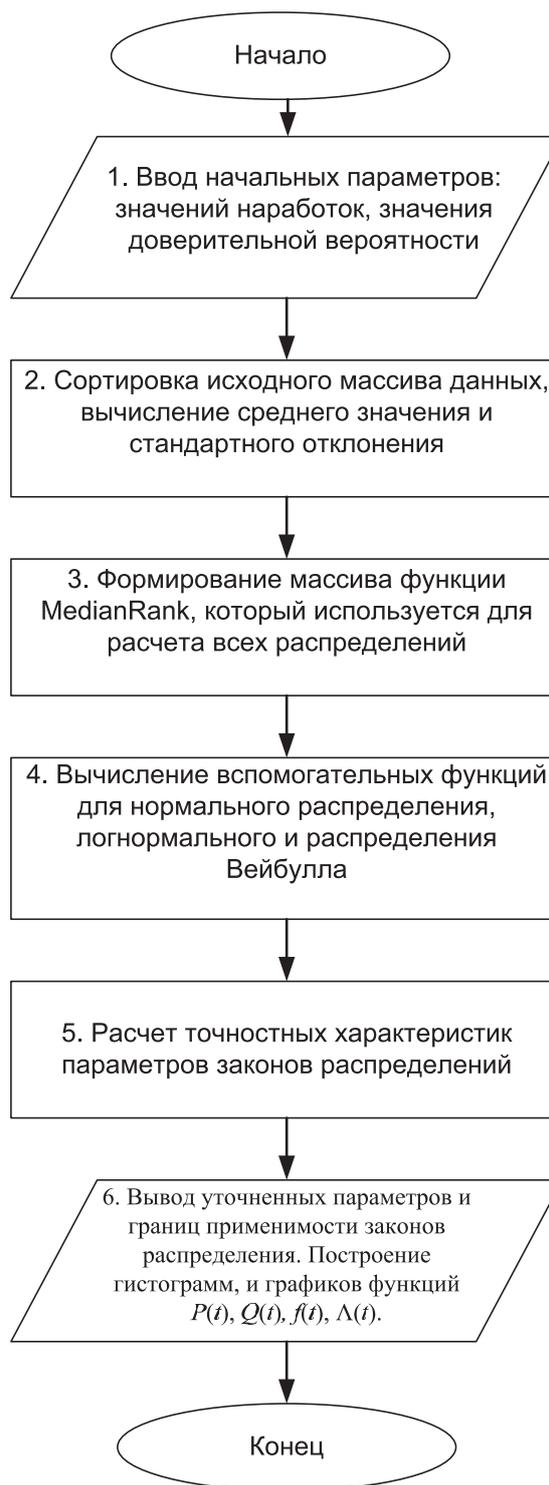


Рис. 2. Алгоритмы расчета показателей надежности

Выводы

1. Разработана компьютерная модель расчета количественных показателей эксплуатационной надежности тяговых электрических двигателей троллейбусов, позволяющая оценить как электрический двигатель в целом, так и ротор, статор и подшипниковый узел в отдельности.

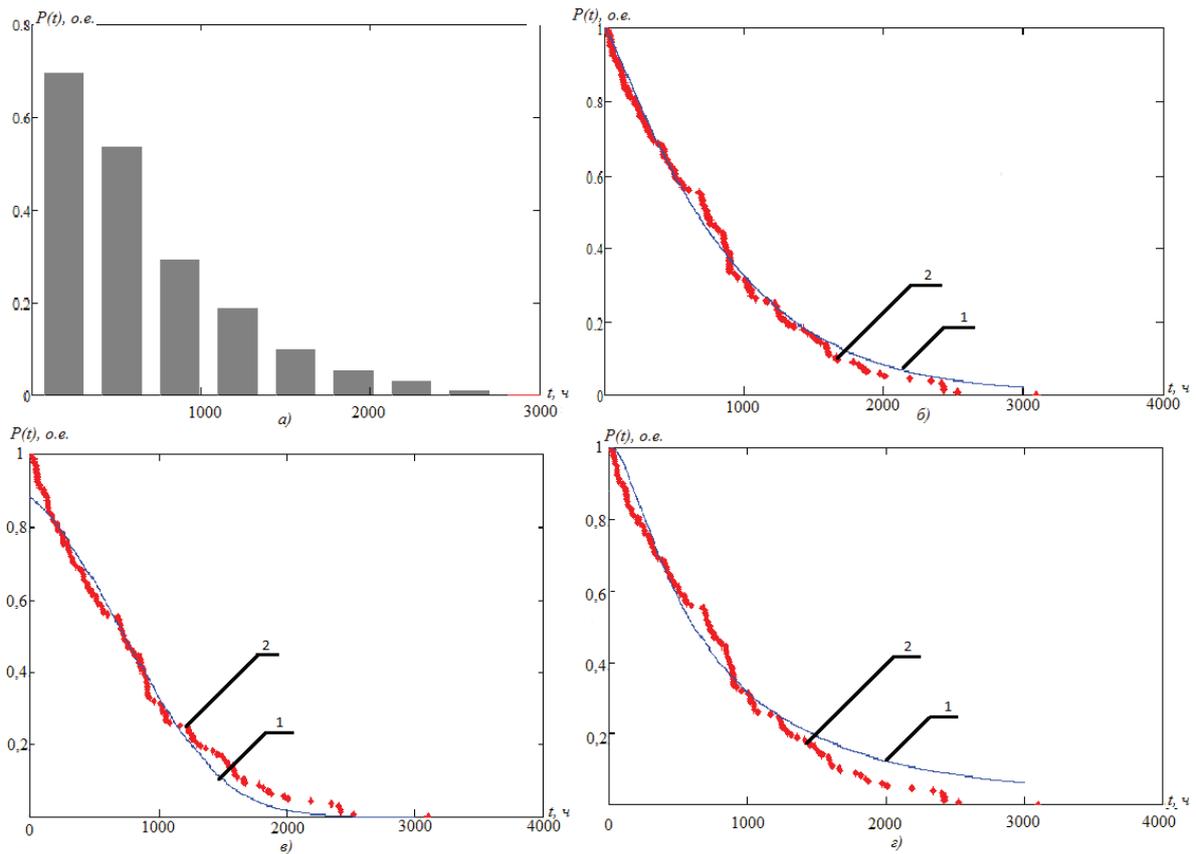


Рис. 3. Гистограмма и функция распределения вероятности безотказной работы (представлены для электрического двигателя в целом): а) гистограмма ВБР; б) функция ВБР – закона распределения Вейбулла; в) функция ВБР – нормальный закон распределения; г) функция ВБР – логнормальный закон распределения. 1 – теоретическое распределение вероятности безотказной работы; 2 – экспериментальное (расчетное) распределение вероятности безотказной работы

2. Представлена компьютерная модель количественной оценки показателей эксплуатационной надежности, с применением методов статистического анализа, для трех законов распределения: нормального, логнормального и закона распределения Вейбулла, обладающая высокой точностью. Алгоритм реализован в вычислительном комплексе Mathcad, позволяет облегчить и ускорить процесс анализа надежности тяговых электрических двигателей.
3. Получены законы распределения эксплуатационной надежности тяговых электрических двигателей троллейбусов, количественная оценка показателей наработки на отказ, интенсивности отказа.
4. Представленные данные использованы для создания программно-вычислительного комплекса количественной оценки показателей надежности тяговых электрических двигателей троллейбусов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Морозов А.А. Синий троллейбус // Рыбинские известия. – 2013. – № 2. – С. 3–4.
2. Метод и система определения надежности двигателя: пат. США № 6834256; заявл. 28.09.02; опубл. 31.05.04.
3. Дефорест Э. Управление двигателем и его надежностью // Энергия: Журнал детройтского научно-исследовательского института. – 2012. – Т. 124. – С. 14–15.
4. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. 2-е изд. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.
5. Михайлов И.Ю., Федянин А.Л. Особенности эксплуатации электрооборудования троллейбуса // Современные техника и технологии: Труды XVIII Междунар. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск, 2012. – Т. 1. – С. 425–426.
6. Колегаев Р.Н. Экономическая оценка качества и оптимизации системы ремонта машин. – М.: Машиностроение. 1980. – 239 с.
7. Селиванов А.И. Основы старения машин. – М.: Машиностроение, 1971. – 417 с.
8. Яманов С.А., Яманова Л.В. Старение, стойкость и надежность электрической изоляции. – М.: Энергоатомиздат, 1990 – 176 с.
9. Кузнецов Н.Л. Надежность электрических машин. – М.: Изд. дом МЭИ, 2006. – 432 с.
10. Острейковский В.А. Теория надежности. 2-е изд. – М.: Высш. шк., 2008. – 463 с.
11. Гусев В.В. Показатели безотказности электрических машин в реальных условиях эксплуатации алмазодобывающего комплекса // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. – № 4. – С. 178–183.

12. Ведяшкин М.В. Оценка технического состояния и надежности электрических машин в процессе эксплуатации // Электротехнические преобразователи энергии: Матер. Междунар. научно-техн. конф. – Томск, 17–19 октября 2007. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – С. 49–51.
13. Ведяшкин М.В. Сбор и анализ данных по эксплуатационной надежности асинхронных двигателей // XV Международная научно-практическая конференция СТТ. – Томск, 4–8 мая 2009. – Т. 1. – С. 377–378.
14. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Высшая школа, 2004. – 479 с.
15. Горский Л.К. Статистические алгоритмы исследования надежности. – М.: Наука, 1970. – 400 с.
16. Обеспечение надежности асинхронных двигателей / П.И. Захарченко, И.Г. Ширнин, Б.Н. Ванев, В.М. Гостищев. – Донецк: УкрНИИВЭ, 1998. – 324 с.
17. Макаров Е.С. Mathcad учебный курс. – М.: МИР, 2009. – 468 с.
18. Глушаков С.В., Жакин И.А., Хачиров Т.С. Математическое моделирование MathCAD 2000, MatLab5. – Харьков: Фолио: АСТ, 2001. – 524 с.
19. Ларичев О.И., Мошкович Е.М. Качественные методы принятия решений. – М.: Наука, 1996. – 206 с.

Поступила 04.12.2013 г.

UDC 621.333:004

DEVELOPMENT OF COMPUTER MODEL FOR CALCULATING QUANTITATIVE ASSESSMENT OF TRACTION ELECTRIC MOTOR TROLLEYBUS RELIABILITY

Ilya Yu. Mikhaylov,

Tomsk Polytechnic University,

Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 30. E-mail: mihaylov_ily@mail.ru

Oleg P. Muravlev,

Dr. Sc., Tomsk Polytechnic University,

Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 30. E-mail: mop@tpu.ru

Aleksandr L. Fedyanin,

Cand. Sc., Tomsk Polytechnic University,

Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 30. E-mail: feydanin@tpu.ru

The authors have analyzed the failures of 47 trolleybuses at the Tomsk tram-trolley department and have revealed that 69,7 % of failures are operational. More than half of them relates to the failure of the electrical equipment, the most important part of which is the traction electric motor trolley. The urgency of the discussed issue is caused by frequent failures of trolley traction motors and the need to develop a set of measures to ensure the required level of reliability.

The main aim of the study is to develop a mathematical model for statistical definition of quantitative assessment of operational reliability for traction electric motor trolley.

The methods used in the study: statistical methods for determining the quantitative assessment of operational reliability, the laws of distribution functions.

The results: The paper introduces the algorithm for determining the parameters of the mathematical model of operational reliability of trolley traction electric motor. The quantitative reliability indices of traction motor trolley, histogram and probability function of uptime normal, log-normal distribution law, and the law of the Weibull distribution were obtained by the proposed mathematical model.

Conclusions: For the first time the authors developed the computer model to calculate quantitative indicators of operational reliability of trolley traction electric motor, allowing estimating the electric motor as a whole, and the rotor, stator and bearings separately. The introduced and described computer model of quantitative assessment of operational reliability, using the methods of statistical analysis for three laws of distribution: normal, lognormal, and Weibull distribution law, is highly accurate. The algorithm is implemented in Mathcad and it can facilitate and expedite the reliability indicator identification and analysis of electric traction motor reliability. The authors obtained the distribution laws of operational reliability of trolleybus traction electric motors, quantitative estimation of time to failure, failure rate. The data given were used to develop the software and computing complex for quantitative assessment of trolleybus traction electric motor reliability.

Key words:

Trolleybus, reliability data, probability of no-failure operation, algorithm of determinate indicators reliability.

REFERENCES

1. Morozov A.A. Goluboy trolleybus [Blue trolley]. *Rybinskie izvestiya*, 2013, no. 2, pp. 3–4.
2. House M.B., Flickinger G.L. *Metod i sistema dlya opredeleniya nadezhnosti dvigatelya* [Method and system for determining motor reliability]. Patent USA, no. 6834256, 2004.
3. Deforest E. Upravlenie dvigatelem i ego nadezhnost [Managing motors and reliability]. *Energy: Detroit Institutes of Technology Scientific Magazines*, 2012, vol. 124, pp. 14–15.
4. Polovko A.M., Gurov S.V. *Osnovy teorii nadezhnosti* [Foundations of the reliability theory]. St. Petersburg, BHV-Peterburg, 2006. 704 p.

5. Mikhailov I.Yu., Fedyanin A.L. Osobennosti ekspluatatsii elektrooborudovaniya trolleybusa [Features of electrical trolley operation]. *Trudy XVIII mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Modern equipment and technology: Proc. XVIII Intern. scientific and practical. conf. graduate students and young scientists]. Tomsk, 2012. Vol.1, pp. 425–426.
6. Kolegaev R.N. *Economicheskaya otsenka kachestva i optimizatsii sistemy remonta mashin* [Economic evaluation of the quality and optimization of machine repairing system]. Moscow, Engineering, 1980. 239 p.
7. Selivanov A.I. *Osnovi stareniya mashin* [Basis of machine aging]. Moscow, Engineering, 1971. 417 p.
8. Yamanov S.A., Yamanova L.V. *Starenie, stoykost i nadezhnost elektricheskoy izolyatsii* [Aging, durability and reliability of the electrical insulation]. Moscow, Energoatomizdat, 1990. 176 p.
9. Kuznetsov N.L. *Nadezhnost elektricheskikh mashin* [Reliability of electrical machines]. Moscow, Publishing House MEI, 2006. 432 p.
10. Ostreikovskiy V.A. *Teoriya nadezhnosti* [Reliability Theory]. Moscow, Nauka, 2008. 463 p.
11. Gusev V.V. Pokazateli bezotkaznosti elektricheskikh mashin v realnykh usloviyakh ekspluatatsiialmazodobyvayushchego kompleksa [Indicators of reliability of electrical machines in actual use of diamond-mining complex]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol. 316, no. 4, pp. 178–183.
12. Vedyashkin M.V. Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya i nadezhnosti elektricheskikh mashin v protsesse ekspluatatsii [Evaluation of technical condition and reliability of electrical machines in operation]. *Electromekhanicheskie preobrazovateli energii. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Electromechanical energy converters. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference]. Tomsk, 2007. pp. 49–51.
13. Vedyashkin M.V. Sbor i analiz dannykh po ekspluatatsionnoy nadezhnosti asinkhronnykh dvigateley [Data collection and analysis of operational reliability for asynchronous motors]. *XV Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya STT* [Modern technique and technology. International scientific-practical conference]. Tomsk, 2009. pp. 377–378.
14. Gmurman V.E. *Teoriya veroyatnostey i metamaticheskaya statistika* [Probability theory and mathematical statistics]. Moscow, Vysshaya shkola, 2004. 479 p.
15. Gorskiy L.K. *Statisticheskie algoritmy issledovaniya nadezhnosti* [Statistical algorithms for reliability study]. Moscow, Nauka Publ., 1970. 400 p.
16. Zakharchenko P.I., Shirnin I.G., Beneev B.N., Gostishchev V.M. *Obespechenie nadezhnosti asinkhronnykh dvigateley* [Ensuring the reliability of induction motors]. Donetsk, UkrNIIVE, 1998. 324 p.
17. Makarov E.S. *Mathcad uchebnyy kurs* [Mathcad course]. Moscow, Mir, 2009. 468 p.
18. Glushakov S.V. *Matematicheskoe modelirovanie MathCAD 2000, MatLab5* [Mathematical modeling of MathCAD 2000, MatLab5]. Harkov, Folio: AST, 2001. 524 p.
19. Larichev O.I., Moshkovich E.M. *Kachestvennyye metody prinyatiya resheniy* [Qualitative methods of decision-making]. Moscow, Nauka, 1996. 206 p.