

УДК 621.3.049.7

DOI: 10.30987/1999-8775-2020-8-39-46

Е.В. Шищенко, А.В. Алексеев, В.Н. Новикова

РАЗРАБОТКА КОМПОЗИЦИОННОЙ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА ТРАМВАЙНЫХ ВАГОНОВ

Разработана методика оценки показателей надежности тяговых электродвигателей постоянного тока трамвайных вагонов. Решена задача построения адекватной модели оценки надежности элементов структуры системы, учитывающей межэлементные функциональные связи. Используются методы математической статистики, математического моделирования, теории вероятностей.

Полученные зависимости количественных показателей надежности элементов конструкции тяговых электродвигателей постоянного тока трамвайных вагонов указывают на изменение параметров при комплексном учете структурно-

функциональных схем. Согласно полученным результатам можно сделать выводы, что композиционная модель позволяет получить несмещенные оценки надежности элементов конструкции тяговых электродвигателей постоянного тока трамвайных вагонов и, соответственно, корректировать сроки планово-предупредительных ремонтов для снижения количества внеплановых ремонтов в конце срока эксплуатации.

Ключевые слова: оценка, надежность, электродвигатель, постоянный ток, структурно-функциональные связи, планово-предупредительный ремонт.

E.V. Shishchenko, A.V. Alexeev, V.N. Novikova

COMPOSITIONAL MODEL DEVELOPMENT OF DC DRIVE MOTOR RELIABILITY ESTIMATE FOR TRAM-CARS

The investigation purpose is to develop a method for the assessment of reliability values of dc drive motors for tram cars the life of which approaches its completion which will allow correcting the maintenance and repair system in order to decrease the number of sudden failures and hence the number of unscheduled repair operations. According to the available rolling-stock (trams) repair statistics, a considerable part of unscheduled repair works is determined by failures of dc drive motors.

Reasoning from the investigation purpose one of the problems consists in the development of the simulator allowing the accurate definition of quantitative characteristics of reliability during the operation. The operation reliability of dc drive motors of tram-cars is affected considerably by the interaction of design structure elements and it raises a question of combined structural-functional patterns use during the formation of a compositional simulator for reliability estimate.

The results obtained show that the account of structural-functional ties of dc drive motors design

elements in tram-cars during the simulator formation for reliability assessment allows obtaining more correct data for the definition of maintenance terms and repair works.

In such a way, the compositional model for reliability assessment of dc drive motors installed in tram-cars allows obtaining more exact dependences of their trouble-free operation probability that gives an opportunity to correct terms for scheduled-preventive repair, so that to decrease the number of sudden failures becoming more often, as it is seen in practice, at the approach of tram-car operation completion and decrease the number of unscheduled repair works.

The model offered for reliability assessment is urgent for the term correction of maintenance and repair works of tram-car dc drive motors the life of which comes to the completion and also for motors which run out of power.

Key words: estimate (assessment), reliability, electromotor, direct current, structural-functional ties, scheduled-preventive repair.

Введение

Тяговый электродвигатель постоянного тока представляет собой сложную многокритериальную систему, в состав ко-

торой входят элементы, имеющие разные ресурсы и оказывающие влияние на работоспособность двигателя в целом. Оценка

надежности тяговых электродвигателей постоянного тока трамвайных вагонов, срок службы которых приближается к завершению и уменьшению внеплановых ремонтов, является актуальной задачей.

Практикуемые в настоящее время методы оценки эксплуатационной надежности базируются на обобщенных математических моделях, учитывающих статистические данные, а также результаты испытаний на прочность и долговечность. При этом не точно отражаются параметры надежности тяговых электрических двигателей постоянного тока, что в большинстве случаев приводит к частым внеплановым ремонтам. Резкое проявление этой тенденции наблюдается при эксплуатации тяговых электродвигателей постоянного тока, срок службы которых заканчивается.

В опыте работы городского электрического транспорта часто наблюдается увеличение внеплановых ремонтов подвижного состава в стадии приближения окончания сроков эксплуатации подвижного состава. Встречаются случаи эксплу-

атации трамвайных вагонов и установленного на них электросилового оборудования, в том числе тяговых электродвигателей, выработавших свой ресурс. Как подтверждают исследования [2, 3, 6, 7], а также опытные данные, дальнейшая эксплуатация подвижного состава, выработавшего свой ресурс с обеспечением требуемого уровня безопасности возможна, если соответствующим образом скорректировать систему планово-предупредительного ремонта. Оптимизация системы технического обслуживания и ремонтов позволяет снизить количество внезапных отказов оборудования трамвайных вагонов, участвующих при приближении окончания срока эксплуатации.

Для точной коррекции системы планово-предупредительных ремонтов представляется рациональным использование математической модели оценки надежности, учитывающей структурно-функциональные связи элементов, их геометрические параметры, позволяющей получать несмещенные параметры.

Методологические основы построения композиционной модели оценки надежности

Для получения адекватной модели оценки надежности тяговых электродвигателей постоянного тока, устанавливаемых на трамвайных вагонах, выполнены теоретические исследования, обработка статистических данных, а также проведен анализ оценки параметров законов распределения постепенных и внезапных отказов деталей в процессе эксплуатации. Согласно проверке статистических гипотез [1, 2, 10], плотность распределения наработки на отказ элементной базы тяговых электродвигателей постоянного тока в достаточной мере описывается нормальным законом. Однако анализ полученных данных по эксплуатации показал, что принимаемые статистические гипотезы дают адекватные оценки эмпирических функций лишь для небольшой группы элементов тяговых электродвигателей постоянного тока: обмотки главных полюсов, обмотки якоря, вала якоря, сердечника якоря. Но и для этих элементов, благодаря влиянию неуправляемых и неконтролируемых факторов, возникают значительные погрешно-

сти (некоторые достигают 22 %), которые вносят значительные отклонения в методику оценки надежности.

Обзор имеющихся вероятностно-статистических характеристик функций распределения отказов отдельных элементов конструкции тяговых электродвигателей постоянного тока показал, что отказы, обусловленные износом части элементов релевантно описываются посредством аппроксимации ассиметричных распределений.

Учитывая, что тяговый электродвигатель постоянного тока является сложной электромеханической системой, функционирование которой в значительной мере определяется относительным расположением друг к другу узлов и деталей, отклонение от регламентируемых параметров приводит к нарушениям в работе двигателя и возникновению аварийных ситуаций. В зависимости от вида связей в структуре двигателя постоянного тока различают несколько классов элементов, которые в свою очередь делятся на соответствующие

подклассы [9]. Для устранения возникающих ошибок целесообразно применять усеченную нормальную функцию распределения отказов элементов с учетом конструктивных связей, которая позволит повысить точность моделей.

Композиционная модель надежности позволяет рассматривать влияние конструктивных связей элементов структуры двигателей на возникновение отказов и возможное устранение факторов или предупреждение их воздействия, вызывающих эти отказы.

Нахождение параметров усеченного нормального распределения по заданному математическому ожиданию, с учетом конструктивных связей элементов [9], можно выполнить следующим образом.

Полагая, что плотность усеченного нормального распределения выражается как

$$p(x) = \exp\left[-\frac{(x-a)^2}{2G^2}\right], x > 0, \quad (1)$$

а стандартное нормальное распределение с параметром 0,1 имеет вид:

$$f_0(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^U e^{-\frac{t^2}{2}} dt, \quad (2)$$

то функцию распределения можно выразить как

$$F(x) = 1 - \frac{f_0\left(\frac{d-x}{\sigma}\right)}{f_0\left(\frac{d}{\sigma}\right)}. \quad (3)$$

Для нахождения параметров усеченного нормального распределения с учетом

конструктивных связей элементов составим систему уравнений:

$$\begin{cases} M\varepsilon(d, \sigma) = S_i^j, \\ M\varepsilon^2(d, \sigma) = S(\sigma_i^j + S_i^j), \end{cases} \quad (4)$$

где $\varepsilon(d, \sigma)$ – случайная величина, соответствующая некоторому времени наработки на отказ; S_i^j – средняя наработка до первого отказа i -го элемента, имеющего j -е количество конструктивных связей; σ_i^j – дисперсия до первого отказа i -го элемента, имеющего j -е количество конструктивных связей; $M\varepsilon$ – среднее усеченное нормальное распределение; $M\varepsilon^2$ – дисперсия среднего нормального усеченного распределения.

Учет конструктивных связей каждого элемента структуры системы изменяет корреляционную связь факторного и базисного пространств, опциально отражая мультиколлинеарность между факторами и видами отказов.

Решение системы уравнений (4) позволяет вычислить вероятность отказа каждого из элементов структуры с учетом его классификации по связям с другими элементами по формуле:

$$p_i = \frac{f_0\left(\frac{d-T^j}{\sigma}\right)}{f_0\left(\frac{d}{\sigma}\right)}. \quad (5)$$

Для определения среднего усеченного нормального распределения запишем уравнение:

$$M\varepsilon(d, \sigma) = \int_{-\infty}^0 x \frac{e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}}}{\sigma\sqrt{2\pi}f_0\left(\frac{d}{\sigma}\right)} dx = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}f_0\left(\frac{d}{\sigma}\right)} \int_{-\infty}^0 x e^{-\frac{(x-d)^2}{2\sigma^2}} dx. \quad (6)$$

Введем обозначение:

$$\frac{x-d}{\sigma} = -t.$$

Тогда:

$$\begin{aligned} M\varepsilon(d, \sigma) \int_{-\infty}^0 \frac{\sigma}{\sigma\sqrt{2\pi}f_0\left(\frac{d}{\sigma}\right)} (d - \sigma t) e^{-\frac{t^2}{2}} dt + \frac{1}{\sqrt{2\pi}f_0\left(\frac{d}{\sigma}\right)} \int_{-\infty}^0 (d - \sigma t) e^{-\frac{t^2}{2}} dt = \frac{d}{f_0\left(\frac{d}{\sigma}\right)} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^0 e^{-\frac{t^2}{2}} dt + \\ + \frac{1}{\sqrt{2\pi}f_0\left(\frac{d}{\sigma}\right)} \int_{-\infty}^0 t e^{-\frac{t^2}{2}} dt = d + \frac{\sigma e^{-\frac{d^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi}f_0\left(\frac{d}{\sigma}\right)}. \end{aligned} \quad (7)$$

Дисперсия среднего нормального усеченного распределения:

$$M\varepsilon^2(d, \sigma) = \int_{-\infty}^0 x^2 p(x) dx \int_{-\infty}^0 x^2 \frac{e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}}}{\sigma\sqrt{2\pi}f_0\left(\frac{d}{\sigma}\right)} dx. \quad (8)$$

Решение интеграла имеет вид:

$$M\varepsilon^2(d, \sigma) = d^2 + \frac{d\sigma e^{-\frac{d^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi}f_0\left(\frac{d}{\sigma}\right)} + \sigma^2. \quad (9)$$

На основании (9) составим систему уравнений, решение которых позволит определить параметры усеченного нормального распределения:

$$\begin{cases} d + \frac{d\sigma e^{-\frac{d^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi}f_0\left(\frac{d}{\sigma}\right)} - S_i^j \lambda = 0; \\ d^2 + \frac{d\sigma e^{-\frac{d^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi}f_0\left(\frac{d}{\sigma}\right)} - S_i^j (\lambda^2 - \sigma^2) = 0. \end{cases} \quad (10)$$

Для определения вероятности отказа примем, что:

$$\begin{cases} F_1(d, \sigma) = d + \frac{d\sigma e^{-\frac{d^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi}f_0\left(\frac{d}{\sigma}\right)} - S_i^j \lambda; \\ F_2(d, \sigma) = d^2 + \frac{d\sigma e^{-\frac{d^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi}f_0\left(\frac{d}{\sigma}\right)} - S_i^j (\lambda^2 - \sigma^2). \end{cases} \quad (11)$$

Для решения системы уравнений (11) следует вычислить частные производные:

$$\frac{dF_1}{dd}, \frac{dF_1}{d\sigma}, \frac{dF_2}{dd}, \frac{dF_2}{d\sigma}.$$

Решение для первой частной производной будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \frac{dF_1(d, \sigma)}{dd} &= 1 + \frac{\left(-\sigma e^{-\frac{d^2}{2\sigma^2}}\right)\left(\frac{d^2}{\sigma^2}\right)f\left(\frac{d}{\sigma}\right) - \sigma e^{-\frac{d^2}{2\sigma^2}} \cdot \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{d^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi}f_0^2\left(\frac{d}{\sigma}\right)} = \\ &= 1 - \frac{\frac{d}{\sigma} e^{-\frac{d^2}{2\sigma^2}}\left(\frac{d}{\sigma}\right)f\left(\frac{d}{\sigma}\right) + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{d^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi}f_0^2\left(\frac{d}{\sigma}\right)}. \end{aligned} \quad (12)$$

Для второй частной производной решение имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{dF_1(d, \sigma)}{d\sigma} &= \frac{\left(e^{-\frac{d^2}{2\sigma^2}} + \sigma e^{-\frac{d^2}{2\sigma^2}}\left(\frac{d^2}{\sigma^2}\right)\right)f\left(\frac{d}{\sigma}\right) + \sigma e^{-\frac{d^2}{2\sigma^2}}\left(\frac{d^2}{\sigma^2}\right) \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{d^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi}f_0^2\left(\frac{d}{\sigma}\right)} = \\ &= \frac{\sigma e^{-\frac{d^2}{2\sigma^2}}\left(\frac{d^2}{\sigma^2}\right)\left(1 + \frac{d^2}{\sigma^2}\right)f\left(\frac{d}{\sigma}\right) + \frac{d}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{d^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi}f_0^2\left(\frac{d}{\sigma}\right)}. \end{aligned} \quad (13)$$

Третья частная производная имеет решение:

$$\begin{aligned} \frac{dF_2(d, \sigma)}{dd} &= 2d + \frac{\left(\sigma e^{-\frac{d^2}{2\sigma^2}} - \sigma e^{-\frac{d^2}{2\sigma^2}} \cdot \left(\frac{d^2}{\sigma^2} \right) \right) - \sigma e^{-\frac{d^2}{2\sigma^2}} \cdot \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{d^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi} f_0^2 \left(\frac{d}{\sigma} \right)} = \\ &= 2d + \frac{e^{-\frac{d^2}{2\sigma^2}} \left(\sigma - \frac{d^2}{\sigma^2} \right) f_0 \left(\frac{d}{\sigma} \right) - \frac{d}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{d^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi} f_0^2 \left(\frac{d}{\sigma} \right)}. \end{aligned} \quad (14)$$

Решение четвертой производной будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \frac{dF_2(d, \sigma)}{dd} &= \frac{\left(d e^{-\frac{d^2}{2\sigma^2}} + d \sigma e^{-\frac{d^2}{2\sigma^2}} \cdot \left(\frac{d^2}{\sigma^2} \right) \right) f \left(\frac{d}{\sigma} \right) + \frac{d^2}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{d^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi} f_0^2 \left(\frac{d}{\sigma} \right)} + 2\sigma = \\ &= \frac{e^{-\frac{d^2}{2\sigma^2}} \left(d + \left(\frac{d^2}{\sigma^2} \right) \right) f \left(\frac{d}{\sigma} \right) + \frac{d^2}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{d^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi} f_0^2 \left(\frac{d}{\sigma} \right)} + 2\sigma. \end{aligned} \quad (15)$$

Для выполнения итерационного расчета полученные значения частных производных следует подставить в матрицу Якоби [3]. Выполняется итерационный

расчет для элементов конструкции тягового электродвигателя. Полученные параметры усеченного нормального распределения вводятся в схему надежности ТЭД.

Результаты исследований

По предложенной методике оценки параметров надежности можно определить количественные характеристики внезапных и релаксационных отказов с учетом износа деталей. Положенная в основу методики композиционная модель тягового электродвигателя постоянного тока учитывает, как характеристики эксплуатации, так и свойства элементов конструкции, а также их функциональные особенности и влияние на них конструктивных связей. Для сравнения на рис. 1 приведены графические зависимости надежности якоря тягового электродвигателя постоянного тока ТЕ-022, устанавливаемого на трамвайных вагонах Т-3, полученные на основании классической и предлагаемой композиционной моделей. При этом учитывалась специфика эксплуатации (эксплуатационные режимы, условия эксплуатации, средне-

суточный пробег трамвайных вагонов). Кривая 1 представляет собой зависимость вероятности безотказной работы $P(t)$ якоря тягового электродвигателя от пробега ($t \cdot 10^6$ км) трамвайного вагона при расчетах по классической методике, кривая 2 – зависимость вероятности безотказной работы $P(t)$ якоря тягового электродвигателя от пробега ($t \cdot 10^6$ км) трамвайного вагона при расчетах с учетом единичных элементов ТЭД, кривая 3 – зависимость вероятности безотказной работы $P(t)$ якоря тягового электродвигателя от пробега ($t \cdot 10^6$ км) трамвайного вагона на базе функциональной схемы, кривая 4 – зависимость вероятности безотказной работы от пробега при расчетах с учетом деталей, конструктивных соединений и геометрических установочных размеров.

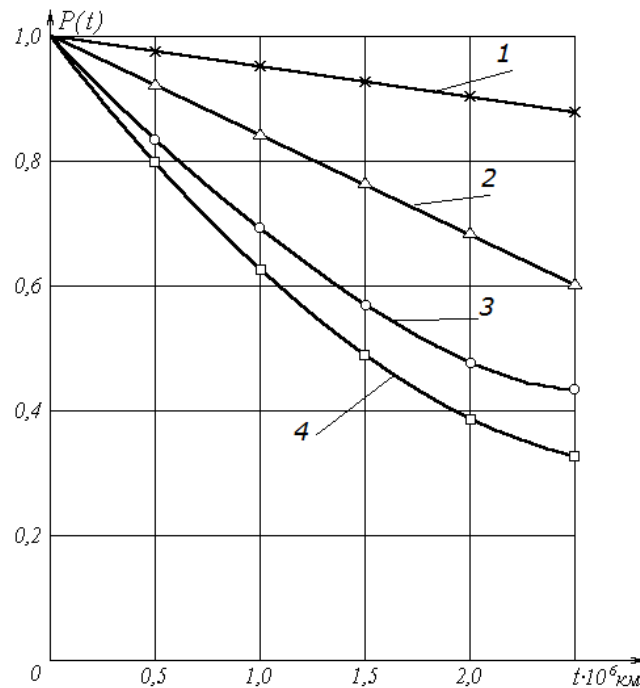


Рис. 1. Надежность якоря тягового электродвигателя TE-022 трамвайных вагонов Т-3

Анализ графиков показывает, что вероятность безотказной работы при учете структурно-функциональных особенностей якоря значительно отличается от графика, полученного по стандартной методике. Таким образом, один и тот же узел конструкции тягового электродвигателя постоянного тока трамвайного вагона с заданными свойствами элементов имеет относительно большой разброс характеристик ресурса, что приводит к изменению количества внезапных отказов. Аналогичные результаты были получены и для других элементов конструкции тяговых двига-

телей постоянного тока трамвайных вагонов.

Внезапные отказы в ряде случаев обуславливаются постепенными отказами. В результате исследований был установлен высокий уровень дисперсии постепенных отказов тяговых электродвигателей постоянного тока трамвайных вагонов.

Композиционная модель оценки надежности элементов системы позволяет в процессе эксплуатации корректировать параметры надежности, как отдельных узлов, так и двигателя в целом.

Заключение

Проблемы рациональной коррекции сроков технического обслуживания и ремонтов трамвайных вагонов в процессе эксплуатации с соответствующим уменьшением количества внеплановых ремонтов обусловлена многими факторами, одним из которых является выбор правильной модели оценки надежности. Надежность подвижного состава обеспечивается безотказной работой его отдельных узлов и деталей, и одним из ключевых его узлов является тяговый электродвигатель. В настоящее время большое количество трамвай-

ных вагонов работают на тяговых двигателях постоянного тока, особенностью которых является сложность конструкции, которая во многом обуславливает вероятность безопасной работы.

На эксплуатационную надежность тяговых двигателей постоянного тока значительное влияние оказывают особенности структуры узлов и функциональные связи отдельных элементов конструкции, что не позволяет однозначно определить ресурс тягового двигателя постоянного тока трамвайных вагонов. Классические мето-

дики определения надежности дают весьма приблизительную оценку, благодаря чему в процессе эксплуатации зачастую проводят внеплановые ремонты. При приближении завершения срока эксплуатации увеличивается количество внеплановых ремонтов.

Проблема обеспечения требуемой надежности и проведения внеплановых ремонтов усугубляется по приближению окончания срока эксплуатации, а также в случаях продолжения эксплуатации ТЭД после установленного срока службы. Как показывает практика ТЭД, выработавшие свой ресурс, можно эксплуатировать еще какое-то время при техническом обслуживании и ремонте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляев Ю.К. Статистические методы обработки результатов испытаний на надежность. М.: Знание, 1982. 109 с.
2. Бурков А. Ф., Катаев Е. В., Кувшинов Е. Г., Чупина К. В. Анализ надежности электродвигателей, используемых в современных электроприводах // *Электроника и электротехника*. 2017. № 1. С. 1-6.
3. Водолазов В.Н. Обоснование системы планово-предупредительного ремонта электродвигателей трамваев, выработавших свой ресурс: дисс... канд. техн. наук. Казань, 2004. 127 с.
4. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин: учеб. для вузов. М.: Выс. шк. 1994. 327 с.
5. Лившиц П.С., Еремин А.А. Количественная оценка скорости изнашивания щеток электрических машин постоянного тока. М.: Электротехника, 1980. 83 с.
6. Раствунин Д.В. Разработка методов расчета эксплуатационной надежности коллекторов тяговых электрических машин постоянного тока:

Композиционная модель оценки надежности тяговых электродвигателей постоянного тока трамвайных вагонов базируется на структурно-функциональных схемах, отражающих широкий диапазон требований, предъявляемых к ним. Следует отметить, что представляемую композиционную модель можно считать универсальной. Она позволяет оптимизировать параметры надежности не только тяговых двигателей постоянного тока, устанавливаемых на трамвайных вагонах, но и других узлов подвижного состава и скорректировать соответствующим образом систему планово-предупредительных ремонтов.

автореф. дисс... канд. техн. наук. Казань, 2010. 24 с.

1. Belyaev Yu.K. *Statistical Methods for Processing Results of Reliability Tests*. M.: Knowledge, 1982. 109 p.
2. Burkov A.F., Kataev E.V., Kuvshinov E.G., Chupina K.V. Reliability analysis of electro-motors used in modern electro-drives // *Electronics and Electrical Engineering*. 2017. No.1. pp. 1-6.
3. Vodolozov V.N. Substantiation for system of scheduled-preventive repair of tram-car electro-motors exhausted their life: *Thesis for Can. Sc. Tech. Degree*. Kazan, 2004. pp. 127.
4. Kopylov I.P. *Electric Machine Simulation: college textbook*. M.: Higher School. 1994. 327 p.

7. Тимашев С.А. Надежность больших механических систем. М.: Наука, 1982. 184 с.
8. Шищенко Е.В., Водолазов В.Н., Руцкий В.М., Шепелин П.В. Разработка метода оценки надежности работы тяговых электродвигателей с целью оптимизации системы планово-предупредительного ремонта трамвайных вагонов, выработавших свой ресурс // *Вестник Самарского государственного университета путей сообщения*. 2016. №1. С. 51-55.
9. Шищенко Е.В., Водолазов В. Н., Алексеев А.В. Разработка математической модели оценки надежности тягового электрического двигателя постоянного тока на основе свойств конструкции // *Вестник Самарского государственного университета путей сообщения*. 2017. № 1. С. 40-46.
10. Шкляр В.Н. Надежность систем управления: учеб. пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического ун-та, 2009. 298 с.

5. Livshits P.S., Yeryomin A.A. Quantitative assessment of brush wear rate of dc electric machines. M.: *Electric Engineering*, 1980. 83 p.
6. Rastunin D.V. Development of methods for calculation of operation reliability of dc drive motor collectors: *Author's Abstract for Can. Sc. Tech. Degree*. Kazan, 2010. pp. 24.
7. Timashev S.A. *Reliability of Large Engineering Systems*. M.: Science, 1982. 184 p.
8. Shishchenko E.V., Vodolozov V.N., Rutsky V.M., Shepelin P.V. Development of method for reliability assessment of drive motor operation for system optimization of scheduled-preventive repair of tram-cars exhausted their life // *Bulletin of Samara*

State University of Communications. 2016. No.1. pp. 51-55.

9. Shishchenko E.V., Vodolazov V.N., Alexeev A.V. Simulator development for reliability assessment of dc drive electromotor based on design properties //

Bulletin of Samara State University of Communications. 2017. No.1. pp. 40-46.

10. Shklyar V.N. *Reliability of Control Systems*: manual. Tomsk: Tomsk Polytechnic University Publishers, 2009. 298 p.

Ссылка для цитирования:

Шищенко Е.В., Алексеев А.В., Новикова В.Н. Разработка композиционной модели оценки надежности тяговых электродвигателей постоянного тока трамвайных вагонов // Вестник Брянского государственного технического университета. 2020. № 8. С. 39 - 46. DOI: 10.30987/1999-8775-2020-8-39-46.

Статья поступила в редакцию 13.05.20.

Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета

Кобищанов В.В.,

член редсовета журнала «Вестник БГТУ».

Статья принята к публикации 22.07.20.

Сведения об авторах:

Шищенко Елена Вячеславовна, к.п.н., доцент кафедры «Электрический транспорт», Самарский государственный университет путей сообщения, тел.: 8-927-60-10-526, e-mail: makeeva-ev@mail.ru.

Алексеев Антон Владимирович, к.т.н., доцент, доцент кафедры «Наземные транспортно-технологические средства», Самарский государ-

ственный университет путей сообщения, e-mail: antonvladim@mail.ru.

Новикова Вера Николаевна, к.т.н., доцент, доцент кафедры «Наземные транспортно-технологические средства», Самарский государственный университет путей сообщения, e-mail: oco@samgups.ru.

Shishchenko Elena Vyacheslavovna, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. "Electric Transport", Samara State University of Communications, phone: 8-927-60-10-526, e-mail: makeeva-ev@mail.ru.

Alexeev Anton Vladimirovich, Can. Sc. Tech., Assistant Prof., Assistant Prof. of the Dep. "Land Transport-

Technological Means", Samara State University of Communications, e-mail: antonvladim@mail.ru.

Novikova Vera Nikolaevna, Can. Sc. Tech., Assistant Prof., Assistant Prof. of the Dep. "Land Transport-Technological Means", Samara State University of Communications, e-mail: oco@samgups.ru.