

УДК 621.37

## «КРИВАЯ ЖИЗНИ» СТАТОРНЫХ ОБМОТОК АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ЛИФТОВ

**Шпет Наталья Анатольевна,**

аспирант кафедры электромеханических комплексов и материалов  
Энергетического института Томского политехнического университета,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: Shpet\_Natalya@sibmail.com

**Муравлёв Олег Павлович,**

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

Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения эксплуатационной надёжности статорных обмоток двухскоростных асинхронных двигателей, устанавливаемых в основной привод лифтов жилых домов, отказы которых влекут за собой длительный простой и являются достаточно дорогостоящими по исправлению.

**Цель работы:** оценка надёжности статорных обмоток асинхронных двигателей для лифтов по результатам информации об отказах, полученных в процессе их эксплуатации, выбор с помощью критериев согласия моделей надёжности и построение «кривой жизни».

**Методы исследования:** Поставленная в работе цель достигалась при помощи вероятностно-статистического метода, предусматривающего сбор и анализ статистической информации и использующего теоремы теории вероятностей и математической статистики, а также пакетов прикладных программ Word, Excel, MathCAD.

**Результаты:** Исследованы отказы статорных обмоток асинхронных двигателей для лифтов. На их основе сформирован исходный массив данных, состоящий из наработок статорных обмоток асинхронных двигателей для лифтов до отказа и до цензурирования. В качестве моделей эксплуатационной надёжности рассмотрены: нормальная, экспоненциальная, логарифмически-нормальная и модель Вейбулла. Разработана программа оценки эксплуатационной надёжности в математическом редакторе MathCAD, позволяющая построить эмпирические распределения с последующим расчетом по ним параметров теоретических распределений и показателей надёжности. С помощью коэффициента корреляции между эмпирическим и теоретическим распределением осуществлен выбор более объективной модели надёжности. Построена «кривая жизни» статорных обмоток асинхронных двигателей для лифтов, которая в дальнейшем может быть использована для разработки наиболее эффективной системы технического обслуживания и ремонта.

### **Ключевые слова:**

Асинхронный двигатель, пассажирский лифт, лебедка, эксплуатационная надёжность, отказ, цензурированная выборка, обмотки статора, законы распределения отказов, вероятность безотказной работы.

Высокий уровень надёжности лифта на начальном этапе эксплуатации еще не гарантирует его высокой эффективности в процессе всей эксплуатации, так как надёжность и долговечность работы обеспечивается не только качеством изготовления и монтажа, но и проведением различных мероприятий для своевременного предупреждения и оперативного устранения возможных отказов и неисправностей, позволяющих повысить уровень надёжности элементов лифта на всех этапах его эксплуатации.

Конструкция пассажирского лифта состоит из довольно большого числа элементов, которые должны обеспечить надёжную работу при эксплуатации [1–3]. С целью определения узлов, наиболее часто выходящих из строя, был выполнен анализ отказов выборки, состоящей из 446 тихоходных пассажирских лифтов грузоподъемностью до 400 кг, установленных в период с 1986 по 2011 гг. в жилых домах этажностью от 5 до 17 [4]. Исследуемые лифты оборудованы редукторными лебедками, в состав которых входят двухскоростные асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутым ротором. В обмотку статора АД вмонтированы датчики температурной защиты. Большая часть данных получена с помощью устройств управления, которые контролируют состояние лифтов. При возник-

новении неисправности система автоматически определяет характер отказа, высвечивая на индикаторе код ошибки и записывая его в память.

Исследования показали, что максимальное количество отказов приходится на три узла: кабину лифта с приводом дверей – 39,5 %, двери шахты – 22,6 % и лебедку – 15,6 %. Наиболее надёжными элементами лебедки являются редуктор – 2 % и канатоведущий шкив – 1 %. Отказы тормозной системы составляют 48 %, коммутирующей аппаратуры – 39 %, отказы АД – 10 %.

Выходы из строя АД влекут за собой длительный простой лифтов и являются достаточно дорогостоящими по исправлению. Причиной затрат времени и средств на восстановительные работы служит не столько сложность двигателей, сколько их масса. Большинство отказов невозможно устранить в машинном помещении, требуется транспортирование на ремонтный участок. Также установлено, что чаще всего отказы лифтовых АД происходят из-за повреждения обмоток статора [5]. Следовательно, обоснование средств и методов повышения их эксплуатационной надёжности является актуальной задачей.

Оценку эксплуатационной надёжности (ЭН) асинхронных двигателей для лифтов следует про-

водить вероятностно-статистическим методом, так как он дает точную оценку характеристик надежности [6]. Данный метод использует:

- математическую статистику, предусматривающую сбор и анализ статистической информации;
- теоремы теории вероятностей, что дает возможность обработать статистические данные об отказах и получить адекватные модели надежности.

При этом отказы рассматриваются как некоторые отвлеченные случайные события, а многообразные физические состояния элементов сводятся к двум состояниям – исправное и неисправное.

Для реализации указанного метода сформирован массив исходных данных, состоящий из случайных величин  $t_1, t_2, \dots, t_n$ , которые являются независимыми друг от друга [7–9]. В качестве случайной величины используется наработка в соответствии с ГОСТ 27.002–89 [10]. Двигатели для привода лифтов работают в периодическом повторно-кратковременном режиме с частыми пусками и электромагнитным торможением, а во время перерывов подвергаются воздействиям окружающей среды, при этом происходит ухудшение изоляции и пропиточных материалов статорных обмоток. Появившиеся микротрещины увеличивают электропроводность изоляции, приводя к межвитковым замыканиям в обмотке. Таким образом, наработка определяется как календарная продолжительность эксплуатации, включающая время полезного функционирования и перерывы.

Информация об отказах статорных обмоток лифтовых АД в нашем случае известна на интервале трех лет (декабрь 2010 – декабрь 2013 гг.), остальное время эксплуатации представляет собой интервалы неопределенности, другими словами, исходные данные являются цензурированными наработками [11]. Кроме того, данное цензурирование многократное, так как наработки обмоток ограничены разным временем начала эксплуатации и отказами по причине выхода из строя других элементов двигателя.

Вышеуказанная выборка разбита на пять групп (табл. 1–5), которые состоят из АД, установленных в различные временные периоды (гг.):

- 1986–1990;
- 1990–1995;
- 1995–2000;
- 2000–2005;
- 2005–2011.

Статистическая информация для каждой из групп двигателей рассматривалась независимо друг от друга.

С целью обработки полученного массива исходных данных разработана программа для оценки ЭН в редакторе MATHCAD, алгоритм которой представлен на рис. 1. Основной алгоритм служит расчет параметров моделей надежности, так как без них невозможен анализ цензурированных выборок. Математический пакет MATHCAD выбран для создания программы в виду своей наглядности и отсутствия требований сначала писать программу, реализующую те или иные математические

расчеты, а потом запускать ее в исполнение. Вместо этого, с помощью встроенного редактора формул, математические выражения вводятся в виде, максимально приближенном к общему виду в офисных приложениях WINDOWS, одновременно с получением результата. Кроме того, MATHCAD обладает обширной библиотекой встроенных функций, необходимых для статистического и вероятностного анализа [12–14].

**Таблица 1.** Нарботка статорных обмоток АД, установленных в 1986–1990 гг.

**Table 1.** Operation time of windings of asynchronous motor (AM) installed in 1986–1990

№ лифта Elevator	Отказ Failure	Нарботка, ч Operation time, h	№ лифта Elevator	Отказ Failure	Нарботка, ч Operation time, h
1	есть yes	26150	16	есть yes	1305
2		14131	17		18394
3		22232	18		20997
4		23332	19		14470
5		20151	20		12349
6		25265	21		8152
7		232	22		12069
8		26220	23		1450
9		24737	24		21467
10		6238	25		13365
11		4298	26		12470
12		18540	27		3609
13		10018	28		16483
14		9232	29		нет no
15	22328	30-96	нет no	26232	

**Таблица 2.** Нарботка статорных обмоток АД, установленных в 1990–1995 гг.

**Table 2.** Operation time of windings of AM installed in 1990–1995

№ лифта Elevator	Отказ Failure	Нарботка, ч Operation time, h	№ лифта Elevator	Отказ Failure	Нарботка, ч Operation time, h
1	есть yes	26230	8	есть yes	16594
2		2232	9		14640
3		25232	10		12660
4		1281	11	нет no	16569
5		8337	12		14586
6		8963	13-89		26232
7		12204			

**Таблица 3.** Нарботка статорных обмоток АД, установленных в 1995–2000 гг.

**Table 3.** Operation time of windings of AM installed in 1995–2000

№ лифта Elevator	Отказ Failure	Нарботка, ч Operation time, h	№ лифта Elevator	Отказ Failure	Нарботка, ч Operation time, h
1	есть yes	26040	7	есть yes	13312
2		9523	8		18042
3		20265	9	нет no	2722
4		16099	10		9635
5		15523	11		13073
6		4193	12-70		26232

**Таблица 4.** Нарботка статорных обмоток АД, установленных в 2000–2005 гг.

**Table 4.** Operation time of windings of AM installed in 2000–2005

№ лифта Elevator	Отказ Failure	Нарботка, ч Operation time, h	№ лифта Elevator	Отказ Failure	Нарботка, ч Operation time, h
1	есть yes	17004	9	нет no	2795
2		26230	10		12801
3		10569	11		18907
4		5877	12		3662
5		17995	13		20465
6		15228	14		3129
7		1070	15		2870
8		14112	16-83		26232

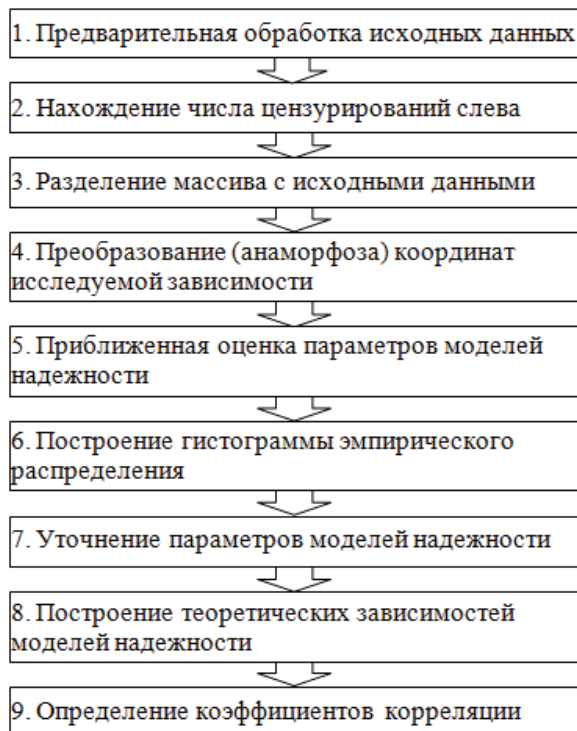
**Таблица 5.** Нарботка статорных обмоток АД, установленных в 2005–2011 гг.

**Table 5.** Operation time of windings of AM installed in 2005–2011

№ лифта Elevator	Отказ Failure	Нарботка, ч Operation time, h	№ лифта Elevator	Отказ Failure	Нарботка, ч Operation time, h
1	есть yes	26202	23	нет no	4094
2		15973	24		17794
3		22424	25-26		21312
4		12299	27		19536
5		4725	28		18888
6		3131	29		18384
7		12212	30-31		17568
8		8233	32		18648
9		16018	33		16608
10		18647	34-35		16584
11		858	36-37		16392
12		836	38-39		16248
13		5897	40-44		16104
14		4424	45-46		15768
15		13366	47		15600
16		5303	48-51		15360
17		5604	52		14640
18		374	53-54		13920
19		5531	55		13008
20		2968	56		12984
21		2962	57-58		12912
22		2222	59-108		26232

Программа для оценки ЭН работает следующим образом:

1. Загружается массив исходных данных из текстового файла, который состоит из двух векторов: вектора наработок и вектора индикатора, указывающего либо на наработку до отказа, либо на наработку до цензурирования. Далее вектор наработок ранжируется по принципу возрастания путем перетасовки с применением оператора  $sort(w)$ .
2. Находится число нулей в векторе индикатора слева от первой единицы, и в дальнейшем не учитываются цензурированные наработки меньше первой наработки до отказа.
3. Массив с исходными данными разделяется на два: наработки до отказа и наработки до цензурирования.



**Рис. 1.** Алгоритм оценки эксплуатационной надежности

**Fig. 1.** Algorithm of estimating operating reliability

4. Преобразовываются координаты исследуемой зависимости с целью приведения ее к линейному виду с помощью графического метода [6, 15]. Суть метода состоит в проведении прямой линии среди опытных точек, построенных в координатах, которые соответствующим образом связаны с исследуемой функцией распределения:

$$y = A + B \cdot x;$$

где  $A$  и  $B$  – параметры модели надежности;  $x=f(t)$ ,  $y=f(P)$  – функции анаморфозы, представленные в табл. 6.

Рассматриваются наиболее распространенные теоретические модели надежности: нормальная, экспоненциальная, логарифмически-нормальная и модель Вейбулла [16].

**Таблица 6.** Функции анаморфозы

**Table 6.** Anamorphosis function

		Модель надежности Reliability model			
		Экспоненциальная Exponential	Вейбулла Weibull	Нормальная Normal	Логарифмически-нормальная Lognormal
$x_i$	$t_i$	$\ln t_i$	$U_{\alpha}(F_N)$	$U_{\alpha}(F_N)$	$U_{\alpha}(F_N)$
$y_i$	$\Lambda(t_i)$	$\ln \Lambda(t_i)$	$ t_i $	$ t_i $	$\ln  t_i $

Примечание:  $t_i$  – наработка до отказа;  $U_{\alpha}(F_N)$  – квантиль стандартного нормального распределения.

Note:  $t_i$  is the failure time;  $U_{\alpha}(F_N)$  is the fractal of standard normal distribution.

5. Предварительно оцениваются параметры модели надежности методом наименьших квадратов, который является одним из наиболее универсальных методов оценки неизвестных параметров зависимостей [17].

Параметры нормальной модели  $(\alpha, \beta)$  и параметры модели Вейбулла  $(\mu, \sigma)$  определяются по формулам (1) и (2). При этом параметру  $\mu$  соответствует  $\alpha$ , а  $\sigma$  соответствует  $\beta$ . По этим же формулам определяются параметры логарифмически-нормальной модели надежности  $l_\mu$  и  $l_\sigma$ , только значения переменных предварительно логарифмируются [18]:

$$\alpha = \exp \left[ \frac{1}{N-1} \cdot \left( \sum_{i=1}^N x_i - \beta \cdot \sum_{i=1}^N y_i \right) \right], \quad (1)$$

$$\beta = \frac{(N - k_0) \cdot \sum_{i=1}^N y_i \cdot x_i - \sum_{i=1}^N y_i \cdot \sum_{i=1}^N x_i}{(N - k_0) \cdot \sum_{i=1}^N y_i^2 - \left( \sum_{i=1}^N y_i \right)^2}, \quad (2)$$

где  $k_0$  – число цензурирующих наработок;  $N$  – общее число исследуемых образцов.

Параметр экспоненциальной модели находится по следующей формуле:

$$\lambda = d / \sum_{i=1}^N t_i,$$

где  $d$  – количество отказавших образцов.

6. Строятся гистограммы эмпирического распределения интенсивности отказов и вероятности безотказной работы  $P(t)$  с использованием оператора *hist*. При этом для нахождения эмпирического распределения вероятности безотказной работы (ВБР) учитываются гистограммы, как отказов, так и цензурированных. Зная функцию ВБР, легко определить остальные показатели надежности. А график интенсивности отказов обладает хорошей наглядностью, по нему можно судить не только о законе распределения, но и о физике деградационного процесса [19].

7. Уточняются параметры моделей надежности с помощью оператора *Minerr* по условию стремления к нулю разницы опытного и теоретического распределений. Этот оператор выполняет нелинейный подбор параметров заданной функции, которая находится в наилучшем согласии с экспериментальными точками:

- Изображается требуемый вид функции с указанием искомых параметров, и приводятся их предполагаемые значения, определенные в предварительном расчете. Для определения ВБР при нормальной модели надежности используется оператор *snorm*, для определения плотности распределения наработок до отказа – оператор *dnorm*, для расчета ВБР при логнормальной модели надежности – *plnorm* и плотности распределения наработок – *dlnom*.

- Записывается уравнение разницы опытной и теоретической функций, которое решается командой *Minerr* по условию ее равенства нулю, что приводит к определению искомых параметров в измененных обозначениях. Фрагмент программы представлен на рис. 2.

- По полученным параметрам определяются: математическое ожидание и коэффициент вариации, а также выражения для расчета ВБР, интенсивности отказов и плотности распределения наработок.

### Нормальная модель надежности

Given

$$0 = \text{Pemp} - \text{snorm} \left[ \frac{-(\text{tm} - \mu 1)}{\sigma 1} \right]$$

$$\begin{pmatrix} \mu \\ \sigma \end{pmatrix} := \text{Minerr}(\mu 1, \sigma 1)$$

до коррекции:

$$\begin{pmatrix} \mu 1 \\ \sigma 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 40592.085 \\ 21792.422 \end{pmatrix}$$

уточненные:

$$\begin{pmatrix} \mu \\ \sigma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 39176.255 \\ 23625.377 \end{pmatrix}$$

Рис. 2. Фрагмент программы

Fig. 2. Program segment

8. После последовательного расчета всех перечисленных моделей надежности производится их сравнительный анализ: строятся графики теоретических распределений в сочетании с гистограммой эмпирического распределения, которые позволяют получить первое представление о согласии теории и эксперимента.
9. Для более объективного выбора закона рассчитывается коэффициент корреляции между эмпирическим и теоретическим распределением [20]:

$$r_{xy} = S_{xy} / \sqrt{S_x S_y}, \quad (3)$$

где  $S_x$  и  $S_y$  – вариации;  $S_{xy}$  – ковариация.

Чем ближе полученное значение коэффициента корреляции к единице, тем выше степень согласия этих распределений. Формула (3) в предлагаемой программе заменена оператором *corr(x,y)*. Результаты расчета сведены в табл. 7.

Вычисления показали, что коэффициент корреляции максимален для статорных обмоток АД, установленных в лифтах в:

- 1986–1990 гг. – для нормальной модели;
- 1990–2005 гг. – для экспоненциальной модели;
- 2005–2011 гг. – для модели Вейбулла.

На основании принятых моделей надежности в табл. 8 приведена функция интенсивности отказов статорных обмоток лифтовых асинхронных двигателей.

**Таблица 7.** Коэффициенты корреляции

**Table 7.** Correlation ratio

Период установки (гг.) Installation period	Коэффициент корреляции Correlation ratio			
	Модель Model			
	Нормальная Normal	Экспоненциальная Exponential	Логарифмически-нормальная Lognormal	Вейбулла Weibull
1986–1990	0,997	0,986	0,986	0,993
1990–1995	0,980	0,996	0,995	0,996
1995–2000	0,959	0,985	0,984	0,980
2000–2005	0,981	0,991	0,987	0,990
2005–2011	0,968	0,987	0,986	0,989

**Таблица 8.** Функция интенсивности отказов статорных обмоток лифтовых асинхронных двигателей

**Table 8.** Failure rate function of stator windings of elevator AM

Период установки (гг.) Installation period	Модель надежности Reliability model	Функция интенсивности отказов Failure rate function
1986–1990	Нормальная Normal	$\lambda(t) = \frac{\sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(t-34835)^2}{2 \cdot 19400^2}\right]}{19400 \cdot \Phi\left(\frac{t-34835}{19400 \cdot \sqrt{2}}\right)}$
1990–1995	Экспоненциальная Exponential	$\lambda(t) = 4,7 \cdot 10^{-6}$
1995–2000		$\lambda(t) = 5,0 \cdot 10^{-6}$
2000–2005		$\lambda(t) = 4,8 \cdot 10^{-6}$
2005–2011	Вейбулла Weibull	$\lambda(t) = 0,0007 \cdot 0,588 \cdot t^{0,588-1}$

Примечание:  $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-x^2) dx$  – интеграл вероятности (интеграл Лапласа).

Note:  $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-x^2) dx$  is the probability integral (Laplace integral).

Каждая из исследуемых групп двигателей имеет различное время эксплуатации до начала наблюдений, это дает возможность для их объединения и построения кривой интенсивности отказов на достаточно большом промежутке времени, что отражено на рис. 3.

«Кривая жизни», представленная на рис. 3, наглядно демонстрирует, что время эксплуатации статорных обмоток лифтовых АД имеет три явно выраженных периода:  $T_1$  – приработки,  $T_2$  – нормальной работы и  $T_3$  – износа.

Период приработки характеризуется высокой интенсивностью отказов, которая постепенно падает. Отказы в этот период вызваны скрытыми дефектами, допущенными на стадиях разработки и изготовления. Большинство из них выявляются и устраняются в процессе испытаний. Однако при массовом производстве невозможно проверить каждое изделие, поэтому часть обмоток лифтовых АД оказывается со скрытыми дефектами, которые вызывают отказы в первый период эксплуатации. Высокая ин-

тенсивность отказов обмоток объясняется также особым режимом нагружения, который характеризуется большим количеством циклов работы и массой перевозимого груза при заселении новостройки. В результате происходит нагрев, вызванный протеканием токов перегрузки. Для предотвращения выхода из строя электродвигателя срабатывают датчики температурной защиты, что в данном случае рассматривается как отказ. Отказы первого периода в дальнейшем не влияют на надежность устройства в последующие периоды его использования.

В период нормальной работы АД для лифтов происходят внезапные отказы, которые носят случайный характер. Такие отказы происходят из-за аварий на подающих подстанциях, коротких замыканий в распределительных сетях, коммутационных и грозовых возмущений, неравномерности распределения нагрузки по фазам, обрыва проводников в обмотках статора или кабеля, межвиткового и межфазного замыкания обмоток, нарушения контактов и разрушения соединений, выполненных пайкой или сваркой. В этом случае имеет место наиболее низкий уровень интенсивности отказов приблизительно постоянной величины.

После периода нормальной работы наступает период износа, имеющий отказы возрастающей интенсивности. Отказы связаны со снижением сопротивления изоляционных материалов обмотки статора вследствие ее старения, разрушения и увлажнения.

Итак, подводя итоги, можно констатировать следующее:

1. Исследованы отказы статорных обмоток асинхронных двигателей для лифтов, имеющих однотипную конструкцию и эксплуатируемых примерно в одинаковых условиях. На их основе сформирован исходный массив данных (наработка статорных обмоток асинхронных двигателей для лифтов до отказа и до цензурирования) для определения модели надежности. В качестве моделей эксплуатационной надежности рассмотрены: нормальная, экспоненциальная, логарифмически-нормальная и модель Вейбулла.
2. Разработана программа оценки эксплуатационной надежности в математическом редакторе MATHCAD, позволяющая построить эмпирические распределения с последующим расчетом по ним параметров теоретических распределений и показателей надежности, а также осуществить выбор моделей надежности с помощью коэффициента корреляции.
3. Путем объединения участков функции интенсивности отказов получена «кривая жизни» статорных обмоток АД для лифтов, не встречающаяся ранее в литературе. Вид данной кривой приводится неоднократно, но количественные значения найдены впервые:
  - Явно выраженный период приработки обмоток АД длится около двух лет. Интенсивность отказов в течение первого года умень-

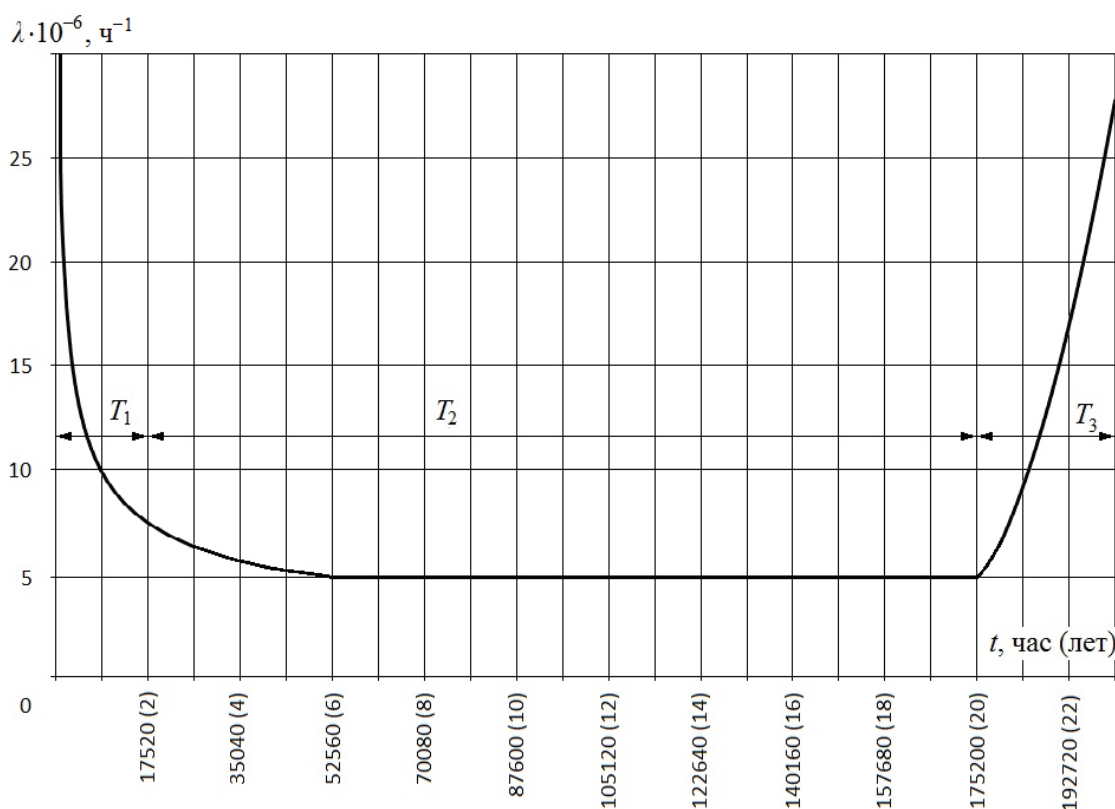


Рис. 3. «Кривая жизни» статорных обмоток АД для лифтов

Fig. 3. «Life curve» of stator windings of elevator AM

шается в несколько раз, в течение второго падает более плавно, приближаясь к постоянному значению.

- После двух лет эксплуатации обмоток лифтовых двигателей интенсивность отказов снижается незначительно в пределах  $2,0 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ , поэтому на участке длительностью в 18 лет можно считать ее постоянной на уровне  $5,0 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$  и отнести это время к периоду нормальной работы.

- Период износа наступает после 20 лет эксплуатации двигателей. В течение 3 лет интенсивность отказов увеличивается почти в 5 раз и достигает  $23 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ .

Полученная «кривая жизни» статорных обмоток АД для лифтов в дальнейшем может быть использована для разработки наиболее эффективной системы технического обслуживания и ремонта.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лифты / под общ. ред. Д.П. Волкова. – М.: Изд-во АСВ, 1999. – 480 с.
2. Лифт пассажирский. Руководство по эксплуатации 0601.00.00.000 РЭ. – М.: Изд-во ОАО «Щербинский лифтостроительный завод», 2010. – 176 с.
3. Яновски Л. Проектирование механического оборудования лифтов / пер. с англ. под ред. С.Д. Бабичева. – М.: Изд-во АСВ, 2005. – 336 с.
4. Шпет Н.А., Муравлев О.П. Исследование отказов пассажирских лифтов по данным эксплуатации // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 4. – С. 123–125.
5. Шпет Н.А. Анализ отказов асинхронных двигателей для лифтов в эксплуатации // Электромеханические преобразователи энергии: Матер. V Юбилейной Междунар. науч.-техн. конф. им. Г.А. Сипайлова. – Томск, 12–14 октября 2011. – Томск: ТПУ, 2011. – С. 25–28.
6. Кузнецов Н.Л. Надежность электрических машин. – М.: Изд. дом МЭИ, 2006. – 432 с.
7. Муравлев О.П., Ведяшкин М.В. Эксплуатационная надежность асинхронных двигателей мостовых кранов // Известия вузов. Электромеханика. – 2011. – № 6. – С. 38–41.
8. ГОСТ 27.503–81. Надежность в технике. Система сбора и обработки информации. Методы оценки показателей надежности. Введ. 1982–07–01. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам: Изд-во стандартов, 1982. – 56 с.
9. Ведяшкин М.В., Муравлев О.П. Оценка уровня надежности асинхронных двигателей мостовых кранов на стадии эксплуатации // Электротехника. – 2013. – Т. 323. – № 7. – С. 50–54.
10. ГОСТ 27.002–89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. Введ. 1990–01–07. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам: Изд-во стандартов, 2002. – 24 с.
11. Анализ надежности технических систем по цензурированным выборкам / В.М. Скрипник, А.Е. Назин, Ю.Г. Приходько, Ю.Н. Благовещенский. – М.: Радио и связь, 1988. – 184 с.
12. Ведяшкин М.В. Компьютерная модель эксплуатационной надежности обмоток крановых асинхронных двигателей // Электротехника. – 2012. – № 6. – С. 59–61.

13. Крушель Е.Г., Панфилов А.Э. Осваиваем Mathcad. – Волгоград: ВолгГТУ, 2006. – 179 с.
14. Яньков В.Ю., Попов А.А., Бобырь Г.А. Решение прикладных задач в пакете «МАТКАД». – М.: Спутник+, 2011. – 140 с.
15. Хан Г., Шапиро С. Статистические модели в инженерных задачах / пер. с англ. под ред. В.В. Налимова. – М.: Изд-во Мир, 1969. – 395 с.
16. Диллон Б., Сингх Ч. Инженерные методы обеспечения надежности систем / пер. с англ. под ред. Е.Г. Коваленко – М.: Изд-во Мир, 1984. – 318 с.
17. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / пер. с нем. под ред. Г. Гроше, В. Циглера. – М.: Наука, 1981. – 720 с.
18. Аронов И.З., Бургасов Е.И. Оценка надежности по результатам сокращенных испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 184 с.
19. Капур К., Ламберсон Л. Надежность и проектирование систем. Пер. с англ. под ред. И.А. Ушакова – М.: Изд-во Мир, 1980. – 598 с.
20. Ефремов Л.В. Практика вероятностного анализа надежности техники с применением компьютерных технологий. – СПб.: Наука, 2008. – 216 с.

Поступила 03.03.2014 г.

UDC 621.37

## «LIFE CURVE» OF STATOR WINDINGS OF ASYNCHRONOUS MOTORS FOR ELEVATORS

**Natalya A. Shpet,**

Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk,  
634050, Russia. E-mail: Shpet\_Natalya@sibmail.com

**Oleg P. Muravlev,**

Dr. Sc., Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk,  
634050, Russia. E-mail: mop@tpu.ru

**The relevance of the work** is justified by the need to improve the operational reliability of stator windings of asynchronous motors, installed in the main drive of elevators in residential buildings. Their failures are expensive to fix and entail long-term downtime.

**The main aim of the work** is to estimate the reliability of stator windings of elevators asynchronous motors and to construct the «life curve». The reliability is to be estimated using the failure information, obtained in the course of their operation.

**Research methods.** The aim of the work had been achieved using probabilistic and statistical method with a help of the following software packages: MS Word, MS Excel, MathCAD. The utilized method is based on theorems of probability theory and mathematical statistics using collection and analysis of statistical data.

**Results.** The authors have studied the failures of stator windings of elevators asynchronous motors. The initial data set was constructed based on the research results. The data set consists of failures and censoring time of stator windings of elevators asynchronous motors. The authors considered normal, exponential, log-normal and Weibull model as the operational reliability models. A MathCAD-based program was developed to evaluate operational reliability which allows building experimental distributions and further calculating parameters of theoretical distributions and reliability. The most appropriate reliability model was chosen based on the correlation between empirical and theoretical distributions. As a result the «life curve» of the stator windings of elevators was constructed; it can be further used to develop more effective system of maintenance and repair.

### Key words:

Asynchronous motor, passenger elevator, hoist, operating reliability, failure, censored samples, stator windings, failure distribution laws, probability of failure-free operation.

### REFERENCES

1. *Lifty* [Lifts]. Ed. by D.P. Volkov. Moscow, ASV Publ., 1999. 480 p.
2. Lift passazhirskiy [Passenger lift]. *Rukovodstvo po ekspluatatsii 0601.00.00.000 RE* [Operation manual]. Moscow, Shcherbinskiy liftoostroitelny zavod, 2010. 176 p.
3. Janovsky L. *Proektirovanie mekhanicheskogo oborudovaniya liftovo* [Elevator mechanical design]. Tr. engl. Ed. by S.D. Babichev. Moscow, ASV Publ., 2005. 336 p.
4. Shpet N.A., Muravlev O.P. Issledovanie otkazov passazhirskikh liftovo po dannym ekspluatatsii [Study of passenger elevator failures according operation data]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 4, pp. 123–125.
5. Shpet N.A. Analiz otkazov asinkhronnykh dvigateley dlya liftovo v ekspluatatsii [Failure analysis of asynchronous motors for lifts in operation]. *Elektromekhanicheskie preobrazovateli energii: materialy V Yubileynoy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii imeni G.A. Sipaylova* [Electromechanical energy converters. Proc. of the V G.A. Sipaylov Anniversary International Scientific and Technical Conference]. Tomsk, 12–14 October 2011. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. House, 2011. pp. 25–28.
6. Kuznetsov N.L. *Nadezhnost elektricheskikh mashin* [Reliability of electrical machines]. Moscow, MEI Press, 2006. 432 p.
7. Muravlev O.P., Vedyashkin M.V. Ekspluatatsionnaya nadezhnost asinkhronnykh dvigateley mostovykh kranov [Operational reliability of induction motors of overhead traveling cranes]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika – Bulletin of the Universities. Electromechanics*, 2011, no. 6, pp. 38–41.
8. GOST 27.503–81. *Nadezhnost v tekhnike. Sistema sbora i obrabotki informatsii. Metody otsenki pokazateley nadezhnosti. Vveden 1982–07–01* [Reliability engineering. Information collection and

- processing. Reliability estimation methods. Introduced 1982–07–01]. Moscow, USSR State Committee the standards, 1982. 56 p.
9. Vedyashkin M.V., Muravlev O.P., Otsenka urovnya nadezhnosti asinkhronnykh dvigateley mostovykh kranov na stadii ekspluatatsii [Assessing the reliability level of induction motors of overhead traveling cranes at the operational stage]. *Elektrotehnika – Electrotechnics*, 2013, vol. 323, no. 7, pp. 50–54.
  10. GOST 27.002–89. Nadezhnost v tekhnike. Osnovnye ponyatiya. Terminy i opredeleniy. Vveden 1990–01–07 [State Standard 27.002–89. Reliability engineering. Basic concepts. Terms and definitions. Introduced 1991–01–07]. Moscow, USSR State Committee the standards, 2002. 24 p.
  11. Skripnik V.M., Nazin A.E., Prikhodko Yu.G., Blagoveshchenskiy Yu.N. *Analiz nadezhnosti tekhnicheskikh sistem po tsenzurovannym vyborkam* [Reliability analysis of technical systems by censored samples]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1988. 184 p.
  12. Vedyashkin M.V. Kompyuternaya model ekspluatatsionnoy nadezhnosti obmotok kranovykh asinkhronnykh dvigateley [Computer model of operational reliability for crane asynchronous motor windings]. *Elektrichestvo – Electricity*, 2012, no. 6, pp. 59–61.
  13. Krushel E.G., Panfilov A.E. *Osvaivaem Mathcad* [Studying Mathcad]. Volgograd, Volgograd State Technical University press, 2006. 179 p.
  14. Yankov V.Yu., Popov A.A., Bobyr G.A. *Reshenie prikladnykh zadach v pakete Mathcad* [Solution of applications in Mathcad]. Moscow, Sputnik+ Publ., 2011. 140 p.
  15. Hahn G.J., Shapiro S.S. *Statisticheskie modeli v inzhenernykh zadachah* [Statistical models in engineering]. Tr. from Engl. Ed. by V.V. Nalimov. Moscow, Mir Publ., 1969. 395 p.
  16. Dhillon B.S., Singh C. *Inzhenernye metody obespecheniya nadezhnosti system* [Engineering reliability]. Tr. from Engl. Ed. by E.G. Kovalenko. Moscow, Mir Publ., 1984. 318 p.
  17. Bronshteyn I.N., Semendyaev K.A. *Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vtuzov* [Mathematical handbook for engineers and students of technical universities]. Tr. from Deut. Ed. by G. Groshe, V. Tsigler. Moscow, Nauka Publ., 1981. 720 p.
  18. Aronov I.Z., Burtasov E.I. *Otsenka nadezhnosti po rezultatam sokrashchennykh ispytaniy* [Reliability estimation by the results of abbreviated tests]. Moscow, Standards Publ., 1987. 184 p.
  19. Kapur K.C., Lamberson L.R. *Nadezhnost i proektirovanie system* [Reliability in engineering design]. Tr. from Engl. Ed. by I.A. Ushakov. Moscow, Mir Publ., 1980. 598 p.
  20. Efremov L.V. *Praktika veroyatnostnogo analiza nadezhnosti tekhniki s primeneniem kompyuternykh tekhnologiy* [Practice of probabilistic reliability analysis of techniques using computer technology]. St. Petersburg, Nauka Publ., 2008. 216 p.

Received: 03 March 2014.