



УДК 629.4.015
ББК 74.58

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОТКАЗОВ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОВЗОВ

Подлесный Олег Владимирович

Машинист эксплуатационного локомотивного депо имени М. Горького
plushkin-o@yandex.ru
Локомотивное депо им. М. Горького, 400038 г. Волгоград, Российская Федерация

Зенина Елена Геннадьевна

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроэнергетика и электротехника»
Национальный исследовательский университет
Московского энергетического института Волжский филиал
zeninaeg@mail.ru
Проспект Ленина, 69, 404110 г. Волжский, Российская Федерация

Аннотация. Проведен анализ статистических данных по отказам тяговых двигателей электровозов. Определен теоретический закон распределения пробега электродвигателей до отказа, наиболее точно соответствующий статистическим данным. Сделаны выводы о целесообразности применения найденного нормального закона распределения для обеспечения рационального использования срока службы оборудования электровоза и электроподвижного состава в целом.

Ключевые слова: тяговые двигатели электровозов, пробег тяговых двигателей до отказа, срок службы электровозов, закон распределения отказов.

Локомотивное хозяйство непрерывно развивается. Актуальной является задача увеличения срока службы электровозов. При этом особое внимание уделяется оптимизации межремонтных периодов, повышению качества ремонтных работ, внедрению новых и совершенствованию существующих форм организации производства, созданию поточно-конвейерных линий по ремонту тягового подвижного состава и его отдельных частей на локомотиво-ремонтных предприятиях. Совершенствуется система планирования и материального стимулирования с широким внедрением научной организации труда, специализации и прогрессивной технологии ремонта на основе широкого использования передовых достижений науки и техники.

При исследовании надежности локомотивов, их узлов и деталей возникает необходимость определения вида и аналитического вы-

ражения закона распределения длительности работы (наработки) до отказа по статистическим данным, например, при установлении моделей отказов, расчете показателей и прогнозировании надежности, оптимизации системы технического обслуживания и ремонта и др.

Получить объективные сведения о техническом состоянии объекта исследования, в нашем случае электровоза, можно на основе анализа статистических данных о неисправностях и отказах, полученных при наблюдениях за эксплуатацией его отдельных элементов. В свою очередь, полученные результаты анализа по отдельным узлам и компонентам объекта исследования позволят говорить о надежности объекта в целом. Разделив объект исследования на составные части по функциональному принципу, представим их в виде генеральных совокупностей, представляющих собой некоторое пол-

ное множество однородных объектов, обладающих интересующими нас качествами. Например, тяговые электродвигатели (далее – ТЭД) одной серии, эксплуатируемые на одних и тех же участках железной дороги, практически в равных условиях, могут представлять генеральную совокупность.

В данной работе эти положения подтверждены статистическими данными об отказах электровозов серии ВЛ-80^{СТ} Приволжской железной дороги за период с 2011 по 2012 г., с использованием Комплексной автоматизированной системы учета, контроля, устранения отказов технических средств и анализа их надежности.

По указанным сведениям, можно определить теоретический закон распределения пробега до отказа, наиболее точно соответствующий собранным статистическим данным.

Как видно из приведенных статистических данных (рис. 1), наибольшее количество отказов приходится на электрическое оборудование. Из рисунка 1 видно, что количество неисправностей за 2012 г. (показано красным цветом) элект-

роаппаратов тягового подвижного состава резко возрастает в сравнении с неисправностями за 2011 г. (показано синим цветом). Отказы ТЭД находятся на втором месте, они же являются важнейшими агрегатами, от надежной работы которых зависит нормальное функционирование электроподвижного состава. Следствием отказов их являются внеплановые ремонты в депо.

На основе анализа статистических данных, определим вид и аналитическое выражение законраспределения длительности работы (наработки) до отказа тяговых электродвигателей.

Наблюдениями за работой случайной выборки тяговых электродвигателей получены данные об их наработке до отказа по эксплуатационному депо им. М. Горького, приведенные в таблице 1 в виде упорядоченного по интервалам вариационного ряда эмпирического распределения. В нашем случае выборка задана в виде распределения частот.

По данному распределению построим полигон эмпирических относительных частот (рис. 2, кривая 1).

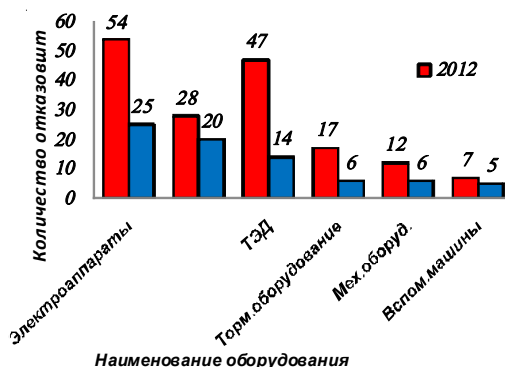


Рис. 1. Распределение отказов технических средств по видам оборудования электровоза за период 2011–2012 гг.

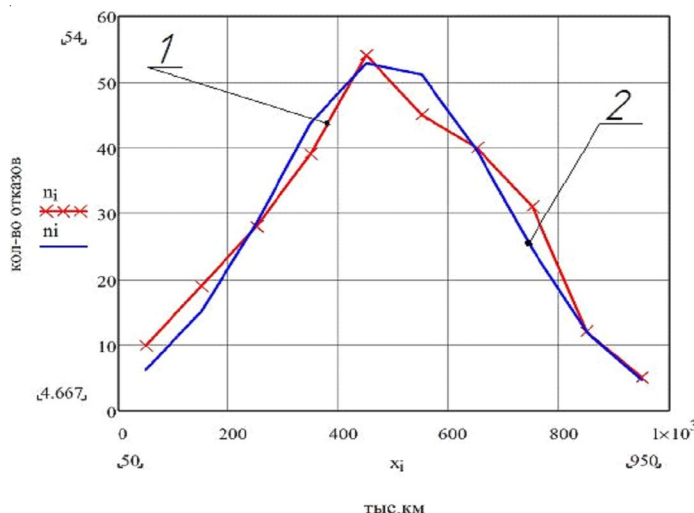


Рис. 2. Полигон эмпирических 1 и теоретических 2 частот

Для определения выборочных средней и дисперсии воспользуемся методом произведений, который является удобным способом вычисления условных моментов различных порядков вариационного ряда с равноотстоящими вариантами. Зная же условные моменты, нетрудно найти интересующие нас начальные и центральные эмпирические моменты. Данные расчетов сведем в таблицу 2.

После того, как расчетная таблица заполнена и проверена правильность вычислений, вычисляем условные моменты:

$$M_1^* = \frac{\sum n_i \times u_i}{n}, M_2^* = \frac{\sum n_i \times u_i^2}{n},$$

$$M_3^* = \frac{\sum n_i \times u_i^3}{n}, M_4^* = \frac{\sum n_i \times u_i^4}{n} \quad (1)$$

$$M_1^* = \frac{99}{283} = 0.35, M_2^* = \frac{1283}{283} = 4.534, M_3^* = \frac{1179}{283} = 4.166$$

Наконец, вычислим выборочные среднюю и дисперсию по формулам:

$$\bar{x}_B = M_1^* \times h + C \quad (2)$$

где h – длина интервала,

C – ложный нуль, который равен 450×10^3 .

$$\bar{x}_B = 0.35 \times 100 + 450 \times 10^3 = 485 \times 10^3$$

Выборочная дисперсия:

$$\sigma_B^2 = [M_2^* - (M_1^*)^2] \times h^2 \quad (3)$$

$$\sigma_B^2 = [4.534 - (0.35)^2] \times 100^2 = 44115 \times 10^3$$

$$\sigma_B = \sqrt{44115} = 210,036 \times 10^3$$

Коэффициент вариации:

$$V^* = \frac{\sigma_B}{\bar{x}_B} \times 100\% \quad (4)$$

$$V^* = \frac{210,036}{485} \times 100\% = 0,05\%$$

так как $V^* \leq 10\%$, следовательно, выборку можно считать однородной, то есть полученной из генеральной совокупности.

Найдем центральные эмпирические моменты третьего и четвертого порядка:

$$M_3 = [M_3^* - 3M_1^*M_2^* + 2(M_1^*)^3] \times h^3 \quad (5)$$

$$M_3 = [4.166 - 3 \times 0.35 \times 4.534 + 2 \times (0.35)^3] \times 100^3 = -508950$$

$$M_4 = [M_4^* - 4M_1^*M_3^* + 6(M_1^*)^2M_2^* - 3(M_1^*)^4] \times h^4$$

$$M_4 = [49.396 - 4 \times 0.35 \times 4.166 + 6 \times 0.35^2 \times 4.534 - 3 \times 0.35^4] \times 100^4 = 4685107125$$

Таблица 1

Распределение отказов тяговых электродвигателей НБ-418К6 после капитального ремонта за 2012 год

x_i , пробег локва, тыс. км	50	150	250	350	450	550	650	750	850	950
n_i , кол-во отказов, шт	10	19	28	39	54	45	40	31	12	5

Таблица 2

Расчет выборочных средней и дисперсии

Интервал L , в тыс. км	x_i	n_i	u_i	$n_i \times u_i$	$n_i \times u_i^2$	$n_i \times u_i^3$	$n_i \times u_i^4$	$n_i(u_i+1)^4$	n_H
0-100	50	10	-4	-40	160	-640	2560	810	10
100-200	150	19	-3	-57	171	-513	1539	304	29
200-300	250	28	-2	-56	112	-224	448	28	57
300-400	350	39	-1	-39	39	-39	39	0	96
400-500	450	54	0	0	0	0	0	54	150
500-600	550	45	1	45	45	45	45	720	195
600-700	650	40	2	80	160	320	640	3 240	235
700-800	750	31	3	93	279	837	2 511	7 936	266
800-900	850	12	4	48	192	768	3 072	7 500	278
900-1 000	950	5	5	25	125	625	3 125	6 480	283

Для построения нормальной кривой по данным наблюдений воспользуемся методом произведений, определим выравнивающие частоты теоретической кривой [1]. Данные расчетов сведем в таблицу 3.

По данным таблицы 3 строим нормальную кривую по выравнивающим частотам (рис. 2, кривая 2).

Близость выравнивающих и наблюдаемых частот подтверждает правильность допущения о том, что исследуемый признак распределен нормально.

Для оценки отклонения эмпирического распределения от нормального используют различные характеристики. Проведем оценку отклонения распределения через асимметрию и эксцесс:

$$a_s = \frac{M_3}{\sigma_B^3} \quad (6)$$

где M_3 – центральный эмпирический момент третьего порядка.

$$a_s = \frac{-508950}{210.036^3} = -0,055,$$

так как асимметрия $a_s \leq 0$, то можно говорить о более пологом графике слева;

$$e_k^* = \frac{M_4}{\sigma_B^4} - 3, \quad (7)$$

где M_4 – центральный эмпирический момент четвертого порядка.

$$e_k^* = \frac{4685107125}{210.036^4} - 3 = -0.593,$$

так как эксцесс $e_k^* < 0$, то полигон имеет более пологую вершину по сравнению с нормальной кривой.

С учетом найденных значений, теоретическая функция нормального закона распределения может быть выражена формулой [1]:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}} \quad (8)$$

Тогда, с учетом полученных данных

$$f(x) = \frac{1}{210.41 \times 10^3 \times 2\sqrt{\pi}} e^{-\frac{(x-485 \times 10^3)^2}{2 \times (210.41 \times 10^3)^2}},$$

где x – расстояние в тыс.км.

Построим график рассчитанной функции нормального закона распределения (рис. 3).

График, построенный по формуле (8), совмещается с полигоном статистических частот, представленным на рисунке 2, из которого визуально можно подтвердить близкое совпадение теоретического распределения с эмпирическим.

Для подтверждения, что статистические данные соответствуют выбранному закону распределения наработки до отказа, воспользуемся критерием согласия Пирсона.

Сущность критерия согласия Пирсона состоит в сравнении эмпирических и теоретических частот [1]. Эмпирические частоты находим из опыта.

Таблица 3

Расчет нормальной кривой по опытными данным

x_i тыс.км	n_i	$x_i - \bar{x}_e$	$u_i = \frac{x_i - \bar{x}_i}{\delta_e}$	$\varphi(u_i)$	$y_i = n \times h_i \times \frac{n \times h_i}{\varphi_e} \times \varphi(u_i)$
50	10	-435	-2.067	0.0468	6.295
150	19	-335	-1.592	0.1127	15.158
250	28	-235	-1.117	0.2131	28.662
350	39	-135	-0.642	0.3252	43.726
450	54	-35	-0.166	0.3932	52.885
550	45	65	0.31	0.3802	51.137
650	40	165	0.784	0.2943	39.583
750	31	265	1.259	0.1826	24.56
850	12	365	1.735	0.0893	12.01
950	5	465	2.21	0.0347	4.667

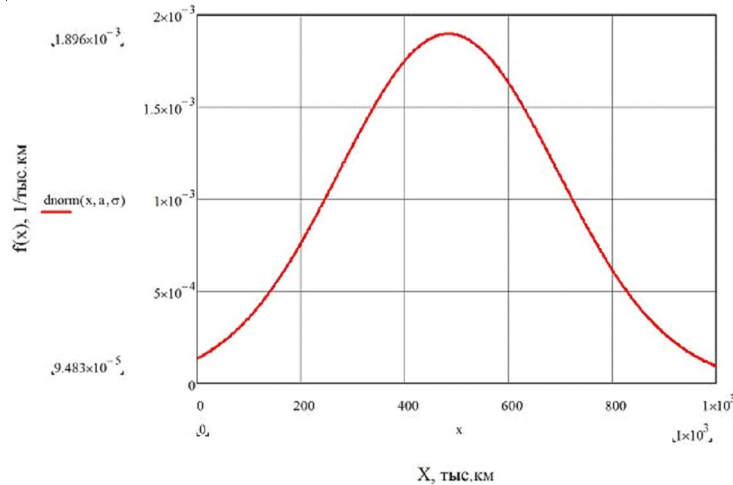


Рис. 3. График рассчитанной функции нормального закона распределения

Пример расчета для границ интервала 100–200 тыс. км.:

$$\bar{x}_B = 485 \times 10^3, \sigma \approx 210,41,$$

где \bar{x}_B, σ_B – выборочные средняя и среднее квадратическое отклонение, посчитанные ранее методом произведений.

$$x_i - \bar{x}_B = 100 - 485 = -385.$$

$$x_{i+1} - \bar{x}_B = 200 - 485 = -285$$

Границы интервалов:

$$Z_i = \frac{x_i - \bar{x}_B}{\sigma} = \frac{100 - 485}{210,41} = -1,848$$

$$Z_{i+1} = \frac{x_{i+1} - \bar{x}_B}{\sigma} = \frac{200 - 485}{210,41} = -1,368.$$

Находим функцию Лапласа по таблице приложения 2[1]:

$$\Phi(z_i) = -0.4678, \Phi(z_{i+1}) = -0.4147.$$

Вычисляем теоретические вероятности попадания x в заданные интервалы:

$$P_i = \Phi(z_{i+1}) - \Phi(z_i), P_2 = -0,4147 - (-0,4678) = 0.0531.$$

Находим теоретические частоты:

$$n'_i = 283 \times P_i, n'_2 = 283 \times 0.0531 = 15,027.$$

Расчет аналогично выполним для остальных интервалов, результаты сведем в таблицу 4.

Произведем проверку о случайности расхождения частот на основе критерия согласия «хи квадрат» [1].

Поскольку односторонний критерий более «жестко» отвергает нулевую гипотезу, чем двусторонний, построим правостороннюю критическую область, исходя из требования, чтобы вероятность попадания критерия в эту область в предположении справедливости нулевой гипотезы была равна принятому уровню значимости α :

$$P[\chi^2 > \chi^2_{кр}(\alpha; k)] = \alpha. \quad (9)$$

Таким образом, правосторонняя критическая область определяется неравенством $\chi^2 > \chi^2_{кр}(\alpha; k)$, а область принятия нулевой гипотезы – неравенством $\chi^2 < \chi^2_{кр}(\alpha; k)$.

Выполним расчет для $n_i = 10, n'_i = 9,113$ то есть для первого интервала наблюдений:

$$n_1 - n'_1 = 10 - 9,113 = 0,887,$$

$$(n_1 - n'_1)^2 = 0,887^2 = 0,787,$$

$$\frac{(n_1 - n'_1)^2}{n'_1} = \frac{0,787}{9,113} = 0,086.$$

Последние два столбца таблицы контрольные:

$$n_1^2 = 10^2 = 100, \frac{n_1^2}{n'_1} = 10,97.$$

Результаты остальных расчетов сведем в таблицу 5.

Сумма в 5-ом столбце таблицы 5 будет искомым критерием $\chi^2_{набл} = 4,63$.

По таблице приложения 5 [1] критических точек распределения χ^2 , по уровню значимости $\alpha = 0.05$ и числу степеней свободы $k = s - 3 = 10 - 3 = 7$, где $\chi^2_{кр}(0.05;7) = 14,1$ – количество интервалов, находим.

Так как $\chi^2_{набл} < \chi^2_{кр}$, то нет оснований отвергнуть нулевую гипотезу. Другими словами, расхождение эмпирических и теоретических частот – незначимое. Следовательно, данные наблюдений согласуются с гипотезой о нормальном распределении генеральной совокупности.

Выводы

По данным анализа отказов тяговых электродвигателей определен закон распределения длительности наработки на отказ тяговых электродвигателей. Сравнение теоретических и экспериментальных данных позволяет говорить о нормальном распределении пробега тяговых электродвигателей электровозов до отказа. С помощью найденного закона распределения можно определить среднее значение пробега ТЭД, при котором назначаем планово-предупредительные виды ремонта, и обеспечиваем возможность рационального использования срока службы оборудования электровоза и электроподвижного состава в целом.

Таблица 4

Расчет теоретических частот нормального распределения

Границы интервала		$x_i - \bar{x}_e$	$x_{i+1} - \bar{x}_e$	Границы интервала		$\Phi(Z_i)$	$\Phi(Z_{i+1})$	$P_i = \Phi(Z_{i+1}) - \Phi(Z_i)$	$n_i = 283 \times P_i$
x_i	x_{i+1}			$Z_i = \frac{x_i - \bar{x}_e}{\sigma}$	$Z_{i+1} = \frac{x_{i+1} - \bar{x}_e}{\sigma}$				
0	100	–	-385	–	-1,848	-0,500	-0,4678	0,0322	9,113
100	200	-385	-285	-1,848	-1,136	-0,4678	-0,4147	0,0531	15,027
200	300	-285	-185	-1,136	-0,888	-0,4147	-0,3133	0,1014	28,696
300	400	-185	-85	-0,888	-0,408	-0,3133	-0,1591	0,1542	43,639
400	500	-85	-15	-0,408	0,072	-0,1591	0,0279	0,187	52,921
500	600	-15	115	0,072	0,552	0,0279	0,2088	0,1809	51,195
600	700	115	215	0,552	1,032	0,2088	0,3485	0,1397	39,535
700	800	215	315	1,032	1,512	0,3485	0,4345	0,086	24,338
800	900	315	415	1,512	1,992	0,4345	0,4767	0,0422	11,943
900	10 ³	415	–	1,992	–	0,4767	0,500	0,0233	6,594

Таблица 5

Сравнение эмпирических и теоретических частот

n_i	n'_i , тыс.км.	$n_i - n'_i$	$(n_i - n'_i)^2$	$\frac{(n_i - n'_i)}{n'_i}$	n_i^2	$\frac{n_i^2}{n'_i}$
10	9,113	0,887	0,787	0,086	100	10,97
19	15,027	3,973	15,785	1,050	361	24,023
28	28,696	-0,696	0,484	0,017	784	27,321
39	43,639	-4,639	21,52	0,493	1521	34,854
54	52,921	1,079	1,164	0,022	2916	55,1
45	51,195	-6,196	38,38	0,75	2025	39,555
40	39,535	0,465	0,216	0,0055	1600	40,47
31	24,338	6,662	44,382	1,824	961	39,486
12	11,943	0,057	0,00325	0,000272	144	12,057
5	6,594	-1,594	2,541	0,385	25	3,791

$\Sigma = 4,63$

$\Sigma = 287,627$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гмурман, В. Е. Руководство по решению задач по теории вероятностей и математической статистике : учеб. пособие для студентов вузов / В. Е. Гмурман. – Изд. 5-е, стер. – М. : Высш. шк., 2011. – 400 с.

2. Жданова, Н. Н. Инновационный подход к подбору структуры металлических композитов, работающих в условиях мощного дугового разряда / Н. Н. Жданова, И. С. Жданов // Вестник Волгоградского государственного университета. Се-

рия 10, Инновационная деятельность. – 2013. – № 1. – С. 69–72.

3. Жданова, Н. Н. Модификация подхода к выбору структуры материала при помощи информационной системы / И. С. Жданов, Н. Н. Жданова // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 10, Инновационная деятельность. – 2012. – № 6. – С. 75–78.

4. Четвергов, В. А. Надежность локомотивов : учебник / В. А. Четвергов, А. Д. Пузанков ; под ред. д-ра техн. наук, проф. В. А. Четвергова. – М. : Маршрут, 2003. – 415 с.

RESEARCH OF THE DISTRIBUTION LAW OF FAILURES TRACTIVE ELECTROMOTORS OF ELECTRIC LOCOMOTIVES

Podlesny Oleg Vladimirovich

Driver of operational locomotive depot of a name of M. Gorky
plushkin-o@yandex.ru
Lokomotivnoe depo im. Gorkogo, 400038, Volgograd, Russian Federation

Zenina Elena Gennadyevna

Candidate of Technical Sciences, associate professor “Power industry and electrical equipment”
National research university of the Moscow power institute Volzhskiy branch
zeninaeg@mail.ru
Prospect Lenina, 69, 404110 Volzhskii, Russian Federation

Abstract. The analysis of statistical data about failures of tractive engines of electric locomotives is carried out. The theoretical distribution law of run of electromotors to the full, most precisely appropriate to statistical data is defined. Outputs are drawn on feasibility of application of the found normal distribution law for support of rational use of service life of the equipment of an electric locomotive and an electrorolling stock as a whole.

Key words: tractive engines of electric locomotives, mileage traction motors to failure, service life of electric locomotives, the law of distribution of failures.