ОЦЕНКА ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ ВОССТАНОВЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

В.А. Буторин

Получено теоретическое распределение послеремонтного ресурса элементов регулируемых электроприводов. Путём проведения стендовых испытаний определяют закон распределения скорости параметра технического состояния элемента и используя полученное распределение или метод статистического моделирования, определяют параметры распределения послеремонтного ресурса этого элемента.

Для обеспечения требуемого уровня надёжности отремонтированных нерегулируемых электроприводов необходимо контролировать качество их показателей путём проведения испытания на долговечность. Одним из основных показателей долговечности является ресурс, который представляет собой наработку элемента до предельного состояния в режиме применения по назначению.

Прогнозирование ресурса элементов составных частей электропривода целесообразно проводить по их параметрам технического состояния (ПТС), чётко оговоренным в нормативно-технической литературе, в которой зафиксированы начальные и предельно-допустимые значения ПТС. Такие сведения имеются для элементов подшипниковых узлов электродвигателей (ПУЭ) [1], элементов контактно-щёточных узлов автомобильных синхронных генераторов [2], контактов магнитных пускателей[3] и др.

Наиболее универсальной моделью отражающий широкий спектр процессов реальной эксплуатации, является степенная функция изменения ПТС элемента в зависимости от наработки [4]

$$h = h_0 + Vt^{\alpha} \qquad (1)$$

где t- наработка элемента после периода приработки; h-изменения ПТС элемента на наработку t; V, α- постоянные показатели.

Показатель V характеризует влияние нагрузочных режимов на изменение ПТС. Показатель α определяет характер изменения ПТС от наработки и зависит от конструктивно-технологических факторов.

При $\alpha = 1$, $\alpha > 1$ и $\alpha < 1$ скорость изменения ПТС постоянная, монотонно возрастающая и убывающая. Для элементов ПУЭ $\alpha>1$, это объясняется увеличением силы одностороннего магнитного притяжения (ОМП), действующей на ПУЭ из-за возрастания их износа. Скорость износа контактно-щелочных узлов автомобильных генераторов снижается по мере их изнашивания вследствие ослабления усилия прижатия щеток к контактным кольцам, при этом $\alpha < 1$.

Для контактов магнитных пускателей $\alpha = 1$ [5].

После дифференцирования выражения (1) по t получим уравнения скорости ПТС

$$y = \frac{dh}{dt} = \alpha V t^{n-1}. \qquad (2)$$

При наработке t=1 зависимость (2) примет вид.

$$yt = 1 = \alpha\tau V \quad \text{или} \quad V = \frac{y_{t=1}}{\alpha\tau} \qquad (3)$$

где $y_{t=1}$ – скорость изменения ПТС при наработке t=1; τ – коэффициент размерности.

Введенный нами коэффициент размерности служит для придания выражению (3) логически правильного физического смысла и приводит к согласованию единиц измерения членов этого выражения. Величина τ количественно равняется единице, а её размерность – степени, основание которой является единица измерения исследуемой наработки, показатель степени составляет α-1.

Из выражения (3) следует, что V численно можно рассматривать как скорость изменения ПТС при наработке равной единице, уменьшенную в αраз. Запишем функцию (1) в виде

$$h = h_0 + \frac{y_{t=1}}{\alpha\tau} t^{\alpha} \qquad (4)$$

На рис.1 показана схема формирования отказа элемента объекта после ремонта при строго постоянных условиях нагрузки. Отрезок ОА характеризует время работы объекта до ремонта. Если значение ПТС элемента не превышает допустимого значения, то при ремонте он заменяться не будет, и впоследствии, после ремонта объекта формирование изменения ПТС будет проходить согласно кривой 1. в случае превышения значения

ПТС элемента допустимого значения его заменяют на бывший в эксплуатации элемент, имеющий величину ПТС в пределах допустимого значения. При этом изменения ПТС будут развиваться по кривой 2. Если отказавшийся элемент заменяется на новый, его ресурс полностью восстанавливается, и изменения ПТС будет протекать по кривой 3.

Пунктирная линия, являющаяся продолжением кривой 2, имеет начало в точке, соответствующей значению ПТС элемента после приработки. Назовем точку O’ условным временем начала эксплуатации рассматриваемого объекта после периода приработки. Точка O’ смещается в точку O, а кривая 2 становиться кривой 1 в случае, если при ремонте объекта замена элемента не проводилась. Смещением точки O’ в точку A, а кривой 2 в кривую 3 соответствует замене отказавшего элемента на новый.

Проанализируем кривую 2 как общую в данном случае. Параметры h_p и t_1 представляют собой изменение ПТС и наработку до ремонта, h_2 и t_2 - изменение ПТС и наработку до и после ремонта.

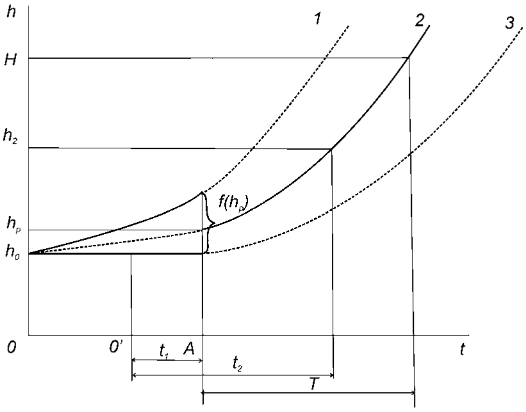

Рис. 1. Схема формирования отказа до и после ремонта

Значения t_1 и t_2 согласно формуле (4) приобретают вид

$$t1 = \sqrt{\frac{(h_p - h_0)\alpha\tau}{y_{t=1}}}\,,\; t2 = \sqrt{\frac{(h_2 - h_0)\alpha\tau}{y_{t=1}}}\,. \tag{5}$$

Наработка детали после ремонта t_2-t_1 будет составлять Δt:

$$\Delta t = \sqrt[\alpha]{\frac{(h_2 - h_0)\alpha\tau}{y_{t=1}}} - \sqrt[\alpha]{\frac{(h_p - h_0)\alpha\tau}{y_{t-1}}}\,. \tag{6}$$

При достижении величины ПТС предельного значения H послеремонтная наработка будет соответствовать послеремонтному ресурсу T:

$$T = \sqrt[\alpha]{\frac{\alpha\tau}{y_{t=1}}} - (\sqrt[\alpha]{(H - h_0)} - \sqrt[\alpha]{(h_p - h_0)})\,. \tag{7}$$

Ввиду того, что H, h_o, α и τ каждого элемента электропривода имеют вполне определенные значения, распределение его ресурса зависит от распределений $f(h_p)$ и $f(y_{t=1})$.

Нахождение закона распределения ресурса для функции двух случайных величин приводит к громоздким преобразованиям, вызванным необходимостью взятия двойного интеграла. При решении поставленной задачи целесообразно использовать метод статистического моделирования (метод Монте-Карло) [8].

Если отказавший элемент заменяется на новый, то h_p=h_0, и его послеремонтный ресурс описывается формулой

$$T = \sqrt[\alpha]{\frac{(H - h_0)\alpha\tau}{y_{t=1}}}\,. \tag{8}$$

В этом случае послеремонтный ресурс является функцией одной случайной величины $y_{t=1}$ и, следовательно, его распределение можно найти аналитическим путём. При этом плотность распределения ресурса $f(T)$ в общем виде описывается выражением [7]

$$f(T) = f\left[\Psi(T)\right]\left|\Psi'(T)\right|, \tag{9}$$

где f[Ψ(T)]- плотность распределения скорости изменения ПТС; │Ψ′(T) │- абсолютное значение первой производной скорости изменения ПТС.

Используя зависимость (9), запишем формулу плотности распределения ресурса для выражения (8)

$$f(T) = f_{t=1}\left[\frac{(H - h_0)\alpha\tau}{T^{\alpha}}\right]\left|\frac{(H - h_0)\alpha^2\tau^2}{T^{\alpha+1}}\right|. \tag{10}$$

Если скорость изменения ПТС распределена по нормальному закону с характеристиками $\bar{y}_{t=1}$ и $\sigma_{t=1}$ (математическое ожидание и среднее квадратичное отклонение) то $f(T)$ описывается выражением

$$f(T) = \frac{(H - h_0)\alpha^2\tau^2}{T^{\alpha+1}\sigma_{t=1}\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\left(\frac{(H - h_0)\alpha\tau - y_{t=1}T^{\alpha}}{T^{\alpha}y_{t=1}\sqrt{2}}\right)\right]. \tag{11}$$

Найденная f(T) позволяет описать функцию распределения ресурса

$$F(T)=\frac{(H-h_0)\alpha^2\tau^2}{T^{\alpha+1}\sigma_{t=1}\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\left(\frac{(H-h_0)\alpha\tau-y_{t=1}T^{\alpha}}{T^{\alpha}y_{t=1}\sqrt{2}}\right)\right]. \quad (12)$$

Если скорость изменения ПТС описывается более сложными распределениями, такими как двух- и трехпараметрический закон Вейбулла, бета-трапециальный закон и др., решение уравнения (10) приводит к громоздким преобразованиям и его следует решать методом статистического моделирования.

Перспективным способом определения скорости изменения ПТС элемента являются стендовые испытания, позволяющие получить полиномиальное выражение

$$y_{t=1}=b_0+\sum_{i=1}^{n}b_ix_i+\sum_{i\prec j}^{n}b_{ij}x_ix_j+\sum_{i=j}^{n}b_{ii}x_i^2+..., \quad (13)$$

где x_1, x_2, ….,x_n – основные ремонтно-технологические и эксплуатационные факторы; b_o, b_i,…..b_j - коэффициенты регрессии полинома, характеризующие степень влияния факторов на $y_{t=1}$.

Широкое применение при планирование стендовых испытаний нашли планы полного факторного эксперимента (ПФЭ), дробного факторного эксперимента (ДФЭ) и ортогонального центрального композиционного планирования (ОЦКП) [8,9].

Число опытов при ПФЭ, ДФЭ и ОЦКП находится соответственно по формулам

$$N=2^k+n_o;N=2^{k-c}+n_o;N=2^k+2k+n_o, \quad (14)$$

где к - количество факторов; n_o –число опытов на нулевой точке (обычно n_o = 1); с – число взаимодействий факторов, замененных на новые (дополнительные) факторы.

Повторность опытов (m) должна быть не менее трех. Если из априорной информации известно. Что выбранные факторы линейно воздействуют на $y_{t=1}$, необходимо использовать план ПФЭ. В случае, когда некоторыми взаимодействиями факторов можно пренебречь, можно уменьшить число опытов использованием плана ДФЭ. При нелинейных воздействиях факторов на $y_{t=1}$ следует применять план ОЦКП

Кодирование факторов производится по формуле

$$x_i=2(x_i-x_{icc})/(x_{i\max}-x_{i\min}), \quad (15)$$

где x_i - натуральное значение *i*-го фактора; x_{imax} , x_{imin} – минимальное и максимальное значение *i*-го фактора; $x_{icp}=(x_{imax}-x_{imin})/2$ – нулевой уровень *i*-го фактора.

Найденные уровни варьирование факторов и план проведения эксперимента позволяют выбрать или разработать испытательный стенд.

При отсутствии сведений о показателе α на стенде устанавливают факторы на нулевом уровне и после периода приработки исследуемого элемента фиксируют h_1, h_2,…h_l при соответствующих наработках t_1, t_2,….t_l (t_l>t_{l-1}>…>t_1). Рекомендуется l=5..7. показатель α находится из выражения

$$\alpha=-\frac{\sum_{1}^{l}(x_l-m_x)(y_l-m_l)}{\sum(x_l-m_x)^2} \quad (16)$$

где $x_i=lg(t_i)$, $y_i=lg(h_i)$, $m_x=\sum_{1}^{i}(x_i/l)$, $m_y=\sum_{1}^{i}(y_i/l)$.

После реализации плана испытаний обработку результатов следует начинать с проверки воспроизводимости опытов по критерию Кохрена

$$G_{\max}=S^2_{u\max}/\sum_{l}^{N}S^2_{ul}, \quad (17)$$

где S^2_{umax} – максимальная дисперсия в отдельных опытах; S^2_{ut} –дисперсия в u-ом опыте. Если при уровне значимости q-0,05 критерий $G_{маб}$ >$G_{мах}$ гипотеза об однородностти дисперсий принимается.

Коэффициенты регрессии полинома (13) для свободного, смешанных взаимодействий и остальных членов определяются соответственно по формулам

$$b_o=\left[\left(\sum_{l}^{N}y_{cpu}\right)/N\right]-C\sum_{l}^{N}b_u;$$

$$b_{ij}=\frac{\sum_{l}^{N}x_{ui}x_{ju}y_{cpu}}{N};b_j=\frac{\sum_{l}^{N}x_{ju}y_{cpu}}{\sum_{l}^{N}x_{ju}^{\ 2}}, \quad (18)$$

где y_{cpu} - среднее значение для одного u-го опыта при m повторных; x_{iu} и y_{ju} – значения факторов x_l и x_j в u-ом опыте.

При отсутствии в полноме членов типа $b_ux_l^2$ величина с=0, а

$$\sum_{T}^{N}x_{ju}^2=N.$$

Проверку значимости коэффициентов регрессии проводят по t-критерию Стьюдента.

$$t=|b_l|/S_{bl}, \quad (19)$$

где S_{bl} – квадратичная ошибка коэффициентов регрессии.

Если при q=0,05 критерий $t>t_{табл}$, коэффициент регрессии признается значимым.

Проверку адекватности полученной модели проверяют по F-критерию Фишера

$$F = \frac{\sum_{l}^{N}(y_{cpu} - \hat{y}_u)^2}{N-d} \bigg/ \frac{\sum_{l}^{N}\sum_{l}^{m}(y_{ul} - y_{cpu})^2}{N(m-1)m} \qquad (20)$$

где $\hat{y}_u$ – значение $y_{t=1}$ вычисляемое по уравнению регрессии для условий u-го опыта; d – число определяемых коэффициентов регрессии; y_{ul} –значение параллельного $y_{t=1}$ внутри опыта.

Если при q=0,05 найденный $F>F_{табл}$ принимается, что полученная модель соответствует результатам испытаний.

Раскодирование выражение (13) проводят с использованием формулы (15), при этом уравнение регресии примет вид

$$y_{t=1} = B_o + \sum_{l}^{k} B_l x_l + \sum_{l}^{k} B_{ij} x_i x_j \sum_{l}^{k} B_{ji} x_i^2 \qquad (21)$$

где к – число значимых факторов.

Если значимые факторы подчинены нормальному закону распределения с параметрами X_i и σ_{xi} , то при линейной модели $y_{t=1}$ также распределена по нормальному закону с параметрами $y_{t=1}$ и $\sigma_{t=1}$, которые находятся из выражений [7]

$$y_{t=1} = B_o + B_1\bar{x}_1 + B_2\bar{x}_2 + ... + B_k\bar{x}_x, \qquad (22)$$

$$\sigma_{y_{t=1}} = \sqrt{B_1^2\sigma_x^2 + B_2^2\sigma_{x2}^2 ... + B_k^2\sigma_{x1}^2} \qquad (23)$$

При других распределениях значимых факторов параметры распределения f ($y_{t=1}$) следует находить, используя метод статистического моделирования.

Для наглядности приводится пример по определению послеремонтного ресурса подшипников со стороны приводного вала электродвигателей 4А100L4У3, отремонтированных на электромеханическом заводе. Электродвигатели предполагается эксплуатировать в сырых помещениях. Электродвигатели соединены с рабочими машинами с помощью муфты.

В качестве параметра технического состояния подшипника взят радиальный зазор [1]. Основными выбранными факторами, влияющими на износ подшипников, явились: действующее на подшипник радиальное постоянное усилие (Р), вызванное весом ротора и силой ОМП; радиальное переменное, действующее с частотой вращения, усилие (Р), вызванное муфтой при передаче момента рабочей машине, и силой ОМП из-за биения ротора при вращении; относительная влажность окружающей среды (W). Выбранные факторы распределены по нормальным законам соответственно с параметрами Р=18,8 кГс и σ_p=5,37 кГс, Р=18,2 кГс и σ_p=1,7 кГс, W=85% и σ_w=5%

Планирование испытаний проводилось согласно матрице ПФЭ при количестве опытов $N=2^3+1$ с числом повторений m=4 и интервалом варьирования x_{imax}-x_{icp}=x_{icp}-x_{imin}, характеристики выбранных факторов при испытаниях представлены в таблице 1.

Таблица 1

Условия планирования	Постоянное усилие, кГс		Переменное усилие, кГс		Относительная влажность, %	
	P	x_i	$\widetilde{P}$	x_2	$\widetilde{W}$	x_3
Основной уровень	18,8	0	18,2	0	85	0
Интервал варьирования	16,1	1	5,1	1	15	1

Испытания проводились на разработанном стенде, безразборный контроль радиального зазора осуществлялся с помощью устройства [1]. По результатам эксперимента проверены однородность дисперсий (по критерию Кохрена), получены значимые коэффициенты регрессии полинома (по критерию Стьюдента), проверена адекватность найденного уравнения регрессии (по критерию Фишера). Найденная зависимость следующая

$Y_{t=1}=(0,92+0,36x_1+0,84x_2+0,15x_3)10^{-3}$*мкм/ч.* (24)

После раскодирования согласно (15) уравнение (24) приняло вид

$$y_{t=1} = (-3,34 + 0,0223P + 0,1647\widetilde{P} + 0,01W)10^{-3}\ мкм/ч \qquad (25)$$

Так как факторы распределены по нормальному закону то и $f(y_{t=1})$ распределена по этому закону, учитывая (22) и (23) его параметры составили $\bar{y}_{t=1} = 0,92 \cdot 10^{-3}$ мкм $/ ч$, и $\sigma_{y_{t=1}} = 0,31 \cdot 10^{-3}$ мкм$/ч$. Показатель параметра технического состояния, определённый на стенде равен α=*1,04*. Послеремонтное микрометрирование подшипников исследуемых электродвигателей перед отправлением в эксплуатацию показало. Что величина h_p распределена по нормальному закону с параметрами $\bar{h}_p = 9$мкм и $\sigma_{hp} = 2$мкм .

H, h_0 и τ для этого подшипника соответственно составляют 37,5 мкм, 0,00 мкм и $1ч^{0,04}$.

Найденные параметры выражения (7) позволили методом статистического моделирования получить числовые характеристики ($T_{ср}$=24,0 тыс. ч) и $\sigma_т$=10,5 тыс. ч) и экспериментальное распределение ресурса , которое апроксимировалось известным теоретическим распределением с использованием критерия Пирсона χ^2 явился трёхпараметрический закон Вейбула с парметрами a=16,9 тыс. ч, b=1,6 и c=8,9 тыс. ч., которые были найдены согласно ГОСТ 11.007-75. Полученная функция плотности распределения имеет вид

$$f(t) = \frac{1,6}{16,9}\left(\frac{T-8,9}{16,9}\right)^{0,6} \exp\left[-\left(\frac{T-8,9}{16,9}\right)^{1,6}\right] \quad (26)$$

Выражение (26) несёт исчерпывающую информацию о послеремонтной долговечности исследуемого подшипника.

Таким образом, для прогнозирования послеремонтного ресурса элементов составных частей нерегулируемых электроприводов необходимо:

- выбрать оговорённый в нормативно-технической документации ПТС элементов, определяющих их ресурс;

- произвести измерение значений ПТС элементов после ремонта объектов перед отправлением в эксплуатацию с целью определения их законов распределения;

- выбрать основные факторы, влияющие на послеремонтный ресурс элементов и определить их законы распределения;

- по результатам стендовых испытаний с использованием активного планирования и математической статистики получить уравнение регрессии $y_{t=1}$ ПТС от действующих факторов. При необходимости определить значение α;

- используя метод статистического моделирования или полученное выражение определить экспериментальное распределение послеремонтного ресурса элементов и при необходимости аппроксимировать его известным законом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электродвигатели асинхронные серии 4А. Технические требования на капитальный ремонт. ТК 700009.003-85.б М.: ГОСНИТИ, 1986, с. 92.

2. Автомобили ГАЗ-330706 и 330707. Руководство по ремонту. Автоэкспорт СССР. М.: Внешторгиздат, 1998. С. 174.

3. Технические требования на текущий ремонт пускателей типа ПМЕ-071, ПМЕ-111, ПМЕ-211, ТТ 70.0004.106-79. Минск: ВНИИТИМЖ, 1979. С.39.

4. Дружинин Г.В. Надёжность автоматизированных систем. М.: Энергия, 1977. С. 536.

5. Дулин В.А. Методы исследования надёжности низковольтных аппаратов. М.: Энергия, 1970. С. 152.

6. Соболь И.М. Метод Монте-Карло. М.:. Наука, 1978. С. 64.

7. Венцель Е.Р. Теория вероятностей. М.: Наука. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969. С. 576.

8. Методические указания. Методика выбора и оптимизации контролируемых параметров технологических процессов. РДМУ 109-77.М.: Изд. стандартов, 1978. С. 64.

9. Котелец Н.Ф., Кузнецов Н.Л. Испытания и надёжность электрических машин. М.: Высшая шк. 1988. С. 232.

10. А.с. 690355 (СССР). Устройство для контроля износа подшипников/ Буторин В.А., Пястолов А.А. -Опубл. В Б.И. 1979 №37.