ТЕХНІЧНІ НАУКИ

DOI: <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2021-9-97-16>

УДК 620.169.1

Федухин А.В., Муха А.А.

Институт проблем математических машин и систем
Национальной академии наук Украины

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ОПОР КОНТАКТНОЙ СЕТИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Аннотация. Статья посвящена решению вопросов, связанных с проведением оценки и прогнозирования остаточной несущей способности опор контактной сети на любом этапе жизненного цикла. В статье исследованы теоретические вопросы, возникающие при проведении вероятностных расчетов при прогнозировании остаточной несущей способности опор. Предложено использование вероятностно-физического подхода для оценки реального технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса изделий, когда отсутствуют отказы. В рамках вероятностно-физического подхода к оценке усталостной долговечности используется вероятностная модель (*DM*-распределение отказов), параметры которой имеют физическую интерпретацию – среднюю скорость изменения определяющего параметра (критерия годности) и коэффициент вариации обобщенного процесса деградации. В качестве определяющего параметра принята ширина раскрытия трещин на теле опоры и предполагается, что при определении дефектности опоры допускается вычислять суммарную ширину раскрытия.

Ключевые слова: вероятностно-физический подход, остаточный ресурс опор, вероятностно-физическая модель надежности.

Fedukhin Alexandr, Mukha Artem

The Institute of Mathematical Machines and Systems Problems
of the National Academy of Sciences of Ukraine

PREDICTION OF THE RESIDUAL LIFE OF RAILROAD CATENARY POLES

Summary. With the development and modernization of the railway transport network, an urgent task is to assess the residual life of the supports after their long-term operation under real cyclic loads. In this regard, an urgent task is to assess the residual life of the supports after their long-term operation under conditions of real cyclic loads. Therefore, the article is devoted to solving issues and problems associated with the assessment and forecasting of the residual bearing capacity of the overhead contact network at any stage of the life cycle. The article investigates theoretical issues arising from probabilistic calculations when predicting the residual bearing capacity of supports. The article compares the deterministic method (which does not take into account the random nature of the phenomena) and the probabilistic forecasting method. The use of a probabilistic-physical approach is proposed for assessing the real technical condition and predicting the residual life of products when there are no failures. Within the framework of a probabilistic-physical approach to assessing fatigue life, a probabilistic model (*DM*-distribution of failures) is used, the parameters of which, in their physical interpretation, have – the average rate of change of the determining parameter (validity criterion) and the coefficient of variation of the generalized degradation process. The width of the crack opening on the support body was chosen as the defining parameter, and it was assumed that when determining the defectiveness of the support, it is allowed to calculate the total opening width. Thanks to the application of the method using a probabilistic-physical reliability model that takes into account the physical nature of destruction, a result is obtained that reflects the real service life of the investigated products. On the basis of the obtained data on the assessment of the technical condition of the structure and the residual life, an informed decision can be made about the possibility of its further operation in accordance with the residual or assigned resource (repair, decrease in operating parameters, dismantling).

Keywords: probabilistic-physical approach, residual life of supports, probabilistic-physical model of reliability.

Постановка проблемы. Действие постоянной нагрузки и появление дополнительных воздействий приводят к постепенному накоплению дефектов и повреждений в опорах контактной сети, что связано в будущем с изломом опоры и обрывом проводов.

В связи с этим, определение остаточной несущей способности опор контактной сети на любом этапе жизненного цикла является главным вопросом оптимизации ремонтных работ и реконструкции, установлении очередности замены, а прогнозирование срока службы опор контактной сети в целом становится актуальной технической и экономической задачей.

Существующие методы исследования надежности конструкций при усталостных разрушениях либо являются детерминистическими (не учитывающими случайную природу явлений), либо опирающимися на строго вероятностные модели отказов, заимствованные из математической статистики, не учитывающими физику отказов объектов [1].

В случае детерминистических методов усталостная прочность определяется путем воздействия разных уровней циклического напряжения на отдельные испытываемые образцы и нахождение количества циклов до разрушения. Предполагается, что полное разрушение, вызванное множеством циклов напряжения, равно сумме

повреждений, вызванных отдельными циклами напряжений (теория линейного суммирования повреждений Майнера).

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы. Актуальной задачей является оценка остаточного ресурса опор после их длительной эксплуатации в условиях реальных циклических нагрузок. В рамках вероятностно-физического подхода к оценке усталостной долговечности используется вероятностная модель (диффузионное монотонное *DM*-распределение отказов), параметры которой имеют физическую интерпретацию – среднюю скорость изменения определяющего параметра (критерия годности) и коэффициент вариации обобщенного процесса деградации.

Примечание 1. Полная амплитуда напряжений проходит раз в сезон (с учетом ветрогололёдных нагрузок от нуля до максимальной нагруженности по амплитуде), откуда 4 цикла равны 1 году реального времени (40 циклов – 10 лет, 320 циклов – 80 лет).

Примечание 2. Первые незначительные разрушения наступают через 25 лет, при этом предел усталости ограничен 160 циклами (40 лет). На основе анализа практического опыта эксплуатации опор контактной сети эти результаты получили своё подтверждение. Действительно, опоры служат и 60, и 70 лет [1].

Целью статьи является разработка метода оценки остаточного ресурса опор контактной сети железных дорог с использованием вероятностно-физической модели надежности – *DM*-распределения наработки до отказа.

Изложение основного материала. В соответствии с Указаниями [3] эксплуатация опор возможна при определённых значениях ширины раскрытия трещин, их длины, количества и местоположения. В случае, когда дефекты превышают допустимые значения принято считать, что опора теряет свою несущую способность, а в терминологии теории надежности это классифицируется как отказ.

Детерминистический расчет среднего остаточного ресурса опоры

На основе нормативных требований к расчёту железобетонных опор была решена задача определения ресурса опоры для оценки остаточного срока службы [1].

Примечание 3. Допускается наличие трёх продольных трещин (наиболее частый вид дефекта) шириной раскрытия до 1,5 мм, то при определении дефектности опоры допускается вычислять суммарную ширину раскрытия.

Примечание 4. Предполагается, что суммарная ширина раскрытия трещин, равная 4,5 мм, будет соответствовать исчерпанию ресурса опоры. Нормативный срок жизни 40 лет приравнивается к суммарной ширине раскрытия трещин, равной 4,5 мм.

Разработана номограмма для определения остаточного срока службы опор с учётом климатических условий в зависимости от ширины раскрытия трещин и кривой жизни при допущении прямолинейной зависимости изгибающего момента (рис. 1).

Правила пользования номограммой заключаются в следующем:

При наличии продольных трещин

1. Определяется суммарная ширина раскрытия трещин, например, на рис. 1 – 3,5 мм).

2. Восстанавливается перпендикуляр до пересечения с кривой дефектности, получаем точку 1.

3. Из точки 1 проводится горизонталь до пересечения с кривой жизни, получаем точку 2.

4. Проводится вертикаль до пересечения с кривой остаточной несущей способности, получаем точку 3.

5. Проводится горизонталь из точки 3 до пересечения с координатной осью, получаем точку 4, соответствующую величине остаточного ресурса по рисунку (26% или 12 лет). При нормативном сроке службы 47 лет и остаточном ресурсе 12 лет, полный ресурс опоры составляет 59 лет.

При отсутствии продольных трещин

1. Необходимо воспользоваться осью срока эксплуатации опоры.

2. Проводится вниз вертикаль до пересечения с кривой остаточной несущей способности, получаем точку 3, в нашем случае 40 годам эксплуатации соответствует ширина раскрытия трещин 3,3 мм.

3. Проводится горизонталь из точки 3 до пересечения с координатной осью, получаем точку 4, при этом остаточная несущая способность составляет 30% или 12 лет. При нормативном сроке службы 40 лет и остаточном ресурсе 12 лет, полный ресурс опоры составляет 52 года.

Вероятностно-физический метод расчета среднего ресурса

В настоящем разделе предлагается процедура оценки реального технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса изделий, когда отсутствуют отказы (критические разрушения опор), но могут быть измерены в процессе эксплуатации (испытаний) значения ресурсного (определяющего) параметра Π , достижение которым своего предельного значения Π_{np} приводит к предельному состоянию или отказу.

Имеется возможность для периодического измерения ресурсного (определяющего) параметра $\varphi(t)$.

Предполагается, что известно или задается пороговое значение определяющего параметр $\varphi(t) = \Pi_{np}$.

Проводят измерения определяющего параметра через определенный период времени эксплуатации (испытаний) Δt . Период принимают равным значению, обеспечивающему некоррелированные приросты $\Delta\varphi(\Delta t)$.

Интервал корреляции приростов определяют заранее или в процессе испытаний (эксплуатации), приняв в начале интервалы измерения определяющего параметра $\Delta t \ll \Delta t$. В результате измерений получают ряд значений (неубывающих) ресурсного параметра $\varphi(t)$ для определенных моментов наработки (которые растут) $\varphi(t_1)$; $\varphi(t_2) = \varphi(t_1 + \Delta t)$; $\varphi(t_n) = \varphi(t_{n-1} + \Delta t)$; $\varphi(t_{n+1}) = \varphi(t_n + \Delta t)$. Количество приростов (измерений) n должно быть не менее десяти (значения $n \geq 10$).

В качестве теоретической модели надежности принимаем *DM*-распределение наработки до отказа [2], поскольку разрушения на данном типе изделий являются необратимыми.

$$F(t) = DM(t; \mu, \nu) = \Phi\left(\frac{t - \mu}{\nu \sqrt{\mu t}}\right), \quad (1)$$

Рис. 1. Номограмма для определения остаточного ресурса опор

Таблица 1

**Значения коэффициентов
вариации основных процессов
деградации (разрушения)**

Вид процесса деградации	Коэффициент вариации процесса разрушения
Усталость:	
малоцикловая	0,15 – 0,40
многоцикловая	0,40 – 1,00
контактная	0,40 – 1,20

где $\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z \exp\left(-\frac{U^2}{2}\right) dU$ – нормированное нормальное распределение;

μ – параметр масштаба (средняя наработка до отказа);

v – коэффициент вариации обобщенного процесса деградации;

t – суммарная наработка.

Параметрическая форма записи DM -распределения выглядит следующим образом:

$$F(t) = DM(t; a, v) = \Phi\left(\frac{at + \Pi_1 - \Pi_0}{v\sqrt{at(\Pi_0 - \Pi_1)}}\right), \quad (2)$$

где a – средняя скорость изменения определяющего параметра – критерия годности;

Π_0 – начальное измеренное значение определяющего параметра;

Π_1 – максимальное измеренное значение определяющего параметра.

В нашем случае параметрами DM -распределения являются средняя линейная скорость раскрытия трещин a и коэффициент вариации процесса раскрытия трещин v .

По данным измерений вычисляют среднюю скорость изменения определяющего параметра:

$$a = \frac{1}{\Delta t \cdot n} \cdot \sum_{i=1}^n [\varphi(t_{i+1}) - \varphi(t_i)] = \frac{1}{\Delta t \cdot n} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta \varphi_i. \quad (3)$$

Коэффициент вариации приростов (скорости изменения определяющего параметра) определяют из следующих рекомендаций (табл. 1)

Если определяющий параметр изделия меняется монотонно (необратимые изменения, то есть все $\Delta \varphi_i$ имеют знак плюс или некоторые равны нулю), тогда вычисляют средний остаточный ресурс по формуле:

$$\tilde{\pi}(\tau) = \frac{(\Pi_{np} - \Pi_1)}{a} \left(1 + \frac{v^2}{2}\right). \quad (4)$$

где τ – наработка после t_1 ;

Π_{np} – предельное значение определяющего параметра (критерия годности).

Пример. Вычислить остаточный ресурс опор после $t_1 = 40$ лет эксплуатации. Исследованию подвергались 50 опор одного года производства и введения в эксплуатацию. Через каждые 5 лет эксплуатации опор проводились обследования процесса трещинообразования и вычислялась средняя величина раскрытия трещин l_i (табл. 2).

График тренда средней ширины раскрытия трещин изображен на рис. 2.

Рис. 2. График изменения средней ширины раскрытия трещин

Таблица 2
Зависимость средней ширины раскрытия трещин

Интервал измерения, i	Время эксплуатации, t_i , лет	Средняя ширина раскрытия трещин, l_i , мм
1	5	1,3
2	10	1,6
3	15	1,9
4	20	2,2
5	25	2,3
6	30	2,7
7	35	3,0
8	40	3,3

Решение.

1. Вычислим среднюю скорость изменения ресурсного определяющего параметра l_i

$$a = \frac{1}{\Delta t \cdot n} \cdot \sum_{i=1}^n [\varphi(t_{i+1}) - \varphi(t_i)] = \frac{1}{\Delta t \cdot n} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta \varphi_i;$$

$$\Delta t = 5 \text{ лет} = 5 \cdot 8760 = 43800 \text{ ч}; n = 8;$$

$$\Delta \varphi_i = (0,3; 0,3; 0,3; 0,1; 0,4; 0,3; 0,3);$$

$$\sum_{i=1}^n \Delta \varphi_i = 2 \text{ мм};$$

$$a = \frac{1}{\Delta t \cdot n} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta \varphi_i = \frac{2}{43800 \cdot 8} = 5,7 \cdot 10^{-6} \text{ мм/час.}$$

3. Определим коэффициент вариации процесса разрушения выбираем из табл. 1 для многоциклового усталости $v = (0,4+1,0)/2 = 0,7$.

4. Определим значения определяющих параметров

$$P_{np} = l_{max} = 4,5 \text{ мм}; P_1 = l_1(t_1) = 3,3 \text{ мм.}$$

5. Определим средний остаточный ресурс опор

$$\tilde{\pi}(\tau) = \frac{(P_{np} - P_1)}{a} \left(1 + \frac{v^2}{2} \right) = \frac{(4,5 - 3,3)}{5,7 \cdot 10^{-6}} \left(1 + \frac{0,7^2}{2} \right) = 261000 \text{ час} = 29,8 \text{ лет.}$$

6. Определим полный средний ресурс опор составляет

$$\pi = t_1 + \tilde{\pi}(\tau) = 40 + 29,8 \approx 70 \text{ лет.}$$

Выводы и предложения. Основными этапами определения остаточного ресурса несущей конструкции являются:

- анализ исходной технической документации;
- оценка технического состояния;
- анализ результатов оценки технического состояния;
- определение остаточного ресурса.

В рамках анализа исходной технической документации устанавливают номенклатуру технических параметров конструкции и предельные состояния, выявляют наиболее вероятные отказы и повреждения, способные привести к отказу конструкции.

Оценка технического состояния конструкции даёт информацию о её реальном техническом состоянии, наличии в ней повреждений, причин и механизмов их возникновения и развития.

Оценка остаточного ресурса производится расчетным путем для комплекса однотипных опор, установленных в одно время и эксплуатируемых в одинаковых условиях.

На основании данных оценки технического состояния конструкции и остаточного ресурса должно приниматься обоснованное решение о возможности её дальнейшей эксплуатации в соответствии с остаточным или назначенным ресурсом (ремонт, снижение рабочих параметров, демонтаж [4]).

Для описанных примеров, в результате детерминистического расчета для случая продольных трещин и нормативном сроке службы 47 лет остаточный ресурс равен 12 годам, а полный ресурс опоры составляет 59 лет. При отсутствии продольных трещин и нормативном сроке службы 40 лет остаточный ресурс равен 12 годам, а полный ресурс опоры составляет 52 года.

Расчет остаточного ресурса вероятностно-физическим методом показал величину остаточного ресурса 29 лет и полный ресурс 70 лет. Как показывает длительная практика эксплуатации, реально опоры служат 60 и 70 лет, практически двойной назначенный срок, что подтверждается вероятностно-физическим методом.

Список литературы:

1. Демина Л.С. Повышение эффективности эксплуатации железобетонных опор контактной сети электрофицированных железных дорог прогнозированием их остаточного ресурса : автореф. канд. диссерт. Хабаровск : ДВГУПС, 2021.
2. Стрельников В.П., Федухин А.В. Оценка и прогнозирование надёжности электронных элементов и систем. Киев : Логос, 2002. 486 с.
3. Указания по техническому обслуживанию и ремонту опорных конструкций контактной сети: утв. 19.12.2008: № К-146-2008 / Российская Федерация. ОАО «РЖД», Департамент электрификации и электроснабжения. Москва : Трансиздат, 2008. 86 с.
4. Утеулиев Б.А. Определение остаточного ресурса железобетонных опор воздушных линий электропередачи 110 кВ и выше. *Энергетик*. 2017. № 3. С. 13–17.

References:

1. Demina L.S. (2021) Increasing the efficiency of operation of reinforced concrete supports of the contact network of electrified railways by predicting their residual life: author's abstract. cand. dissertation. Khabarovsk: DVGUPS.
2. Strelnikov V.P., Feduhin A.V. (2002) Ocenka i prognozirovaniye nadyozhnosti elektronnykh elementov i sistem [Assessment and prediction of the reliability of electronic elements and systems]. Kyiv: Logos, 486 p.
3. Ukazaniya po tekhnicheskomu obsluzhivaniyu i remontu opornykh konstruktsiy kontaktnoy seti: utv. 19.12.2008: № К-146-2008 / Rossijskaya Federaciya. ОАО «RZHD», Departament elektrifikacii i elektrosnabzheniya. Moscow: Transizdat, 2008. 86 p.
4. Uteuliev B.A. (2017) Opredelenie ostatochnogo resursa zhelezobetonnykh opor vozdushnykh linij elektroperedachi 110 kV i vyshe [Determination of the residual life of reinforced concrete poles of overhead power lines 110 kV and higher]. *Energetik*, no. 3, pp. 13–17.