УДК 629.4.083

М. И. КАПИЦА, В. В. ЛАГУТА (ДИИТ)

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПЕРИОДОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ КАТУШЕК ВОЗБУЖДЕНИЯ ТЭД

Розглядається задача визначення раціональних періодів відновлення ізоляції котушок збудження ТЕД на основі прогнозування надійності, спираючись на стохастичні методи.

Рассматривается задача определения рациональных периодов восстановления изоляции катушек возбуждения ТЭД на основе прогнозирования надежности, опираясь на стохастические методы.

The article considers the task of determining the rational timing for renewal of the excitation spools insulation in tractive electric motors on the basis of prognosticating the reliability, stochastic methods being used as the reference point.

Вопросы прогнозирования износовых отказов и рационального содержания технических объектов рассматривались в работах К. Н. Войнова (механические системы), А. С. Гальперина и И. В. Шипкова (объекты машиностроения), Б. Е. Боднаря (гидравлические системы), А. И. Брейда, В. А. Овсянникова, Р. Ш. Ягудина, В. В. Сапожникова и В. В.Сапожникова, B. W. Johnson's (системы железнодорожной автоматики и цифровые устройства). Фундаментально теоретические вопросы содержания технических объектов рассмотрены Б. В. Гнеденко и А. А. Босовым.

Целью данной работы является разработка постановки задачи расчета плановых восстановлений изоляции катушек возбуждения ТЭД, принимая в качестве показателя износа изоляции возвратное напряжение.

В качестве показателя износа изоляции катушки возбуждения ТЭД примем величину максимального значения возвратного напряжения $v(t)$ (далее возвратное напряжение), $t$ – наработка [1].

Износ большинства технических объектов (металлические детали, пластмассовые детали и т. п.) в эксплуатации носит нелинейный характер [2]. Если построить графическую зависимость износ-наработка, кривая, содержащая участки, отвечающие приработке и нормальному изнашиванию, по внешнему виду часто напоминает параболу. Полагаем, что функция износа изоляции квадратичная. Возможно и линейное приближение износа изоляции от наработки.

Максимальную величину возвратного напряжения будем рассматривать как случайную величину для любого момента наработки $t$, а совокупность значений возвратного напряжения – как случайный процесс $V(t)$. Реализацией случайного процесса $v(t)$ является функция возвратного напряжения для конкретной катушки конкретного двигателя конкретного локомотива.

В сечении случайного процесса считаем, что случайная величина (возвратное напряжение) имеет нормальный закон распределения.

Изоляцию катушки рассматриваем как систему с постепенными отказами (износовые отказы) [2; 3]. При построении дифференциальной функции распределения износовых отказов изоляции полагаем, что известен закон распределения возвратного напряжения в зависимости от наработки. Поскольку эта задача трудновыполнима, то необходимо построить дифференциальные функции распределения возвратного напряжения (закон распределения полагается нормальным) для следующих моментов наработки:

− изоляция новая (момент наработки $T_0$);

− катушка пришла в ремонт 1-й раз (момент наработки $T_1$);

− катушка прошла 1-е восстановление (момент наработки $T_1$);

− катушка пришла в ремонт 2-й раз (момент наработки $T_2$);

− катушка прошла 2-е восстановление (момент наработки $T_2$);

− катушка пришла в ремонт последний раз (списывание, момент наработки $T_k$).

Моменты наработки $T_0$, $T_1$, ..., $T_k$, соответствующие пунктам А–К, назовем технологическими моментами контроля и восстановления изоляции.

Период времени, соответствующий промежутку между технологическим моментом восстановления $T_i$ и технологическим моментом контроля (поступления в ремонт) $T_{i+1}$, назовем $i+1$-м периодом наработки $\Delta T_{i+1}$, $\Delta T_{i+1} = T_{i+1} - T_i$, $i = 1 \ldots k-1$.

Введем понятие удельной стоимости восстановления изоляции до первого отказа за $k$ периодов наработки. Общая стоимость восстановления включает: стоимость новой катушки $W_0$, стоимость 1-го восстановления $W_1$, стоимость 2-го восстановления $W_2$, …, стоимость $k-1$-го восстановления $W_{l-1}$, стоимость списания $W_c = W_k$

$$W = W_0 + W_1 + ... + W_{k-1} + W_c .$$

Удельную стоимость восстановления изоляции до первого отказа определим как отношение общих затрат на восстановление к величине наработки до первого отказа $T$

$$w = \frac{W}{T} . \tag{1}$$

Стоимости восстановлений $W_1, \ldots, W_{k-1}$ примем одинаковыми и равными $W_{\text{в}}$, не изменяющимися в зависимости от наработки, тогда

$$w = \frac{W_0 + (k-1)W_{\text{в}} + W_{\text{с}}}{T} . \tag{2}$$

Естественным требованием построения программы восстановления является минимум удельной стоимости восстановления изоляции до первого отказа.

Задачу определения рациональных периодов восстановления изоляции катушек возбуждения ТЭД можно сформулировать так. Пусть известны: математическое ожидание износа изоляции $m_v(t)$, задающего средний темп изменения возвратного напряжения; среднеквадратическое отклонение $\sigma_v(t)$, характеризующее степень рассеивания изменения возвратного напряжения в течение наработки; предельный допуск значения возвратного напряжения $\tilde{V}$; количество периодов наработки $k$. Необходимо определить такие периоды восстановления (периоды наработки) $\Delta T_1$, $\Delta T_2, \ldots$, $\Delta T_k$, чтобы удельная стоимость восстановления до первого отказа $w$ была минимальной. При этом значение функции изменения среднего темпа изменения возвратного напряжения для наработки в конце пробега

$$T_k = \Delta T_1 + \Delta T_2 + ... + \Delta T_k \tag{3}$$

равнялось допуску возвратного напряжения $\tilde{V}$, т. е.

$$\min_{\{\Delta T_i\}_{i=\overline{1,k}}} w \tag{4}$$

$$m_v\left(\Delta T_1 + \Delta T_2 + \ldots + \Delta T_k\right) = \tilde{V} , \tag{5}$$

$$\Delta T_i > 0,\ i = 1,...,k . \tag{6}$$

Поскольку числитель выражения (2) величина постоянная, то исходная задача (4)–(6) эквивалентна следующей. Для известного количества периодов наработки (периодов восстановления) $k$ и известных из опыта зависимостей $m_v(t)$, $\sigma_v(t)$, допуска $\tilde{V}$ необходимо определить такие периоды восстановления $\Delta T_1$, $\Delta T_2$, …, $\Delta T_k$, чтобы средняя наработка до первого отказа $T$ была максимальной и при этом значение функции изменения среднего темпа возвратного напряжения для наработки в конце пробега $T_k$ равнялась допуску возвратного напряжения

$$\max_{\{\Delta T_i\}_{i=k}} T = \int_0^\infty \tau\varphi(\tau)d\tau , \tag{7}$$

$$m_v\left(\Delta T_1 + \Delta T_2 + \ldots + \Delta T_k\right) = \tilde{V} , \tag{8}$$

$$\Delta T_i > 0,\ i = 1,...,k . \tag{9}$$

Задача (4)–(6) как и (7)–(9) является задачей оптимизации на условный экстремум. Для обеспечения существования решения задач (4)–(6) и (7)–(9) изменим неравенства (6) и (9), а именно, введем в каждое из них малую положительную величину наработки $\varepsilon > 0$, что не ухудшит качество решения для рассматриваемой задачи в инженерном смысле, т. е.

$$\Delta T_i \geq \varepsilon,\ i = 1,...,k .$$

Сформулируем основные предположения, касающиеся постановки исходной задачи. При оценке вероятности безотказной работы по причине износа учитываем:

− рассеивание исходного качества изоляции новой или восстановленной обмотки катушки подчиняется определенному закону распределения (например, нормальному);

− нелинейный характер износа качества изоляции – возвратного напряжения, для которого рассеивание темпа износа изоляционного материала растет по мере увеличения периода наработки;

− изменения эффективности работы других элементов катушки на вероятность безотказной работы в процессе эксплуатации не влияют.

При изготовлении или восстановлении материала изоляции в расчетах должно учитываться рассеивание исходного качества.

Функция $\varphi(t)$ в выражении (7) есть дифференциальная функция распределения износовых отказов изоляции катушки возбуждения ТЭД. Функция $\varphi(t)$ строится по известным зависимостям математического ожидания износа $m_v(t)$ (уравнение износа изоляции, отвечающее среднему ожидаемому темпу изнашивания), среднеквадратического отклонения $\sigma_v(t)$ (или в данном случае уравнение, характеризующее степень рассеивания параметра в течение наработки), предельного допуска на износ $\tilde{V}$. Для нормального закона распределения уход свойств качества изоляции (напомним, что в нашем случае показатель качества это зависимость величины максимального значения возвратного напряжения обмотки от наработки) определяется формулой плотности распределения наработки до отказа [5]

$$\varphi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\left|\left[\frac{\tilde{V}-m_v(t)}{\sigma_v(t)}\right]'\right| \exp\left\{-\frac{\left[\tilde{V}-m_v(t)\right]^2}{2\sigma_v^{\,2}(t)}\right\} \qquad (10)$$

Значение предельного допуска по износу изоляции $\tilde{V}$ (нижнее предельное значение возвратного напряжения), вообще говоря, является «плавающим» (выбирается по воле обслуживающего персонала), так как оно должно учитывать рассеивание исходного качества изоляционного материала при изготовлении или восстановлении. Расчет вероятности безотказной работы производим по формуле

$$P(t) = 1 - Q(t) = 1 - \int_0^t \varphi(\tau)d\tau\,,$$

где $Q(t)$ – вероятность отказа.

Относительно функций $m_v(t)$ и $\sigma_v(t)$ в выражении (10) заметим следующее. Как функция $m_v(t)$, так и $\sigma_v(t)$ в общем случае являются кусочно-непрерывными и представляются в виде:

$$m_v(t) = \begin{cases} m_v^{\,1}(t),\ T_0 \le t \le T_1, \\ m_v^{\,2}(t),\ T_1 \le t \le T_2, \\ \dots \\ m_v^{\,k}(t),\ T_{k-1} \le t \le T_k; \end{cases}$$

$$\sigma_v(t) = \begin{cases} \sigma_v^{\,1}(t),\ T_0 \le t \le T_1, \\ \sigma_v^{\,2}(t),\ T_1 \le t \le T_2, \\ \dots \\ \sigma_v^{\,k}(t),\ T_{k-1} \le t \le T_k. \end{cases}$$

Функции $m_v^{\,i}(t)$ и $\sigma_v^{\,i}(t)$ определяются из статистических наблюдений (для конкретного локомотивного депо) для всех периодов наработки $\Delta T_i$, $i = 1,\dots,k$ и являются непрерывными. В проводимом исследовании для функций $m_v^{\,i}(t)$ была выбрана квадратичная зависимость, а для функций $\sigma_v^{\,i}(t)$ использовалась линейная и $\sigma_v^{\,i}(t) = \text{const}$ .

При решении задачи (7)–(9) используется численное интегрирование несобственного интеграла (7). Для построения вычислительной схемы можно прибегнуть к методу [7], но могут быть использованы специальные средства популярных математических пакетов, например Maple [8]. Учитывая тот факт, что функция $m_v(t)$ в общем случае имеет разрывы первого рода, решение задачи (7)–(9) проводится хорошо зарекомендовавшим себя методом Нелдера-Мида [9].

## Выводы

В качестве показателя износа изоляции может служить возвратное напряжение.

Система содержания изоляции определяется функцией математического ожидания возвратного напряжения $m_v(t)$ – отвечающей среднему ожидаемому темпу изнашивания, функцией среднеквадратического отклонения возвратного напряжения $\sigma_v(t)$ – характеризующей степень рассеивания параметра в течение наработки, предельного допуска на износ $\tilde{V}$ – выбираемого по воле обслуживающего персонала.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК


1. Серебряков А. С. Оценка состояния корпусной изоляции тяговых двигателей // Железнодорожный транспорт. –, 1999. – № 12. – С. 25–27.
2. Войнов К. Н. Опыт оценки надежности механических систем. ЛДНТП. – 1975. – 37с.
3. Хевиленд Р. Инженерная надежность и расчет на долговечность. – М.: «Энергия». – 1966. – 232 с.
4. Бугров Я. С. Элементы линейной алгебры и аналитической геометрии / Я. С. Бугров, С. М. Никольский. – М: Наука. – 1988. – 224 с.
5. Гнеденко Б. В. Математические методы в теории надежности / Б. В. Гнеденко, Ю. К. Беляев, А. Д. Соловьев. – М.: Наука. – 1965. – 524 с.
6. Пугачев В. С. Введение в теорию вероятностей. – М.: Наука, 1968. – 368 с.
7. Березин И. С. Методы вычислений / И. С. Березин, Н. П. Жидков. – Т.1. –М.: Наука. – 1966. – С. 242–247.
8. Говорухин В. Н. Введение в Maple V. Математический пакет для всех. – М.: Мир. – 1997.
9. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. – М.: Мир, 1975. – 536 с.


Поступила в редколлегию 23.11.2005.