

**О МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИЗНОСА ИЗОЛЯЦИИ  
ОБМОТОК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН И ОПЫТНОМ  
ОПРЕДЕЛЕНИИ ЕЕ ПАРАМЕТРОВ**

А. Я. ЦИРУЛИК, В. Н. ПОПОВ, И. А. ВОЛКОМИРСКИЙ

(Представлена научным семинаром кафедры электрических машин)

Долговечность обмоток электрических машин зависит от скорости процессов старения изоляции под влиянием воздействующих эксплуатационных факторов. Скорость старения, в свою очередь, зависит от уровней воздействующих факторов. Прогнозирование параметров долговечности обмоток невозможно, если не известна математическая модель старения изоляции как функция выходных параметров изоляции, характеризующих ее состояние, от входных факторов эксплуатации. Теоретическое нахождение этой модели невозможно в разумные сроки, поэтому должен быть использован экспериментальный метод поиска.

Входными параметрами модели износа изоляции являются конструктивно-эксплуатационные факторы: электродинамические усилия, действующие на обмотку при работе машины, вибрации, центробежные усилия, температура обмотки, влажность среды, электрические перенапряжения при пусках и реверсах, наличие в окружающей среде едких паров и пыли и т. п. При наличии нескольких, а тем более многих входных параметров нахождение математической модели экспериментальным путем может быть осуществлено лишь путем постановки статистически спланированного многофакторного эксперимента. Так как зависимость срока службы изоляции от многих факторов является нелинейной, то требуется выполнение нелинейного плана эксперимента. Вид модели износа изоляции не известен. Теория планирования эксперимента предусматривает в этом случае задание модели полиномом второй, третьей или более высокой степени. Даже при планировании второй степени при четырех входных переменных центральный композиционный план включает 31 опыт, что требует испытать 31 машину минимум, если каждому опыту соответствует одна машина. Чтобы получить функцию старения изоляции с координатой времени, план необходимо реализовать для трех минимум значений длительности испытаний. Всего требуется поставить 93 опыта, что требует 93 машины. Это дорого и трудоемко. При большем числе входных параметров или при задании модели полиномом третьей степени эксперимент становится чрезмерно громоздким и дорогим. Объем экспериментального исследования можно значительно уменьшить, если использовать данные физико-химической теории разрушения материалов и представить модель износа изоляции в виде, соответствующем этой теории.

Общие физико-химические закономерности процессов теплового, механического и химического разрушения металлов, диэлектриков, полимеров, полупроводников и других материалов описываются, как пра-

вило, экспоненциальной функцией [1]. Так, «время жизни» образца материала от начала приложения механической нагрузки до разрушения есть функция вида

$$\tau = \tau_0 \cdot \exp \left( \frac{U_0 - \gamma \cdot \sigma}{R \cdot T} \right), \quad (1)$$

где

$\tau_0$ ,  $U_0$ ,  $\gamma$  — параметры, характеризующие прочностные свойства материала;

$T$  — температура, °K;

$R$  — универсальная газовая постоянная.

Скорость  $v$  процесса трещинообразования может быть определена из выражения

$$v = v_0 \cdot \exp \left( - \frac{U_0 - \gamma \cdot \sigma}{kT} \right). \quad (2)$$

Кинетика распада химических связей в процессе механического разрушения полимеров такова, что скорость накопления осколков макромолекул (свободных радикалов) равна [2]

$$\dot{n} = 2n_v \cdot \omega_0 \cdot \exp \left( - \frac{U_0 - \gamma \cdot k \cdot \sigma(n_s)}{RT} \right), \quad (3)$$

где

$n_v$ ,  $\omega_0$  — константы,

$k$  — коэффициент концентрации напряжений.

Согласно уравнению Аррениуса зависимость константы  $K$  скорости химической реакции от величины энергии активации  $E$  определяется выражением

$$K = B \cdot \exp \left( - \frac{E}{RT} \right). \quad (4)$$

Срок службы полимерных материалов, в которых происходят процессы старения, связанные с термической, окислительной и механической деструкцией, устанавливаются по предельно допустимому изменению основных свойств. Если ввести обобщенную характеристику  $S$  основных свойств изоляции обмотки электрической машины — механических, физических, диэлектрических, то можно зависимость величины  $S$  от времени записать в следующем виде [1]:

$$\ln S = -K \cdot t + \ln S_0. \quad (5)$$

Из этого выражения можно определить предельный срок жизни изоляции обмотки, в течение которого характеристика  $S$  становится равной заданному предельно допустимому значению  $S_{пр}$ , ограничивающему возможность эксплуатации изделия:

$$\ln \tau_{пр} = \ln [\ln S_{пр} - \ln S_0] - \ln K. \quad (6)$$

Константу скорости процессов разложения и разрушения изоляции под воздействием температуры и физико-механических факторов согласно общим законам кинетики процессов разрушения можно представить в общем случае в виде

$$\ln K = \ln K_0 - \frac{1}{RT} \cdot \left( a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \cdot x_i \right), \quad (7)$$

где

$a_0$ ,  $a_i$  — константы;

$x_i$  — факторы эксплуатации: температура, механические воздействия, влажность, агрессивность среды и другие.

Если  $\frac{1}{T}$  обозначить как  $x_{n+1}$  и раскрыть скобки, то получим

$$\ln K = \ln K_0 + \left( a_0 \cdot x_{n+1} + \sum_{i=1}^n a_i \cdot x_i \cdot x_{n+1} \right) \frac{1}{R}. \quad (8)$$

Это неполный квадратный многочлен, в котором есть члены только первой степени и с парными произведениями переменных. В общем случае зависимость константы скорости разрушения можно искать в виде

$$\ln K = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i<j}^n b_{ij} x_i x_j. \quad (9)$$

Прологарифмируем выражение (5) и подставим в него значение  $K$  из (9), получим

$$\ln t = \ln \ln \frac{S}{S_0} - b_0 - \sum_{i=1}^n b_i x_i - \sum_{i<j}^n b_{ij} x_i x_j. \quad (10)$$

Предельную наработку  $\tau_{пр}$  получим из этого выражения, если подставим вместо  $S$  заданное  $S_{пр}$ . Выражение (10) является математической моделью долговечности изоляции обмотки. Коэффициенты модели  $b_0$ ,  $b_i$ ,  $b_{ij}$  необходимо определить экспериментально. Для этого в течение времени  $t = \tau_1$  необходимо испытать исследуемые машины в условиях воздействия факторов  $x_i$ . Уровни факторов  $x_i$  в каждом опыте соответствуют плану эксперимента. В новых неработавших машинах необходимо определить начальное значение  $S_0$  характеристики состояния изоляции, а в испытанных в течение времени  $\tau_1$  — параметр  $S_1$  изоляции для каждого опыта. Путем регрессионного анализа результатов эксперимента можно найти параметры  $b_0$ ,  $b_i$ ,  $b_{ij}$  как коэффициенты полинома

$$y = \ln \ln \frac{S_1}{S_0} = \ln \tau_1 + b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i<j}^n b_{ij} x_i x_j = b'_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i<j}^n b_{ij} x_i x_j. \quad (11)$$

Таким образом, показано, что экспоненциальная математическая модель долговечности изоляции, экспоненциальный вид которой вытекает из закономерностей процессов термической, механической и химической деструкции, может быть преобразована к виду неполного квадратного многочлена, коэффициенты его могут быть найдены по линейному ортогональному плану многофакторного эксперимента. Это приводит к большому сокращению объема эксперимента, количества требуемых для испытаний машин. Так, при трех и четырех входных факторах при использовании дробных ортогональных планов достаточно восьми машин, а при пяти, шести и семи факторах достаточно шестнадцати машин. Такой метод используется нами при проведении исследования долговечности изоляции якорных обмоток машин постоянного тока серии П.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И. М. Меламедов. Физические основы надежности. Л., «Энергия», 1970.
2. Э. Е. Томашевский. Изучение кинетики механического разрушения полимеров. Автореферат диссертации. ФТИ АН СССР, 1966.