

УДК: 621.315.62.001.18:51

Г. В. Суханкин, кандидат технических наук, Алтайский государственный технический университет имени И. И. Ползунова, Барнаул

Н. Т. Герцен, кандидат технических наук, ОАО «Алтайский дом печати», Барнаул

МОДЕЛЬ СТАРЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК СТАТОРА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ

Модель старения изоляции представляет собой математические закономерности, с помощью которых описаны основные характеристики этого процесса. Цель создания подобной модели – упрощение реального процесса, выделение главных факторов, влияющих на старение.

Ключевые слова: модель, повреждающее воздействие, диагностический параметр, изоляция.

Известно, что старение изоляции электрической машины (ЭМ) – это сложный процесс, механизмы которого действуют на разных уровнях: молекулярном, макромолекулярном, макроскопическом. Старение на макромолекулярном уровне приводит, например, к разрыву связей (термическое воздействие), макроскопическом – расстрескиванию (механические нагрузки) и др. Однако с точки зрения состояния изоляции как ресурса ЭМ важно количественно оценить степень ее деградации, не вдаваясь в детали происходящих изменений.

Механизм процессов, протекающих при старении изоляции, определяет изменение во времени t ее показателя состояния в зависимости от условий x_1, x_2, \dots, x_n : $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n, t)$, где $f(x_1, x_2, \dots, x_n, t)$ является функцией старения, причем факторы, имеющие одинаковую меру, могут существенно отличаться друг от друга. Например, температура изоляции нагреваемой проводниками обмотки ЭМ может значительно превышать температуру окружающей среды.

В качестве показателя могут использоваться: сопротивление изоляции, коэффициент абсорбции, тангенс угла диэлектрических потерь, модуль упругости и др. Важно отметить, что для объективной оценки состояния практически любого объекта необходимо использовать набор показателей (вектор состояния). Однако полный набор как входных, так и выходных параметров модели приводит к ее усложнению таким образом, что расчет становится либо громоздким, либо провести его вообще невозможно.

Анализ условий эксплуатации ЭМ на производстве и их влияния на процессы старения изоляции показывает, что существуют две группы воздействующих факторов, влияющих на состояние изоляции. Первую группу воздействующих факторов составляют условия окружающей среды, а вторую – режимы работы.

С учетом свойств электроизоляционной системы ЭМ и требований к описанию динамических процессов условия окружающей среды описываются следующими параметрами: температурой окружающей среды $T_{\text{возд}}$, °С; относительной влажностью окружающего воздуха $\varphi_{\text{возд}}$, %; концентрацией агрессивных примесей $N_{\text{агр.пр}}$, мг/м³, и пыли $N_{\text{пылин}}$, мг/м³. Данные параметры окружающей среды являются непре-

рывно сезонно и суточно изменяющимися величинами. В математической модели старения изоляции ЭМ они представлены в виде временных рядов среднемесячных значений [1].

С помощью разработанных технических средств путем испытания ЭМ в камере теплоты и влаги, а также на вибростенде при воздействии на них влажности X_1 (0–100 %), температуры X_2 (0–200 °С) и виброскорости X_3 (0–420 мм/с) получены данные по затуханию акустических сигналов, связанные с изменением модулем упругости изоляции E и свидетельствующие о степени ее старения (рис. 1). Методика измерения E подробно рассмотрена в [2].

Испытания проводились до отказа ЭМ. Согласно ГОСТам 21126–75, 10518–88, 24683–81, 9.083–78, 9.707–81, 9.715–76 использовались планирование и методика проведения испытаний.

При обработке экспериментальных данных формировалась многомерная матрица, в которой столбцы соответствуют результатам регистрации воздействующих факторов, а строки – номеру режима эксперимента.

$$E = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & x_{2m} \\ \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & x_{n2} & x_{nm} \end{bmatrix},$$

где E – диагностический признак.

В приведенной матрице элемент x_{ij} соответствует значению i наблюдения j -фактора. Объектом последующей обработки является стандартизированная безразмерная матрица S , упрощающая расчеты, которая вычисляется следующим образом:

$$s_{ij} = \frac{(x_{ij} - \mu_1(x_j))}{\sigma(x_j)}, \quad i = 1, \bar{n}, \quad j = 1, \bar{m},$$

где математическое ожидание $\mu_1(x_j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij}$

и дисперсия $\mu_2(x_j) = \sigma^2(x_j) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \mu_1(x_j))^2$.

Регрессионный анализ проводился с привлечением метода наименьших квадратов с использованием нелинейных уравнений типа $E = A_0 + A_1 / t^2$, $E = A_0 + A_1 / t + A_2 t^2$ (табл. 1).

Таблица 1. Связь между диагностическим параметром и временем старения для некоторых типов изоляции и их модели старения

Тип изоляции	КП-103	КП-101	КП-18	МЛ-92	КП-34
ρ_{ik}	0,87	0,83	0,77	0,80	0,81
Регрессия вида $E = A_0 + A_1 / t^2$	$A_0 = 2,1$ $A_1 = -1,1$	$A_0 = 2,2$ $A_1 = 2,1$	$A_0 = 1,9$ $A_1 = 1,6$	$A_0 = 2,1$ $A_1 = 1,4$	$A_0 = 2,0$ $A_1 = 1,5$
Регрессия вида $E = A_0 + A_1 / t + A_2 t^2$	$A_0 = 2,2$ $A_1 = 5,1$ $A_2 = -1,0$	$A_0 = 2,1$ $A_1 = 4,7$ $A_2 = -1,1$	$A_0 = 2,3$ $A_1 = 3,3$ $A_2 = -1,4$	$A_0 = 1,9$ $A_1 = 4,7$ $A_2 = -1,5$	$A_0 = 1,8$ $A_1 = 4,6$ $A_2 = -1,5$

Коэффициенты регрессии рассчитывались по формулам (табл. 2):

$$A_0 = \frac{\sum_{i=1}^n E_i \sum_{i=1}^n t_i^2 - \sum_{i=1}^n (t_i E_i) \sum_{i=1}^n t_i}{n \sum_{i=1}^n t_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n t_i \right)^2};$$

$$A_1 = \frac{n \sum_{i=1}^n t_i E_i - \sum_{i=1}^n t_i \sum_{i=1}^n E_i}{n \sum_{i=1}^n t_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n t_i \right)^2}.$$

Таблица 2. Расчет коэффициентов регрессии модели теплового старения изоляции

№ эксп.	t	E	$t1 = 1 / t^2$	$t1^2$	$t1E$
i	t_i	E_i	$t1_i = 1 / t_i^2$	$t1_i^2$	$t1_i E_i$
...
n	t_n	E_n	$t1_n = 1 / t_n^2$	$t1_n^2$	$t1_n E_n$
		$\sum E$	$\sum t1$	$\sum t1^2$	$\sum t1E$

Экспериментальные данные зависимости модуля упругости от времени теплового старения для некоторых типов изоляции приведены на рис. 1.

В процессе эксплуатации происходит старение изоляции, при этом значение диагностического параметра (ДП) E возрастает. Для унификации значений ДП, наглядности и удобства использования на практике необходимо произвести его нормирование (рис. 2):

$$E_{\text{норм}} = E_{\text{ном}} / E,$$

где $E_{\text{норм}}$ – нормированный ДП; $E_{\text{ном}}$ – номинальное значение ДП, соответствующее стадии изготовления ЭМ; E – измеренное значение ДП.

Проведенные экспериментальные исследования подтверждают, что диагностический параметр E позволяет адекватно описывать динамику изменения состояния изоляции обмоток статора в процессе эксплуатации ЭМ и согласуется с разработанной моделью.

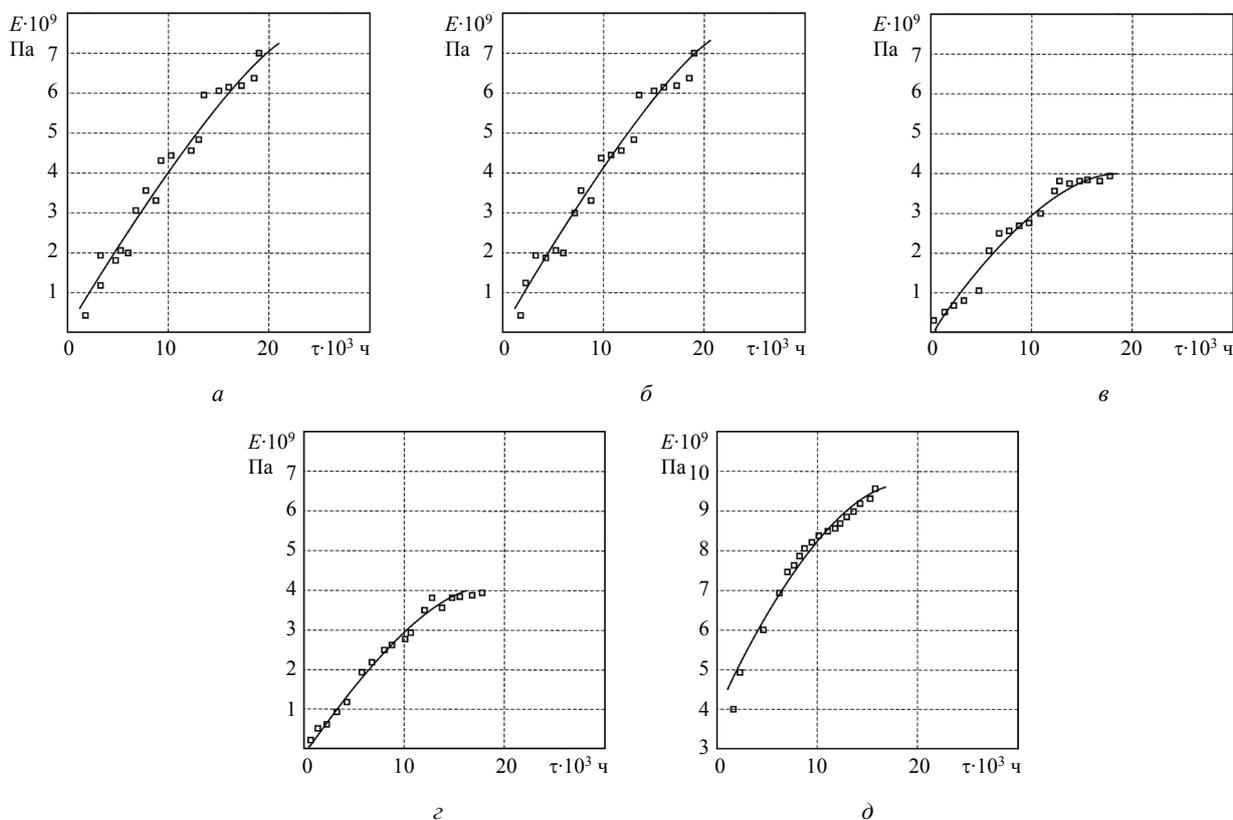


Рис. 1. Экспериментальные данные зависимости модуля упругости от времени τ теплового старения изоляции ЭМ, измеренных при 90 °С: а – КП-103; б – КП-101; в – КП-18; г – МЛ-92; д – КП-34; □ – эксперимент; — – регрессия

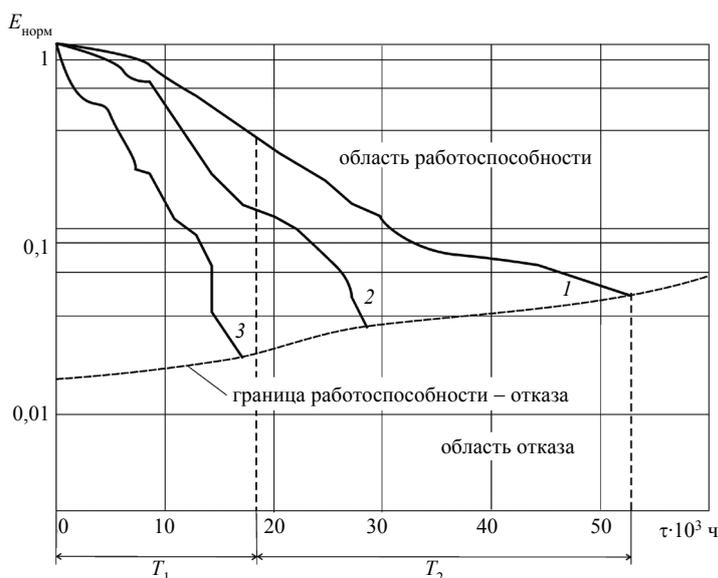


Рис. 2. Изменение нормированного E в процессе старения изоляции ЭМ (асинхронный двигатель серии 4А, мощность 1,5 кВт): T_1 – период нормальной эксплуатации; T_2 – период старения (для нормального режима); режимы эксплуатации: 1 – нормальный; 2 – повышенная влажность и температура; 3 – резкие колебания температуры, повышенная вибрация и влажность

Библиографические ссылки

1. Готов И. А. Математические модели для прогнозирования технического состояния изоляции электрооборудования // Ползуновский вестник. – 2009. – № 1. – С. 68–75.

2. Суханкин Г. В., Герцен Н. Т. Акустическая диагностика изоляции электрических машин // Ползуновский вестник. – 2006. – № 4-2. – С. 424–429.

G. V. Sukhankin, Candidate of Technical Sciences, Altai State Technical University after I. I. Polzunov
N. T. Gertsen, Candidate of Technical Sciences, OJSC “АДП”

A Model of Aging of Insulation of Electric Machines Stator Windings

The model of insulation aging is a mathematical regularity by which the main characteristics of the process are described. The purpose of creating such a model is simplification of the actual process, highlighting the main factors influencing the aging process.

Key words: model, damaging effects, diagnostic parameter, isolation.

УДК 621.3.014

М. Бартлова, доктор технических наук, доцент, Технологический университет г. Брно, Чешская Республика
Н. Н. Богатырёва, аспирант, Технологический университет г. Брно, Чешская Республика

ПЕРЕНОС ЭНЕРГИИ ИЗЛУЧЕНИЯ В ДУГЕ ПЛАЗМЫ

Описывается метод аппроксимации при решении уравнения переноса энергии в дуге цилиндрической термической плазмы. С помощью метода многогруппового приближения, а также с помощью средних величин, рассчитанных 2 способами (планковское среднее и росселандово среднее), получены частотные переменные уравнения переноса, а также найдены величины net emission.

Ключевые слова: электрическая дуга, коэффициент поглощения, перенос излучения, планковские и росселандовы средние величины.

Перенос энергии излучения играет важную роль в устройствах обработки плазмы. При этом получение информации о физических процессах, происходящих в электрических дугах, с помощью измерений осложняется экстремальными экспериментальными условиями, например, высокими температурами, давлениями, скоростями проте-

кающих процессов и т. п. В этом случае очень важно математическое моделирование.

Энергетический баланс в дуге плазмы

Электрический разряд плазмы приносит относительно большое количество энергии. При этом пропорции энергии можно описать уравнением Эленбаас – Хеллера для стационарного состояния дуги плазмы: