

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ
НАДЕЖНОСТИ ВИТКОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ
ВСЫПНЫХ ОБМОТОК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН
В ПЕРИОД ПРИРАБОТКИ**

А. С. ГИТМАН, Ю. П. ПОХОЛКОВ, Э. К. СТРЕЛЬБИЦКИЙ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин
и общей электротехники)

Целью настоящей работы является построение теоретико-вероятностной модели надежности витковой изоляции электрических машин, на основе которой по данным о качестве провода и повреждаемости его в технологическом процессе можно было бы оценить надежность машины на наиболее важном участке — в период приработки.

Элементом модели является изоляционный промежуток между соседними проводниками с пробивным напряжением

$$u_{\text{эл}} = u_{\text{э}} + u_{\text{л}}, \quad (1)$$

где

$u_{\text{э}}$ — сумма пробивных напряжений эмалевых слоев соседних проводов,

$u_{\text{л}}$ — пробивное напряжение промежутка, находящегося между изолированными проводами.

Поскольку по длине провода величины $u_{\text{э}}$ и $u_{\text{л}}$ меняются, разбиваем провод на участки длиной Δl , на протяжении которых указанные величины остаются неизменными. Таким образом, обмотка общей длиной L состоит из $N' = \frac{L}{\Delta l}$ элементарных отрезков, или из $N'' = \frac{L}{l_{\text{ст}}}$ стандартных отрезков. Стандартная длина образца при испытаниях электрической прочности $l_{\text{ст}} = 125$ мм. Общее число элементарных промежутков

$$N_1 = \nu N'.$$

ν зависит от конфигурации сечения секции в пазу и лобовых частях и находится в пределах

$$2 < \nu < 3.$$

Если за расчетный элемент принять отрезок длиной $l_{\text{ст}}$, то число промежутков

$$N = \nu N''.$$

Если $q_{\text{эл}}(u)$ — вероятность пробоя элемента при напряжении u , то надежность обмотки при этом напряжении равна

$$R(u) = [1 - q_{\text{эл}}(u)]^{N_1}. \quad (2)$$

Определим теперь $q_{\text{эл}}(u)$ и N_1 . Поскольку случайные величины $u_{\text{э}}$ и $u_{\text{л}}$ распределены по различным законам, то определяем отдельно $q(u \geq u_{\text{э}})$ и $q(u \geq u_{\text{л}})$. Первичный статистический материал по пробоям витковой изоляции проводов, а также схема технологического процесса нанесе-

ния эмальпокрытия дают основание принять распределение u , приблизительно нормальным с плотностью

$$\varphi_1(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_3} \exp\left[-\frac{(u-u_3)^2}{2\sigma_3^2}\right]. \quad (3)$$

В предельном случае, т. е. при отсутствии промежутков между изолированными проводами, плотность минимальных пробивных напряжений обмотки в соответствии с [1, 2]

$$\begin{aligned} \varphi(u) &= N_1 f_1(u) \left[1 - \int_{-\infty}^u f_1(u) du\right]^{N_1-1} = \\ &= N_1 f_1(u) \left[1 - F\left(\frac{u-u_3}{\sigma_3}\right)\right]^{N_1-1}. \end{aligned} \quad (4)$$

$F(z)$ — интегральная функция распределения.
Доля дефектных участков длиной Δl

$$q_{13} = \int_{-\infty}^0 f_1(u) du. \quad (5)$$

Вероятность короткого замыкания пары

$$q_{23} = d_{13}^2. \quad (6)$$

Вероятность виткового замыкания в машине

$$q = 1 - (1 - q_{13}^2)^{N_1}. \quad (7)$$

Вероятность отсутствия виткового замыкания, т. е. нижняя оценка заводской надежности витковой изоляции машины

$$R_H = (1 - q_{13}^2)^{N_1}. \quad (8)$$

Если в качестве элемента принят участок стандартной длины, то

$$R_H = (1 - kq_{1ст}^2)^N, \quad (9)$$

k — вероятность совпадения оголенных мест.

Если в качестве элемента принята скрутка длиной $l_{ст}$, то

$$R_H = (1 - q_{скр})^N, \quad (10)$$

$q_{скр}$ — доля скруток, имеющих замыкания.

$$k = \frac{q_{скр}}{q_{1ст}^2}. \quad (10)$$

Таким образом, для расчета потенциальной аварийности всыпных обмоток достаточно знать $q_{1ст}$, N и k .

Величину $q_{1ст}$ можно определить по результатам испытаний на пробой стандартных образцов. Величину k можно определить путем сравнительных испытаний в дроби и в скрутках по формуле (10).

Выражения (7) и (9) определяют долю машин, имеющих витковые замыкания при плотном контакте между изолированными проводами, и являются верхней оценкой аварийности машин по этой причине в период приработки. Наличие лаковых и воздушных промежутков уменьшает аварийность. Распределение пробивных напряжений этих промежутков должно подчиняться показательному закону [3] с плотностью

$$f_2(u) = \lambda \exp(-\lambda u), \quad (11)$$

где

$$\lambda = \frac{1}{E_{л\bar{x}}},$$

\bar{x} — средний размер промежутка,

$E_{л}$ — электрическая прочность пропиточного лака.

При приложении испытательного напряжения будет пробито не 100 q% машин, а значительно меньшая часть, определяемая выражением

$$Q_{\text{исп}} = q \int_0^{u_{\text{исп}}} \lambda \exp(-\lambda u) du = q [1 - \exp(-\lambda u_{\text{исп}})], \quad (12)$$

$u_{\text{исп}}$ — испытательное напряжение паза.

Таким образом, хотя большинство промежутков имеет малые размеры и не может обеспечить надежную работу машин, они скрывают дефекты эмалевого покрытия, и поэтому испытательная станция выявляет лишь небольшую часть слабых мест.

Со временем $u_{\text{л}}$ уменьшается по ряду причин: уменьшение $E_{\text{л}}$ вследствие нагревания и механического разрушения и уменьшение x вследствие недостаточной цементации. Скорость уменьшения $U_{\text{л}}$ зависит от свойств пропиточного лака и качества пропитки. Можно показать, что при достаточно широких предположениях относительно характера уменьшения $u_{\text{л}}$ распределение времени наработки на отказ будет подчиняться закону, близкому к показательному.

100 q% машин имеют скрытые дефекты с плотностью пробивных напряжений, определяемой выражением (11). Плотность распределения пробивных напряжений остальных 100 (1-q)% машин определяется композицией

$$f_3(u) = \varphi_1(u) * f_2(u) = \lambda \exp[-\lambda(u - \bar{u}_3 - 0,5\lambda\sigma_3^2)] F\left(\frac{u - \bar{u}_3 - \lambda\sigma_3^2}{\sigma_3}\right). \quad (13)$$

Таким образом, плотность распределения пробивных напряжений в машине

$$q(u) = qf_2(u) + (1-q)f_3(u). \quad (14)$$

В период приработки доля машин, отказавших по причине виткового замыкания, определяется по формуле

$$q_0 = \int_0^{u_0} q(u) du \quad (15)$$

Следует иметь в виду, что u_0 иногда значительно больше рабочего напряжения паза из-за возникающих перенапряжений при отключении двигателя [4].

u_0 является решением уравнения

$$q'(u) = 0. \quad (16)$$

Полученные соотношения были применены для оценки надежности витковой изоляции асинхронного двигателя типа А032-4А. Ниже приводятся исходные данные для расчета и оценка полученных результатов. Данные обмотки: провод ПЭВА-2 \varnothing 0,83 мм, $N=1600$, $k=0,003$. Статистические параметры пробивных напряжений провода на отдельных этапах технологической цепочки приведены в табл. 1.

Таблица 1

Этап	$0,5 \bar{U}_3$	$0,5\sigma_3$	$v = \frac{\sigma_3}{\bar{U}_3}$	$Q_{\text{ист}}$
До намотки на шаблон	4,15	1,99	0,48	0,019
После шаблона	4,05	1,94	0,48	0,019
После укладки в паз	1,40	1,18	0,84	0,120

Подставив приведенные данные в формулы (9), (12) и (15), получим следующие результаты:

потенциальная вероятность контакта $q=0,17$;

вероятность отказа в период приработки $q_0=0,065$ ($R=0,935$);

вероятность пробоя на испытательной станции $q_{исп}=0,0012$.

Для сравнения приводим экспериментально-статистические данные: доля отказов по причине виткового замыкания в период приработки по данным ВНИИЭМ $q_0=0,02\dots 0,055$;

доля машин, имевших витковые замыкания на испытательной станции завода «Сибэлектромотор» в период отбора материалов, $q_{исп}=0,0011$.

Выводы

1. Количество и размеры оголений эмалевого покрытия определяют количество отказов в период приработки. Интенсивность отказов в этот период распределена по показательному закону с параметром, зависящим от качества пропитки.

2. Предложенные формулы позволяют оценить надежность витковой изоляции всыпных обмоток в период приработки на основе данных о качестве витковой изоляции с учетом повреждаемости при обмоточно-изолировочных работах.

3. На надежность обмотки средняя величина пробивного напряжения витковой изоляции провода оказывает незначительное влияние. Качество проводов почти исключительно определяется разбросом величины пробивного напряжения или долей дефектных проводов.

4. Установлено, что в процессе укладки в пазы наносится большое число повреждений эмальизоляции. Снижение повреждаемости провода на этой операции позволяет существенно повысить надежность всыпных обмоток при существующих эмальпроводах.

5. Уровень контроля витковой изоляции на заводе-изготовителе недостаточен для выявления слабых мест.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. С. Зингерман. Определение пробивного напряжения по испытаниям образцов. «Электричество», 1950, № 3.
2. А. С. Зингерман. Статистический метод определения пробивного напряжения диэлектрика, ЖТФ, т. 18, № 8, 1948.
3. В. Феллер. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. Мир, 1964.
4. Р. Рюденберг. Переходные процессы в электроэнергетических системах. ИЛ, 1955.