

МЕТОД ОЦЕНКИ ДЕФЕКТНОСТИ ИЗОЛЯЦИИ НИЗКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

А. П. МАТЯЛИС, Э. К. СТРЕЛЬБИЦКИЙ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин
и общей электротехники)

Накопленный экспериментальный материал дает основание утверждать, что в эксплуатации и при испытаниях пробой изоляции обмоток низковольтных электрических машин может произойти только при наличии дефекта. Под дефектом здесь понимается элементарный участок изоляции, пробивное напряжение которого соответствует напряжению перекрытия на длине, равной толщине изоляции. Дефектностью будем называть число дефектов на единицу длины или площади изоляции.

Дефект может иметь место в состоянии поставки (инородные включения, оголения), возникнуть в процессе изготовления обмотки (порезы, проколы) и образоваться в результате старения (трещины, отслаивания).

Надежность обмотки при известном конструктивном исполнении и заданных условиях эксплуатации полностью определяется дефектностью. Поэтому получение исходных данных для расчета вероятности безотказной работы и гамма-процентного ресурса сводится к определению числа дефектов.

Ранее в качестве характеристик дефектности определялся уровень дефектности по результатам испытаний изоляции, извлеченной из пазов непропитанного статора. Витковая изоляция испытывается в электродах провод-дробь или провод-плоскость, а корпусная — в электродах игла-плоскость.

Недостатком такого способа является неприменимость для оценки дефектности изоляции пропитанных обмоток.

В настоящей работе для оценки дефектности предлагается определение расстояний между ближними дефектами путем пробоя пар проводников в машине или вне машины. Соответствие между двумя указанными способами испытаний обусловлено тем, что пуассоновское распределение числа дефектов на отрезке провода приводит к показательному распределению расстояний между дефектами. Однако использование в расчетах расстояний и напряжений перекрытия позволяет отказаться от условного понятия длины (площади) элементарного участка и приближает модель отказа к фактическому механизму пробоя.

Максимальные перенапряжения между витками обмотки не превышают 1 кВ, однако при испытаниях таким напряжением пробьется небольшая доля расстояний между дефектами. Для получения достоверной статистики необходимо либо увеличивать число образцов, либо

Таблица 1

U_i (кг)	$\Delta U_j = U_{ii} - U_{ii'}^{(кг)}$																	M_{ij}
	частота																	
	0-0,4	0,4-0,8	0,8-1,2	1,2-1,6	1,6-2,0	2,0-2,4	2,4-2,8	2,8-3,2	3,2-3,6	3,6-4,0	4,0-4,4	4,4-4,8	4,8-5,2	5,2-5,6	5,6-6,0	6,0-6,4	6,4-6,8	
до 2,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,0-2,4	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1
2,4-2,8	1	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2
2,8-3,2	1	—	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2
3,2-3,6	3	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4
3,6-4,0	4	—	—	—	—	2	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	7
4,0-4,4	5	1	—	1	2	1	—	2	—	1	—	—	—	—	—	—	—	13
4,4-4,8	10	—	1	—	2	—	1	—	1	1	—	4	—	—	—	—	—	20
4,8-5,2	7	1	—	1	2	—	3	1	—	4	2	3	2	—	—	—	—	26
5,2-5,6	7	1	2	3	—	2	2	6	—	2	4	5	3	8	—	—	—	51
5,6-6,0	2	1	2	2	2	1	1	3	4	6	3	8	8	5	6	—	—	54
6,0-6,4	2	—	1	—	1	2	5	5	5	3	9	8	16	7	9	7	—	80
6,4-6,8	—	—	1	1	—	1	1	2	3	3	4	1	2	4	5	2	4	34
6,8-7,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	1	1	2	5
7,2-7,6	—	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1
Σu_j	43	4	8	8	10	9	15	20	19	20	22	29	31	25	21	10	6	

увеличивать испытательное напряжение. При увеличении напряжения может быть пробита изоляция, не имеющая повреждений. Для распознавания таких случаев после первого пробоя производится повторная подача напряжения. В случае перекрытия между дефектами вторичное пробивное напряжение незначительно (до $0,4 \div 0,8$ кВ) отличается от первичного. В случае пробоя изоляции вторичное напряжение значительно снижается.

В табл. 1 приведены результаты кассетных испытаний пар соприкасающихся проводов ПЭТВ диаметром 0,85 мм, один из которых имел одно искусственное повреждение. В таблице ясно видны области точек с

$$\Delta U = U_1 - U_2 \leq 0,6 \div 0,8 \text{ кВ},$$

соответствующих перекрытиям, и с

$$\Delta U > 0,8 \text{ кВ},$$

соответствующих пробоям изоляции.

Вероятность перекрытия с пореза на дефект при напряжении U_k равна

$$P_T(U_k) = 1 - e^{-\lambda 2x_k}, \quad (1)$$

где

x_k — расстояние, соответствующее U_k ;

$\lambda = \frac{1}{x}$ — дефектность;

x — среднее расстояние между дефектами.

Вероятность пробоя изоляции напряжением U_k , если отсутствуют перекрываемые этим напряжением дефекты, равна

$$Q(U_k) = \int_0^{U_k} f_{2x}(U) dU, \quad (2)$$

где

$f_{2x}(U)$ — плотность распределения пробивного напряжения участка изоляции длиной $2x_k$.

Вероятность того, что при повышении напряжения от 0 до U_{k-1} не произойдет перекрытия, а в интервале $U_{k-1} - U_k$ произойдет пробой изоляции, равна

$$q_k' = e^{-2\lambda x_{k-1}} \int_{U_{k-1}}^{U_k} f_{2x}(U) dU. \quad (3)$$

Вероятность того, что при повышении напряжения от 0 до U_{k-1} не произойдет пробоя, а в интервале $U_{k-1} - U_k$ произойдет перекрытие

$$p_k^1 = \left(1 - \int_0^{U_{k-1}} f_{2x}(U) dU \right) (e^{-2\lambda x_{k-1}} - e^{-2\lambda x_k}) \quad (4)$$

Две последние вероятности известны из опыта. Интересующие нас вероятности можно получить из выражений (3) и (4):

$$q_k = \int_{U_{k-1}}^{U_k} f_{2x}(U) dU = \frac{q_k'}{e^{-2\lambda x_{k-1}}}, \quad (5)$$

$$p_k = e^{-2\lambda x_{k-1}} - e^{-2\lambda x_k} = \frac{p_k'}{1 - \int_0^{U_{k-1}} f_{2x}(U) dU} \quad (6)$$

Поскольку величины $e^{-2\lambda x_{k-1}}$ и $\int_0^{U_{k-1}} f_{2x}(U) dU$ неизвестны,

предлагается итерационный расчет по рекуррентным формулам, причем для первого разряда принимается

$$q_1 = \int_0^{U_1} f_{2x}(U) dU \approx q_1' \quad (7)$$

$$p_1 = 1 - e^{-2\lambda x_1} \approx p_1' \quad (8)$$

Полная схема расчета приведена в табл. 2. По найденному значению $P_T(U_k)$ из выражения (1) определяется среднее расстояние между дефектами.

Таблица 2

p_1'	p_2'	p_3'	...	p_k'	
q_1'	q_2'	q_3'	...	q_k'	
$p_1 \approx p_1'$	$p_2 = \frac{p_2'}{1 - q_1}$	$p_3 = \frac{p_3'}{1 - q_1 - q_2}$	...	$p_k = \frac{p_k'}{1 - q_1 - \dots - q_{k-1}}$	$\sum_{i=1}^k p_i = P_T(U_k)$
$q_1 \approx q_1'$	$q_2 = \frac{q_2'}{1 - p_1}$	$q_3 = \frac{q_3'}{1 - p_1 - p_2}$	...	$q_k = \frac{q_k'}{1 - p_1 - \dots - p_{k-1}}$	$\sum_{i=1}^k q_i = Q(U_k)$

Аналогично производится определение дефектности корпусной изоляции. Дефектность λ в этом случае выражает число дефектов на единицу площади и определяется из выражения

$$P_T(U_k) = 1 - e^{-\lambda S_k} \quad (9)$$

Здесь

S_k — площадь изоляции, в пределах которой ведется поиск дефекта напряжением U_k . Эта площадь определяется по величине x_k и зависит от типа и размеров испытательных электродов.

В заключение отметим, что при применении изложенного метода определения дефектности витковой изоляции непосредственно на готовой машине путем испытания двух соседних витков поиск дефекта ведется со всех дефектов, существующих на одном из образцов. В результате чего формула (1) принимает вид

$$P_T(U_k) = 1 - e^{-2\lambda^2 l x_k}, \quad (10)$$

где l — длина испытываемой части витка.