

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ СТАРЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ НИЗКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

А. П. МАТЯЛИС, Э. К. СТРЕЛЬБИЦКИЙ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин
и общей электротехники)

В процессе старения полимеров происходит изменение структуры и потеря эластичности. Существенно повышается вероятность появления трещин.

Постепенное уменьшение пробивного напряжения, приблизительно равномерное по объему, и достаточно быстрое развитие трещин в совокупности образуют общую картину изменения электрических свойств изоляции. Однако причиной отказа являются именно трещины, так как эксплуатационные перенапряжения недостаточны для пробоя изоляции.

При испытаниях состаренной изоляции распознавание причин пробоя не производится, в то время как при высоких испытательных напряжениях может произойти как перекрытие между трещинами, так и пробой изоляции.

Введение в рассмотрение параметров трещин (числа и скорости образования) вместо среднего и дисперсии пробивных напряжений образцов существенно повышает разрешающую способность измерительно-информационных средств путем устранения помех, создаваемых неповрежденными участками, имеющих большой вес в совокупности. Это уменьшает рассеивание оценки параметров старения и создает физическую основу для пересчета результатов, полученных при ускоренных испытаниях изоляционных систем. Кроме того, введение дискретного принципа изменения параметров процесса (числа трещин) вместо непрерывного (пробивного напряжения) позволяет, во-первых, применить хорошо разработанный аппарат расчета вероятности безотказной работы и, во-вторых, единообразно учитывать дефекты как технологического, так и эксплуатационного происхождения.

В процессе изготовления обмотки на изоляции появляются царапины и вмятины, являющиеся источниками концентрации напряжений и очагами зарождения трещин. Поэтому испытания желательно проводить на реальных электрических машинах, либо на макетах с достаточной имитацией технологического процесса.

Нами поставлен эксперимент с целью получения зависимости скоростей трещинообразования от условий эксплуатации. В настоящей работе описан план эксперимента и методика изготовления опытных образцов. В качестве объекта взят асинхронный двигатель АО2-32-4.

Уровни воздействующих факторов приведены в табл. 1.

Выходными параметрами взяты интенсивность потока трещин и первые два момента пробивного напряжения изоляции. Предполагается, что отклик выходных параметров описывается либо в форме

Факторы	Единица измерения	Кодовое обозначение	Уровни		
			+	0	-
Температура	°С	x ₁	145	135	125
Частота реверсов	мин ⁻¹	x ₂	2,5	2	1,5
Вибрация	двойная амплитуда, мк	x ₃	260	180	100

$$y = b_0(t) + \sum_{i=1}^3 b_i(t) x_i + \sum_{i=1}^3 b_{ii}(t) x_i^2, \quad (1)$$

либо в форме

$$\ln y = b_0(t) + \sum_{i=1}^3 b_i(t) x_i + \sum_{i=1}^3 b_{ii}(t) x_i^2. \quad (2)$$

Для получения коэффициентов отклика поставлен эксперимент, реализованный на полуреplikе центрального композиционного рототабельного равномерного плана второго порядка [1]. Матрица планирования приведена в табл. 2.

Таблица 2

№ опыта	Уровни факторов		
	x ₁	x ₂	x ₃
1	+	+	+
2	+	-	-
3	-	-	+
4	-	+	-
5	+√2	0	0
6	-√2	0	0
7	0	-√2	0
8	0	+√2	0
9	0	0	-√2
10	0	0	+√2
11 ÷ 16	0	0	0

Получение кинетики процесса старения производится путем повторения плана для четырех длительностей испытаний: 1000, 2000 (3000), 4000 (5000) часов. В результате обработки можно получить уравнения для коэффициентов полинома:

$$\begin{aligned} b_0 &= b_0(t), \\ b_i &= b_i(t), \\ b_{ii} &= b_{ii}(t). \end{aligned}$$

При подготовке машин к испытаниям необходимо ориентироваться на большой разброс характеристик. Подготовка машин к испытаниям состоит в следующем. Перед укладкой обмотки некоторые пары витков, следующие по схеме обмотки, связываются в лобовых частях в восьми местах. Связки выполняются для обеспечения касания по всей длине витка и распознавания пар при испытаниях. Между слоями корпусной изоляции с обеих сторон каждого паза укладываются электроды из многожильного провода на расстоянии 50 мм по оси. В каждой машине получаем, таким образом, 150 образцов витковой изоляции и 72 — корпусной. Лобовая часть со стороны последующей разделки не пропитывалась.

По окончании запланированного времени старения непропитанная лобовая часть разрезается, при этом витки попарно фиксируются. Для предотвращения пробоя в местах, поврежденных при разводке пар, разрезанная лобовая часть пропитывается 5—6 раз в лаке. При испытаниях разведенные проводники погружаются в трансформаторное масло.

Каждый образец витковой и корпусной изоляции пробивается дважды. По величине разности между первичным и вторичным напря-

жением производится распознавание перекрытия и пробоя изоляции. Экспериментально установлено, что перекрытию соответствует разность напряжений до 0,6 кВ.

В табл. 3 и 4 приведены распределения пробивных напряжений витковой изоляции двигателей, проработавших при температуре обмотки 135°С соответственно 1000 и 4000 часов. Пробивные напряжения образцов, находящихся в первом столбце, характеризуют расстоя-

Таблица 3

Результаты испытания витковой изоляции двигателя, проработавшего 1000 часов при температуре обмотки 135°С

U_{1i} (кВ)	$\Delta U_j = U_{1i} - U_{2i}$ (кВ)											Σn_j
	до 0,6	0,6—1,6	1,6—2,4	2,4—3,2	3,2—4,0	4,0—4,8	4,8—5,6	5,6—6,4	6,4—7,2	7,2—8,0	8,0—8,8	
0 — 0,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,8 — 1,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,6 — 2,4	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1
2,4 — 3,2	1	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	2
3,2 — 4,0	1	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2
4,0 — 4,8	2	—	—	—	1	2	—	—	—	—	—	5
4,8 — 5,6	2	—	1	—	—	1	3	—	—	—	—	7
5,6 — 6,4	1	1	1	1	1	2	2	5	—	—	—	14
6,4 — 7,2	—	2	2	3	1	1	2	4	10	—	—	25
7,2 — 8,0	1	1	1	1	2	1	—	3	2	5	—	17
8,0 — 8,8	—	—	—	—	1	1	—	1	2	1	3	9
8,8 — 9,6	—	—	—	1	—	—	2	—	—	—	1	5
9,6 — 10,4	—	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—	1
10,4 — 11,2	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—	—	1
Σn_j	9	5	6	6	7	9	9	13	14	7	4	89
$\bar{U} = 6,735$ кВ												
$\sigma = 1,5428$ кВ												
$\bar{x} = 444,9$ мм												

Таблица 4

Результаты испытаний витковой изоляции двигателя, проработавшего 4000 часов при температуре обмотки 135°С

U_{1i} (кВ)	$\Delta U_j = U_{1i} - U_{2i}$ (кВ)											Σn_j
	до 0,6	0,6—1,6	1,6—2,4	2,4—3,2	3,2—4,0	4,0—4,8	4,8—5,6	5,6—6,4	6,4—7,2	7,2—8,0	8,0—8,8	
0,0 — 0,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0
0,8 — 1,6	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1
1,6 — 2,4	3	1	1	—	—	—	—	—	—	—	—	5
2,4 — 3,2	3	1	2	3	—	—	—	—	—	—	—	9
3,2 — 4,0	5	2	2	—	6	—	—	—	—	—	—	15
4,0 — 4,8	4	1	2	1	1	4	—	—	—	—	—	13
4,8 — 5,6	2	1	1	4	2	—	7	—	—	—	—	17
5,6 — 6,4	1	—	1	2	1	1	3	3	—	—	—	12
6,4 — 7,2	—	—	1	1	1	1	1	1	3	—	—	9
7,2 — 8,0	—	—	—	1	—	—	—	1	1	—	—	4
8,0 — 8,8	—	—	—	—	—	—	1	—	—	—	1	2
Σn_j	19	6	10	12	11	7	12	5	4	0	1	87
$\bar{U} = 4,8024$ кВ												
$\sigma = 1,6010$ кВ												
$\bar{x} = 230,49$ мм												

ние между трещинами и дефектами. По среднему расстоянию между трещинами определяется дефектность изоляции [2]. Пробивные напряжения остальных образцов представляют собой минимальные пробивные напряжения изоляции на соответствующих длинах или площадях.

Сравнение данных табл. 3 и 4 показывает, что в процессе старения изоляции наряду с уменьшением пробивных напряжений недефектной изоляции происходит сильное увеличение числа трещин. Число трещин используется в качестве исходных данных для расчета вероятности безотказной работы за заданное время.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Налимов, Н. А. Чернова. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. «Наука», М., 1965.

2. А. П. Матялис, Э. К. Стрельбицкий. Метод определения дефектности изоляции низковольтных электрических машин. «Изв. ТПИ». Настоящий сборник.