

О РАСПРЕДЕЛЕНИИ ПРОБИВНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ЭМАЛЬПРОВОДОВ

Ю. П. ПОХОЛКОВ

(Представлена научным семинаром кафедры электроизоляционной
и кабельной техники)

Статистическая оценка качества изоляции находит все более широкое применение в связи с решением задач по исследованию и расчету показателей надежности обмоток электрических машин [1, 2, 3]. При этом основой большинства моделей отказа элемента изоляции является выражение

$$P(u) = \int_{-\infty}^u f(U_{пр}) P(u) du, \quad (1)$$

где $P(u)$ — вероятность пробоя элемента изоляции;

$f(U_{пр})$ — плотность вероятностей пробивного напряжения элемент изоляции;

$P(u)$ — функция распределения вероятностей коммутационных перенапряжений.

Точность оценки вероятности пробоя элемента изоляции в большой степени зависит от правильности выбора закона распределения для аппроксимации ряда значений пробивного напряжения, полученного экспериментально.

При испытании образцов изоляции на пробой вероятность появления значений $U_{пр}$, сравнимых со значениями коммутационных перенапряжений, очень мала и для достоверной оценки ее необходимо подвергнуть испытанию большое количество образцов, что не всегда возможно и не экономично. В связи с этим обычно применяется известный прием — полученный на сравнительно небольшом количестве образцов ряд значений $U_{пр}$ аппроксимируется одним из известных законов распределения случайных величин, затем по этому закону оценивается вероятность появления тех значений $U_{пр}$, которые не наблюдались при проведении эксперимента.

При этом, как правило, согласие между наблюдаемым и аппроксимирующим рядами оценивается без учета степени расхождения рядов в области малых значений $U_{пр}$, используемых для расчета вероятности пробоя элемента изоляции. Применение такого приема оправдано лишь в тех случаях, когда существует уверенность, что теоретическое и экспериментальное распределения формируются на одинаковой основе. Так, распределение значений пробивного напряжения образцов изоляции конечной площади в принципе должно описываться одним из законов распределения экстремальных значений [4]. Это обусловлено тем, что пробой образца изоляции конечной площади происходит в самом слабом месте и получаемое при этом значение $U_{пр}$ является наименьшим из

всех значений $U_{\text{пр}}$ данного образца. Однако не во всех случаях использование для аппроксимации рядов $U_{\text{пр}}$ одного из законов распределения экстремальных значений (Вейбулла, двойной показательный, предельные и т. п.) является правильным. В частности, это касается изоляции эмальпроводов, применяемых во вспыхивающих обмотках асинхронных двигателей. Пробой изоляции обмоточных эмальпроводов происходит в местах различных ослаблений и дефектов. Число типов дефектов и ослаблений в изоляции может быть достаточно большим, но с точки зрения формирования распределения $U_{\text{пр}}$ представляется целесообразным разделить все дефекты и ослабления на две группы: микродефекты и макродефекты.

К микродефектам могут быть отнесены различные структурные нарушения, неоднородности, включения, размер которых пренебрежительно мал по сравнению с толщиной изоляции.

К макродефектам могут быть отнесены грубые механические повреждения (проколы, порезы, трещины, сдиры, пропуски и т. п.), проводящие включения, размер которых сравним с толщиной изоляции.

Наличие дефектов обеих групп в одной выборке испытываемых образцов может привести к получению двухмодального распределения, так как среднее значение пробивного напряжения изоляции, имеющей грубые механические повреждения, существенно отличается от среднего значения $U_{\text{пр}}$ изоляции, не имеющей таких повреждений [5].

Подобные распределения $U_{\text{пр}}$ могут наблюдаться не только при пробое образцов провода, претерпевшего различные технологические или эксплуатационные воздействия, но и при пробое образцов провода, отобранного из катушек (в состоянии поставки).

В табл. 1 приведены значения частот распределения пробивного напряжения изоляции провода ПЭТВ диаметром 1,08 мм в состоянии поставки.

Испытания изоляции провода на пробой производились в электродах «провод — дробь» переменным напряжением промышленной частоты. Скорость подъема напряжения — 1 кВ/сек. Длина испытываемой части образца — 95 мм. Объем выборки при испытаниях — 1572 образца.

Наличие моды в левой части распределения свидетельствует о имеющихся в изоляции провода микродефектах, представляющих собой точечные сквозные повреждения изоляции [5]. Правая мода распределения сформирована, по-видимому, из значений $U_{\text{пр}}$, полученных при пробое образцов по макродефектам.

В табл. 1 приведены также значения выравнивающих частот, оцененных по суперпозициям двух законов. В общем случае выравнивающие частоты (\tilde{n}_i) оценивались по выражению

$$\tilde{n}_i = [qf_1(U_{\text{пр}}) + mf_2(U_{\text{пр}})] \Delta U \Sigma n_i, \quad (2)$$

где $f_1(U_{\text{пр}})$ и $f_2(U_{\text{пр}})$ — плотности распределения вероятностей соответственно первого и второго закона в суперпозиции;

q и m — соответственно доля каждого закона в суперпозиции, $q + m = 1$;

ΔU — величина разряда, $\Delta U = 0,5$ кВ;

Σn_i — объем выборки при испытаниях, $\Sigma n_i = 1572$ образца.

Аппроксимация правой части распределения законом Вейбулла с параметрами $\alpha_2 = 5,17$, $C_2 = 0,000371$ дает возможность определить значения m и q

$$m = \frac{\Sigma \tilde{n}_{i\text{прав}}}{\Sigma n_i}, \quad (3)$$

Таблица 1

Значение разряда U_i (кВ)	Наблюдаемая частота n_i	Оценка выравнивающих частот по суперпозициям законов распределения		
		два закона Вейбулла \tilde{n}_{i1}	усеченный нормальный закон и закон Вейбулла \tilde{n}_{i2}	нормальный закон и закон Вейбулла \tilde{n}_{i3}
0,25	23	22,9	38,4	35,4
0,75	92	80	81,2	75,2
1,25	91	105,4	105	97,3
1,75	96	88,4	92,9	86,6
2,25	74	76,6	78,6	75,6
2,75	102	89,3	88	87,1
3,25	153	142,9	141,9	141,7
3,75	188	212	212	212
4,25	242	259	259	259
4,75	238	250	250	250
5,25	177	177	177	177
5,75	75	76,6	76,6	76,6
6,25	21	20,4	20,4	20,4

Оценка согласия распределений по критерию — χ^2

$\frac{ \chi^2 - \nu }{\sqrt{2\nu}} \leq 3$	0,53 < 3	2,39 < 3	1,29 < 3
---	----------	----------	----------

где $\Sigma \tilde{n}_{i\text{прав}}$ — сумма выравнивающих частот, оцененная по закону Вейбулла с параметрами α_2 и C_2 .

Для данной партии испытанных образцов $m = 0,805$, $q = 0,195$,

Параметры закона, аппроксимирующего левую часть общего распределения, определяются по распределению частот в левой части распределения

$$n_{i\text{лев}} = n_i - \tilde{n}_{i\text{прав}}$$

В приведенном распределении левая часть его достаточно хорошо описывается любым из трех законов — Вейбулла, усеченным нормальным и нормальным. В соответствии с этим общее распределение пробивного напряжения изоляции эмалипровода ПЭТВ 1,08 мм может быть аппроксимировано следующими суперпозициями законов:

1) суперпозицией двух законов Вейбулла

$$f(U_{\text{пр}}) = 0,195 \alpha_1 C_1 U^{\alpha_1 - 1} \cdot e^{-C_1 U^{\alpha_1}} + 0,805 \alpha_2 C_2 U^{\alpha_2 - 1} \cdot e^{-C_2 U^{\alpha_2}}, \quad (4)$$

где $\alpha_1 = 2,3$; $C_1 = 0,36$; $\alpha_2 = 5,17$; $C_2 = 0,00037$; 2) суперпозицией нормального усеченного закона и закона Вейбулла

$$f(U_{\text{пр}}) = 0,195 \cdot C \cdot e^{-\frac{(U-\bar{U})^2}{2\sigma^2}} + 0,805 \cdot \alpha_2 C_2 U^{\alpha_2 - 1} \cdot e^{-C_2 U^{\alpha_2}}, \quad (5)$$

где $C = 0,608$; $\bar{U} = 1,25$; $\sigma = 0,715$;

3) суперпозицией нормального закона и закона распределения Вейбулла

$$f(U_{\text{пр}}) = 0,195 \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot e^{-\frac{(U-U)^2}{2\sigma^2}} + 0,805 \alpha_2 C_2 U^{-\alpha_2-1} \cdot e^{-C_2 U^{\alpha_2}}. \quad (6)$$

Оценка согласия между экспериментальным и аппроксимирующими распределениями, проведенная по критерию χ^2 с использованием правила Романовского [6], показала (табл. 1), что полученное распределение наиболее удовлетворительно описывается суперпозицией двух законов Вейбулла, а также суперпозицией нормального закона и закона Вейбулла.

ЛИТЕРАТУРА

1. О. Д. Гольдберг. Качество и надежность асинхронных двигателей. М., «Энергия», 1968.
2. Х. С. Фишман. Статистическая модель и оценка надежности изоляции электрических машин. Сб. «Энергетика и электрификация КПИ». Караганда, 1972.
3. Н. А. Козырев. Изоляция электрических машин и методы ее испытания. М., «Энергия», 1963.
4. Э. Гумбель. Статистика экстремальных значений. М., «Мир», 1965.
5. Ю. П. Похолоков, В. И. Деревянко. К методу определения дефектности обмоточных проводов, применяемых в низковольтном электротехническом оборудовании. Известия ТПИ, т. 284, Томск, изд-во ТГУ, 1974.
6. А. К. Митропольский. Техника статистических вычислений. М., «Наука», 1971.