

### ИСПЫТАНИЯ ИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ В ПЕРИОД ПРИРАБОТКИ

О. П. МУРАВЛЕВ, Ю. П. ПОХОЛКОВ, Э. К. СТРЕЛЬБИЦКИЙ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин  
и общей электротехники)

Надежность витковой изоляции в период приработки определяется выражением

$$R = (1 - \epsilon m q_{\text{пр}}^2)_N = (1 - \epsilon q_{\text{скр}})_N \quad (1)$$

где  $q_{\text{пр}}$  — доля дефектных проводов длиной  $l$ ;  
 $m$  — коэффициент обнаружения дефектов в скрутке из проводников длиной  $l$ ;  
 $\epsilon$  — коэффициент выявления потенциального слабого места в машине;  
 $N$  — число парных группировок проводов в машине;  
 $q_{\text{скр}}$  — вероятность пробы в скрутке.

$$q_{\text{скр}} = m q_{\text{пр}}^2 \quad (2)$$

Поскольку с уменьшением дефектности провода  $R$  асимптотически приближается к единице, точность определения надежности необходимо относить к величине

$$1 - R = Q, \quad (3)$$

т. е. к аварийности.

В зависимости от конкретных условий оценить величину надежности можно путем определения  $Q$ ,  $q_{\text{скр}}$  или  $q_{\text{пр}}$ . Ниже излагаются методы испытаний для оценки этих величин и области их применения, которые обеспечивают минимальную стоимость и трудоемкость испытаний.

Оценку надежности по результатам испытаний собранных машин целесообразно применять в следующих случаях:

1. Для определения уровня надежности крупносерийного и массового производства.

2. Для оценки эффективности мероприятий при таких изменениях конструкции изоляции и технологии обмоточно-изолирующих работ, когда мал риск массового брака.

Достоинство этого способа в том, что он, во-первых, совмещен с контрольными испытаниями, во-вторых, в высокой достоверности вследствие непосредственного измерения доли дефектных машин.

Определим  $Q_{\text{исп}}$  как

$$Q_{\text{исп}} = \int_0^{u_{\text{исп}}} \lambda e^{-\lambda u} du, \quad (4)$$

где  $U_{\text{исп}}$  — испытательное напряжение;  
 $\lambda$  — параметр показательного распределения пробивных напряжений машин.  $\lambda$  определяется из уравнения (4).  
 Аварийность асинхронных двигателей в период приработки

$$Q = \int_0^{u_0} \lambda 1^{-\lambda u} du = Q_{\text{исп}}, \quad (5)$$

где  $u_0$  — напряжение, соответствующее минимальной плотности отказов, что соответствует концу периода приработки.

Если в исследуемой партии из  $n$  машин на испытательной станции зарегистрировано  $\gamma$  отказов, то доверительные границы для  $Q_{\text{исп}}$  вычисляются по формулам [1]:

при  $\gamma = 0$

$$Q_{\text{исп.н}} = 0 \quad Q_{\text{исп.в}} = \frac{R_0}{n}, \quad (6)$$

при  $\gamma \neq 0$

$$Q_{\text{исп.н}} = \frac{\gamma}{nR_1} \quad Q_{\text{исп.в}} = \frac{\gamma}{nR_2}, \quad (7)$$

где  $R_0, R_1, R_2$  определяются по табл. 18 [1].

По полученным значениям  $Q_{\text{исп.н}}$  и  $Q_{\text{исп.в}}$  на основании (5) вычисляются  $Q_{\text{н}}$  и  $Q_{\text{в}}$  и доверительные границы для надежности витковой изоляции.

При необходимости быстрого определения надежности, особенно если надежность высока, целесообразно применять последовательный анализ.

Для этого метода характерно, что число наблюдений  $n$  заранее не задано. Последовательный анализ дает точное правило для вынесения в любой момент испытаний одного из трех решений: 1) считать, что изоляция имеет приемлемую дефектность; 2) забраковать; 3) продолжать испытания.

Последовательные испытания проводятся следующим образом. Пусть  $q$  — истинное значение параметра; проверяются две гипотезы: нулевая  $H_0$  о том, что  $q = q_0$ , и альтернативная  $H_1$  о том, что  $q = q_1$ .

Величина  $q_1$  — заданное максимальное приемлемое значение параметра, а  $q_0 < q_1$  — произвольно выбранная величина. В качестве критерия для принятия решения берется величина  $p(\gamma)$ , определяемая в нашем случае по формуле

$$p(\gamma) = \left( \frac{q_1}{q_0} \right)^\gamma e^{-n(q_1 - q_0)}, \quad (8)$$

которая сравнивается с постоянными  $A$  и  $B$ :

$$A = \frac{1 - \beta}{\alpha'}, \quad B = \frac{\beta}{1 - \alpha'}, \quad (9)$$

где  $\beta$  — риск принятия партии с  $q > q_1$ ;

$\alpha'$  — риск браковки партии с  $q < q_0$ .

Правило выбора решения таково:

1) принять, если  $p(\gamma) \leq B$ ;

2) забраковать, если  $p(\gamma) \geq A$ ;

3) продолжать испытания, если  $B < p(\gamma) < A$ .

Обычно выбирают  $\alpha' = \beta = 0,10 \dots 0,01$ , величина  $q_1$  — из условия допустимой аварийности, а  $q_0 = (0,1 \dots 0,5) q_1$ .

Ожидаемое значение числа испытаний является важной характеристикой плана испытаний. А. Вальд показал, что рассмотренный выше план приводит к сокращению объема испытаний не менее, чем на 47 проц. по сравнению с обычным критерием [2].

Определение надежности путем испытания машин перестает быть эффективным в случае существенного изменения конструкции или технологии, что характерно для опытной продукции. В этом случае, как правило, невозможно изготовить достаточно большое число машин и велик риск понести большие убытки от возможного брака. Кроме того, мы только констатируем фактическую величину ненадежности, но лишены возможности установить причины ее возникновения.

В этих случаях целесообразно оценивать дефектность провода  $q_{пр}$  или  $q_{скр}$  с последующим определением надежности по (1).

Дефектность провода  $q_{пр}$  определяется путем пробоя изоляции провода в дробь. Изложим методику определения объемов испытаний для этого случая.

Учитывая биномиальное распределение дефектной изоляции, на основании предельной теоремы Муавра-Лапласа можно написать выражение для вероятности того, что среднее значение  $q$  находится в интервале  $[q(1-\varepsilon), q(1+\varepsilon)]$ .

$$P\{q - \varepsilon q \leq \bar{q} \leq q + \varepsilon q\} \approx \Phi\left(\frac{\varepsilon q \sqrt{n}}{\sqrt{q(1-q)}}\right) = \alpha, \quad (10)$$

откуда

$$n = \frac{z_\alpha(1-q)}{\varepsilon^2 q}. \quad (11)$$

где  $z_\alpha$  — аргумент функции Лапласа, отвечающий вероятности  $\alpha$ ; определяется по табл. V [3].

Объем выборки, подсчитанный по формуле (11), зависит от предполагаемой величины дефектности  $q$ , необходимой точности определения  $\varepsilon$  и доверительной вероятности  $\alpha$ . Последняя выбирается, исходя из конкретных требований и обычно  $\alpha = 0,90 \dots 0,95$ ,  $\varepsilon = 0,1 \dots 0,4$ . Количество необходимых испытаний  $n$  получается относительно большим, но это не является препятствием при малой трудоемкости эксперимента. Так, для  $\alpha = 0,9$ ,  $\varepsilon = 0,2$  и  $q_{пр} = 0,20 \dots 0,05$ , объем выборки  $n = 250 \dots 1250$ .

Для вычисления коэффициента совпадения дефектов в скрутке  $m$  необходимо определить величину  $q_{скр}$ , которая значительно меньше  $q_{исп}$  и  $q_{пр}$ , и поэтому рассмотренные выше способы требуют очень большого числа испытаний. Электрическая прочность и дефектность изоляции являются величинами непрерывными, поэтому целесообразно использовать дополнительную информацию, получаемую при испытании повышенным напряжением  $u_{исп} > u_{раб}$ .

Максимальное напряжение  $u_k$  выбирается таким, чтобы полученную зависимость числа пробоев  $n_i$  от  $u$  можно аппроксимировать прямой линией с достаточной степенью точности.

Для оценки  $q_{скр}$  методом наименьших квадратов вычисляются параметры  $a$  и  $b$  линии регрессии, уравнение которой

$$\hat{n}_i = a + bu. \quad (12)$$

Доверительные границы для  $a$  и  $b$  определяются с помощью стандартных отклонений  $S_a$  и  $S_b$ .

$$a - tS_a \leq a \leq a + tS_a \quad \text{и} \quad b - tS_b \leq b \leq b + tS_b,$$

где  $t$  — аргумент распределения Стьюдента; определяется по табл. XVI [3] в зависимости от доверительной вероятности  $\alpha$  и степеней свободы  $Y$ .

$S_a$  и  $S_b$  определяются по формулам

$$S_a = \frac{S}{\sqrt{n'-2}}, \quad (13)$$

$$S_b = \frac{\sqrt{n'} S}{\sqrt{(n'-2) \sum_{i=1}^{n'} (u_i - \bar{u})^2}}, \quad (14)$$

где

$$S = \sqrt{\frac{1}{n'} \sum_{i=1}^{n'} (n_i - \hat{n}_i)^2}, \quad (15)$$

$n'$  — число точек, по которым определяется линия регрессии.

На рис. 1 представлена расчетная линия регрессии — 1 и граничные линии — 2 при  $a_{\max}$  и  $b_{\max}$  и 3 при  $a_{\min}$  и  $b_{\min}$ , для скруток провода АПЭВ-2  $\varnothing$  0,83 мм.

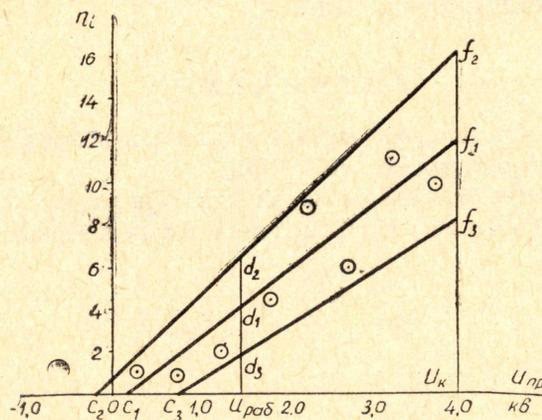


Рис. 1.

Величина дефектности определяется по формуле

$$\bar{q} = \left( \frac{u_{\text{раб}} - O_{C_1}}{u_{\text{к}} - O_{C_1}} \right)^2 \frac{\sum n_i}{n}. \quad (16)$$

Нижняя граница дефектности

$$q_{\text{н}} = \left( \frac{u_{\text{раб}} - O_{C_3}}{u_{\text{к}} - O_{C_3}} \right)^2 \frac{\sum n_i}{n}. \quad (17)$$

и верхняя

$$q_{\text{в}} = \left( \frac{u_{\text{раб}} - O_{C_2}}{u_{\text{к}} - O_{C_2}} \right)^2 \frac{\sum n_i}{n}, \quad (18)$$

где  $\sum n_i$  — число пробоев изоляцией напряжением  $u < u_{\text{к}}$ ;  
 $n$  — объем партии образцов.

Коэффициент совпадения дефектов в скрутке

$$m = \frac{q_{\text{скр}}}{q_{\text{пр}}^2} \quad (19)$$

и его дисперсия

$$D_m = D_{\text{скр}} + 4D_{\text{пр}}. \quad (20)$$

Объем испытаний при применении регрессионного анализа снижается в десятки раз.

## Выводы

1. Метод определения дефектности изоляционных материалов должен быть выбран исходя из конкретных условий: ожидаемой величины дефектности, требуемой точности и возможного объема и времени испытаний.

2. Применение последовательного анализа существенно снижает объем испытаний при установлении нижнего уровня надежности выпускаемых электрических машин.

3. Классический метод определения объема выборки целесообразно применять, когда требуется относительно высокая точность и испытания не являются трудоемкими.

4. Регрессионный анализ позволяет использовать дополнительную информацию о пробе изоляции напряжением выше рабочего. Этот метод можно рекомендовать для определения малой величины дефектности.

5. Рассмотренные методы применимы для испытания любой изоляции различных электрических машин.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Я. Б. Шор. Статические методы анализа и контроля качества и надежности. Изд-во «Советское радио», М., 1962.
2. А. Вальд. Последовательный анализ. Физматгиз, М., 1960.
3. А. К. Митропольский. Техника статистических вычислений. Физматгиз, М., 1961.