

**К МЕТОДУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФЕКТНОСТИ  
ОБМОТОЧНЫХ ЭМАЛЬПРОВОДОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ  
В НИЗКОВОЛЬТНОМ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ**

В. И. ДЕРЕВЯНКО, Ю. П. ПОХОЛКОВ

(Представлена научным семинаром кафедры ЭИКТ)

Отказы изоляции обмоток различных электротехнических устройств в большей части обусловлены наличием дефектов в изоляции. Поэтому прогнозирование отказов обмоток невозможно без строгой количественной оценки величины дефектности изоляции.

Дефектностью в данном случае можно считать вероятность появления дефекта на определенной площади изоляции. С определенной степенью достоверности можно считать, что дефектность есть отношение числа образцов, пробитых напряжением, которое мы считаем максимальным пробивным напряжением дефекта данного уровня, к общему числу испытанных образцов [2].

$$q = \frac{n_{u_{\max \text{деф}}}}{\sum_{i=1}^n n_i}$$

При таком подходе к количественному определению дефектности необходимо решить следующие задачи:

1. Правильно выбрать максимальное пробивное напряжение дефектного места в изоляции.
2. Выбрать электроды для испытания изоляции на дефектность таким образом, чтобы выявление дефектов при испытаниях соответствовало условиям выявления дефектов в конструкции.
3. Правильно оценить площадь изоляции, которая испытывается с целью определения дефектности.

Решению этих задач для эмальизоляции обмоточных проводов посвящена данная работа.

Рабочие напряжения, приходящиеся на изоляцию в низковольтных электротехнических устройствах, как правило, не являются опасными для неповрежденной и даже поврежденной изоляции. Более того, пробой неповрежденной изоляции даже при пяти- или шестикратных перенапряжениях является маловероятным событием, так как значение прочности изоляции намного превышает значения напряженностей поля, которые возникают при перенапряжениях. При изготовлении обмоток низковольтных электротехнических устройств эмальизоляция проводов может повреждаться, причем характер повреждений может быть

различным: деформация, поверхностные царапины, сдиры, проколы, порезы и т. п. Такие повреждения изоляции, как деформации и поверхностные царапины, не приводят к резкому снижению пробивного напряжения изоляции, так как в конечном итоге оно определяется электрической прочностью данной изоляции и ее толщиной, остающейся неповрежденной. Сквозные повреждения изоляции (проколы, порезы, трещины) снижают ее пробивное напряжение до уровня пробивного напряжения воздуха в толщине, равной толщине изоляции провода. Кроме того, на величину пробивного напряжения изоляции в месте дефекта существенное влияние оказывает состояние поверхности изоляции (влаги, грязь и т. п.), поэтому пробивное напряжение здесь должно определяться, не только исходя из толщины изоляции и, электрической прочности воздуха, но и с учетом напряжения перекрытия по поверхности.

В связи с изложенным можно считать, что пробой изоляции низковольтных электротехнических устройств происходит только при наличии дефектов типа сквозных проколов, порезов, трещин и т. п. В этом случае максимальное пробивное напряжение изоляции в дефектном месте можно определить следующим образом:

$$U_{\text{деф. max}} = \bar{U}_1 + 3\sigma_1,$$

где

$\bar{U}_1$  — среднее пробивное напряжение эмальизоляции провода, имеющей сквозной прокол ( $kв \text{ max}$ );

$\sigma_1$  — среднеквадратическое отклонение  $\bar{U}_1$ .

Параметры распределения пробивного напряжения  $\bar{U}_1$  и  $\sigma_1$  могут быть оценены экспериментально на искусственно поврежденных эмальпроводах.

Испытания проводов на дефектность могут проводиться в различных электродах. Одним из электродов всегда является металл провода, другим может быть ртуть, графит, дробь или просто плоский металлический электрод. При выборе электродов необходимо ориентироваться на то, что в результате испытания, кроме величины дефектности, должны быть определены параметры распределения  $U_{\text{пр}}$  дефектной изоляции, причем эти параметры не должны отличаться от параметров распределения дефектной изоляции в конструкции. В связи с этим такие электроды, как графит и ртуть, не могут быть приняты при испытаниях, так как дают заниженные по сравнению с конструкцией параметры распределения  $U_{\text{пр}}$  дефектного места. Это объясняется тем, что и графит, и ртуть могут попадать внутрь дефекта, что приводит к уменьшению толщины воздушного промежутка дефекта, а значит, и к снижению среднего пробивного напряжения промежутка. Кроме того, частички графита имеют различную форму и могут создавать большие неоднородности электрического поля.

Дробь в качестве второго электрода также не может быть использована, так как значение  $\bar{U}_1$  и  $\sigma_1$  в дроби будет зависеть от диаметра провода и диаметра дроби. Это объясняется тем, что среднее расстояние между металлом провода и дробью зависит от диаметра провода и диаметра дроби.

Оценка параметров  $\bar{U}_1$  и  $\sigma_1$  по результатам испытаний на плоском электроде соответствует  $\bar{U}_1$  и  $\sigma_1$ , полученным в конструкции, где провода плотно касаются друг друга или плотно прилегают к изолированному магнитопроводу. На рис. 1 изображены кривые распределения пробивного напряжения проводов, поврежденных при укладке обмотки

в пазы обмотки статора. Испытания были проведены в различных электродах (графит, ртуть, дробь, плоский электрод). Вид распределений указывает на то, что параметры распределения дефектов меняются в зависимости от вида электродов. На рис. 2 приведена кривая искусственно и естественно поврежденных проводов. Параметры левого

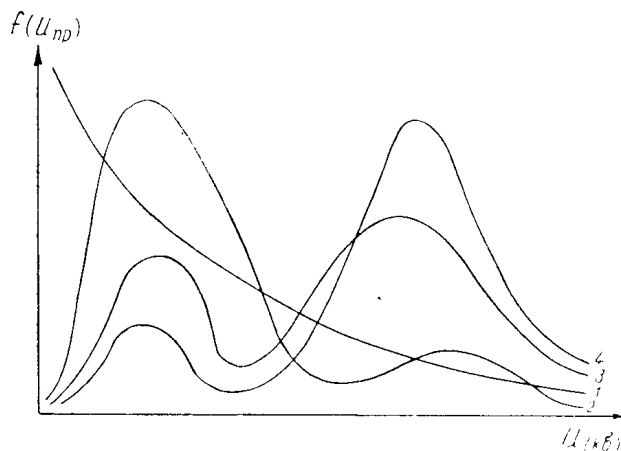


Рис. 1. Кривые распределения  $U_{пр}$  проводов, поврежденных при укладке обмотки в пазы статора. Электроды: 1 — графит, 2 — ртуть, 3 — дробь, 4 — плоский металлический электрод

максимума распределения естественно поврежденного провода совпадают с параметрами искусственно поврежденной изоляции. При испытании изоляции проводов на дефектность необходимо знать площадь, на которой выявляются дефекты. При оценке вероятности пробоя больших

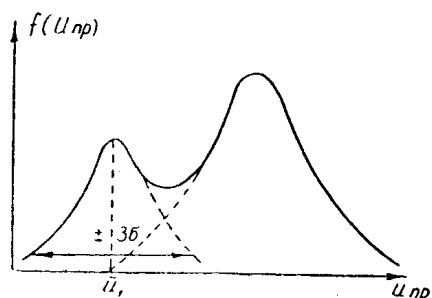


Рис. 2. Характерная кривая распределения пробивных напряжений обмоточных эмальпроводов после укладки в пазы статора

площадей (в конструкции) необходимо знать точное значение соотношения  $S_{общ}/S_{исп}$ , так как вероятность пробоя на большой площади может быть оценена по формуле

$$Q = 1 - (1 - q_{исп}) \frac{S_{общ}}{S_{исп}}$$

Площадь испытанной на дефектность изоляции при испытании провода в графите и ртути определяется просто:  $S_{исп} = \pi \cdot d_{из} \cdot l_{обр}$ . Однако эти электроды по указанным выше причинам не могут быть использованы. Площадь испытанной изоляции при использовании в качестве

электрода дробь зависит от диаметра дробы и диаметра провода. Площадь испытанной изоляции при испытании на плоском электроде может быть определена достаточно точно с учетом напряжения перекрытия.

Считаем, что дефекты, находящиеся на расстоянии  $r_i$  от плоского электрода (рис. 3), выявляются напряжением  $\bar{U}_1 + 3\sigma_1$  с вероятностью  $p_i(r_i)$ . Вероятность выявления дефектов данным напряжением уменьшается с увеличением расстояния дефекта от электрода и, как видно

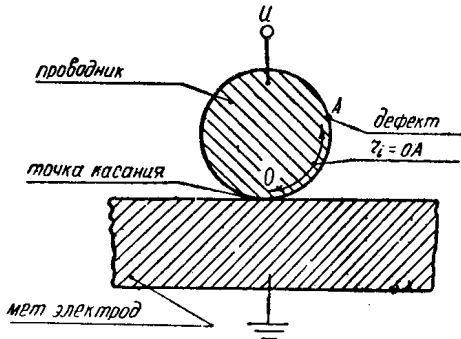


Рис. 3. Схемы испытания проводников на дефектность на плоском электроде

ты выявляются с вероятностью, равной единице, будет равна

$$S_{\text{исп}} = 2r_{\text{исп}} \cdot l_{\text{обр}},$$

где

$l_{\text{обр}}$  — длина участка провода, испытываемого на плоском электроде.

Оценка  $S_{\text{исп}}$  была проведена для эмальпроводов марки ПЭТВ-*f*-35. Для этого провод диаметром по изоляции 1,64 мм с нанесенными на

из рис. 4, при  $r = 2,4$  мм,  $p_i(r_i)$  составляет величину  $0,58 \cdot 10^{-12}$ . С достаточной степенью точности кривую  $p_i(r_i)$  можно заменить прямоугольником OABC при условии, что площадь OABC равна площади под кривой, т. е. можно принять, что все дефекты, расположенные в промежутке  $0 \leq r_i \leq r_{\text{исп}}$ , выявляются с вероятностью, равной 1, а дефекты, расположенные от плоского электрода на расстоянии  $r_i > r_{\text{исп}}$ , не выявляются совсем. Исходя из вышесказанного допущения, площадь, на которой дефекты

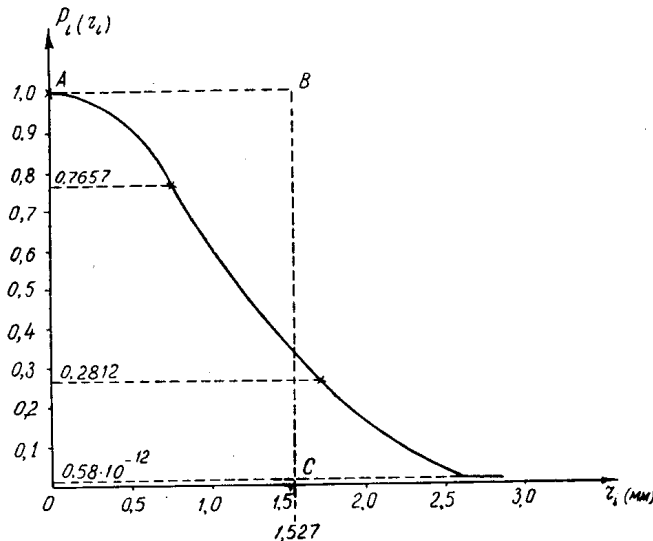


Рис. 4. Зависимость вероятности выявления дефектов от расстояния дефекта до плоского электрода

изоляцию сквозными повреждениями в виде точечных проколов испытывался на плоском электроде. При этом расстояние от места касания электрода с проводом до дефекта менялось от 0 до 2,4 мм. При каждом расстоянии было испытано  $\approx 100$  обр. При расстоянии 0 мм были

получены значения  $U_1$  и  $\sigma_1$ . Затем оценивалась вероятность попадания в зону дефектов, находящихся на  $i$ -х расстояниях [1]:

$$p_i(r_i) = F\left(\frac{\bar{U}_1 + 3\sigma_1 - \bar{U}_i}{\sigma_i}\right).$$

На рис. 4 приведена кривая  $P_i(r_i)$ . Используя формулу

$$r_{\text{исп}} = \sum_{i=1}^i r_i \cdot p_i(r_i),$$

было установлено, что  $r_{\text{исп}} = 1,527$  мм. Принимая, что в нормальных условиях  $r_{\text{исп}}$  для эмальпроводов можно считать постоянной; на плоском электроде изоляция провода диаметром меньше  $d_{\text{из-крит}}$  испытывается на дефектность полностью.

$$d_{\text{из-крит}} = \frac{2r_{\text{исп}}}{\pi}.$$

При испытании проводов большого диаметра  $S_{\text{исп}}$  определится по формуле

$$S_{\text{исп}} = 2r_{\text{исп}} \cdot e_{\text{обр}}.$$

### Выводы

1. Параметры  $U_1$  и  $\sigma_1$  по результатам испытаний на дефектность на плоском металлическом электроде наиболее верно соответствуют параметрам  $U_1$  и  $\sigma_1$ , полученным при испытании плотнокасающихся обмоточных проводов, лежащих в пазах статора асинхронных машин.
2. Предложен метод для определения испытательной площади образца при определении дефектности изоляции обмоточных проводов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. А. К. Митропольский. Техника статистических вычислений. М., «Наука», 1971.
2. В. П. Сименский. Классификация дефектов изоляции электрических машин и аппаратов малой мощности. В кн.: «Электромеханические устройства и системы. Электронные приборы». М., «Энергия», 1967.