

## НАДЕЖНОСТЬ ИЗОЛЯЦИИ ВСЫПНЫХ ОБМОТОК АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Ю. П. ПОХОЛКОВ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

Современное промышленное производство предъявляет все более высокие требования к надежности всех элементов автоматики, в том числе и к надежности электрических машин. При этом часто от электромашиностроителей требуют заранее дать оценку надежности выпускаемых ими машин.

Такую оценку можно получить либо в процессе ускоренных испытаний, либо по результатам расчета с использованием теоретико-вероятностных методов. Однако и в том и в другом случае имеются трудности. Проведение ускоренных испытаний электрических машин требует специального оборудования, помещений и связано с большими затратами времени и материальными затратами.

Математические расчеты надежности можно провести без особых материальных затрат. Однако для этого необходимо знать физическую сущность процессов отказа электрической машины.

В советской и зарубежной технической литературе достаточно хорошо освещен вопрос об отказах электрических машин в эксплуатации [1, 2, 3, 4]. Сейчас не представляет сомнения тот факт, что самым ненадежным элементом электрической машины является изоляция ее обмоток. Согласно литературным данным от 70% до 90% всех отказов происходят из-за пробоя изоляции [1]. В связи с этим вопрос надежности машин есть вопрос надежности изоляции их обмоток. Огромное число типо-размеров электрических машин, большое разнообразие изоляционных материалов и условия эксплуатации машин не позволяют создать единых методов оценки надежности и ускоренных испытаний, однако для отдельных групп машин с определенными условиями эксплуатации создание единых методов оценки надежности в принципе возможно. В этом докладе излагаются некоторые особенности оценки надежности изоляции низковольтных электрических машин, в частности, асинхронных двигателей со всыпными обмотками.

Изоляция обмоток машин — в принципе элемент невосстанавливаемый, поэтому надежность изоляции обмоток можно характеризовать вероятностью безотказной работы за определенное время.

При оценке долговечности и изоляции обмоток целесообразно использовать термин « $\gamma$ -процентный ресурс», т. е. время, в течение которого вероятность безотказной работы обмотки не меньше  $\gamma$  [5]. В настоящее время при проектировании изоляции обмоток низковольтных электрических машин не предъявляют высоких требований к электрической прочности изоляции. Основное внимание уделяется механической проч-

ности и нагревостойкости изоляции, что, с одной стороны, вполне справедливо [2]. В низковольтных электрических машинах рабочие напряжения и даже импульсы коммутационных перенапряжений не опасны для неповрежденной изоляции обмоток. Обычно пробой изоляции обмоток происходит в случае, если в изоляции имеются сквозные повреждения. Для изоляции, состоящей из двух или более слоев, необходимым условием пробоя является наличие сквозных дефектов во всех слоях на одном элементарном участке площади изоляции.

**Примечание.** Площадь элементарного участка мы называем такую площадь, по поверхности которой может произойти перекрытие при напряжении равном максимальному пробивному напряжению воздуха в толщине, равной толщине слоя изоляции. Площадь элементарного участка изоляции зависит от увлажненности и загрязненности обмоток.

Причины образования дефектов в изоляции грубо можно разделить на две группы:

- а) технологические,
- б) эксплуатационные.

В первом случае дефекты типа проколов, порезов, сдигов и трещин образуются в изоляции либо в процессе изготовления самих изоляционных материалов, либо в процессе изготовления обмоток машин [3]. Доля изоляции с такими дефектами обусловлена уровнем технологических процессов изготовления материалов и машин и культурой производства.

Во втором случае причиной образования дефектов являются условия эксплуатации и условия работы изоляции обмоток машин. В результате воздействия температуры изоляция становится хрупкой и под действием вибрации в ней могут появиться дефекты типа сквозных трещин.

Механизм выявления сквозных дефектов, образованных под действием тех и других причин, одинаков. В случае, если обмотка не увлажнена и не загрязнена, пробой изоляции может наступить под действием импульсов коммутационных перенапряжений при условии практического совпадения дефектов во всех слоях. Увлажненная и загрязненная обмотка может пробиться под действием рабочего напряжения и при несовпадающих дефектах в отдельных слоях, за счет перекрытия по поверхности.

Таким образом, если считать, что основной причиной отказов обмоток низковольтных электрических машин является наличие в изоляции грубых сквозных дефектов, оценку надежности изоляции обмоток можно проводить, основываясь на оценке доли дефектных элементарных участков изоляции, параметров распределения пробивного напряжения дефектных мест в изоляции и уровней коммутационных перенапряжений.

Расчет надежности изоляции обмоток в период приработки и нормальной работы можно провести, основываясь на оценке уровня дефектности изоляции, обусловленного технологией изготовления материалов и обмоток.

Дефектностью в этом случае можно считать вероятность появления в партии таких образцов, пробивное напряжение которых не превышает максимального пробивного напряжения воздуха в толщине, равной толщине изоляции, т. е. не превышает максимального пробивного напряжения изоляции со сквозным повреждением

$$q = \frac{n \bar{U}_1 + 3\sigma_1}{\sum_{i=1}^n n_i}, \quad (1)$$

где

$q$  — дефектность изоляции;

$n \bar{U}_1 + 3\sigma_1$  — количество образцов, пробитых напряжением  $\bar{U}_1 + 3\sigma_1$ ;

$\sum_{i=1}^n n_i$  — сумма всех испытанных образцов;

$\bar{U}_1, \sigma_1$  — соответственно среднее значение и среднеквадратическое отклонение пробивного напряжения изоляции со сквозным повреждением. Эти параметры определяются по результатам пробоя искусственно поврежденных проводников.

Оценка величины дефектности производится по результатам пробоя провода и изоляционных материалов, извлеченных из пазов машины после укладки обмотки (до пропитки). Экспериментальные данные по исследованию старения эмальпроводов и ряда изоляционных материалов под действием температуры и вибраций, имеющих место в электрических машинах при нормальных условиях эксплуатации, показывают, что в период приработки и нормальной эксплуатации не наблюдается сколько-нибудь заметного роста дефектности изоляции. По времени этот период составляет около 5 тысяч часов.

При более длительных временах работы машины величина дефектности начинает возрастать, причем скорость нарастания ее зависит от уровней воздействующих факторов и от длительности их воздействия.

В настоящее время в Томском политехническом институте созданы методики расчета надежности и долговечности всыпных асинхронных двигателей [6, 7], в которых сделана попытка учесть технологические, конструктивные и эксплуатационные факторы.

Исходными данными при расчетах надежности и долговечности являются величина дефектности изоляции, распределения пробивных напряжений дефектной изоляции, параметры обмотки, режим эксплуатации и уровня коммутационных перенапряжений в обмотках.

Для примера покажем, каким образом оценивается надежность витковой изоляции всыпных обмоток асинхронных двигателей в период приработки [6]. Дефектность изоляции провода определяется по формуле (1). Перейдем к дефектности элементарного участка изоляции одиночного провода.

Радиус элементарного участка изоляции ( $\delta$ ) определим, исходя из максимального пробивного напряжения дефектного места и электрической прочности воздуха в месте дефекта с учетом перекрытия по поверхности ( $E_B$ )

$$\delta = \frac{\bar{U}_1 + 3\sigma_1}{E_B} \quad (2)$$

Число элементарных участков на площади изоляции, характеризующей дефектностью  $q$ , обозначим через  $n$

$$n = \frac{d_{из} \cdot l_{обр} \cdot k}{\delta^2}, \quad (3)$$

где

$d_{из}$  — диаметр изолированного провода;

$l_{обр}$  — длина испытываемого образца провода;

$k$  — коэффициент, учитывающий площадь испытываемой изоляции.

Считая, что сквозное повреждение образца провода есть событие редкое, принимаем распределение дефектов по длине провода, подчиняющееся закону Пуассона [8]

$$1 - q = e^{-a}, \quad (4)$$

где

$a$  — среднее число повреждений изоляции на испытываемой площади образца провода.

Тогда вероятность повреждения элементарного участка изоляции одиночного образца провода  $P$  определится следующим образом:

$$P = \frac{a}{n}. \quad (5)$$

Вероятность совпадения дефектных элементарных участков изоляции в двух рядом лежащих проводниках, согласно теореме умножения вероятностей, будет равна  $P^2$ . Пробой между двумя плотно касающимися проводниками с совпадающими дефектами произойдет с вероятностью ( $q^1$ )

$$q' = P^2 \cdot F\left(\frac{U - \bar{U}_2}{\sigma_2}\right), \quad (6)$$

где

$F\left(\frac{U - \bar{U}_2}{\sigma_2}\right)$  — функция нормального распределения пробивного напряжения изоляции пары плотно касающихся проводников с совпадающими дефектами,

$\bar{U}_2$  и  $\sigma_2$  — соответственно среднее значение и среднеквадратическое отклонение пробивного напряжения пары поврежденных проводников с совпадающими дефектами (определяются экспериментально).

В пазу машины со всыпной обмоткой между проводниками имеются расстояния, распределение которых можно считать подчиняющимся показательному закону с параметром  $\lambda$ . Параметр  $\lambda$  определяется, исходя из коэффициента заполнения паза ( $k_3$ ), средней электрической прочности пропитывающего состава ( $E_{\Pi}$ ), средней доли объема пропитывающего состава в промежутке между проводниками ( $\bar{V}_{\Pi}$ ) и диаметра неизолированного провода ( $d_{\text{неиз}}$ )

$$\lambda = \frac{1}{\left(1,075 \sqrt{\frac{1}{k_3} - d_{\text{неиз}}}\right) \cdot \bar{E}_{\Pi}^{\nu_{\Pi}}} \quad (7)$$

Учитывая, что проводники во всыпной обмотке равномерно перемешаны, т. е. вероятность появления напряжения  $U$  на элементарном участке равна  $\int_0^{U_k} \left(1 - \frac{U}{U_k}\right) dU$  запишем выражение для оценки вероятности пробоя элементарного участка пары проводников в пазу машины ( $q_{\text{эл}}$ )

$$q_{\text{эл}} = P^2 \cdot \lambda \int_0^{U_k} e^{-\lambda U} F\left(\frac{U - \bar{U}_2}{\sigma_2}\right) \left(1 - \frac{U}{U_k}\right) dU, \quad (8)$$

где

$U_k$  — напряжение с учетом коммутационных перенапряжений, приходящееся на отдельную изолированную катушку фазы.

Уровень амплитуд коммутационных перенапряжений, приходящих на обмотку с вероятностью, близкой к 1, увеличивается с увеличением числа включений ( $\nu$ ) и, следовательно, времени работы машины.

Зависимость амплитуд коммутационных перенапряжений на фазе обмотки двигателя ( $U_{\phi}$ ) от числа включений машины ( $\nu$ ) может быть оценена по формуле, полученной в результате обработки экспериментальных данных

$$U_{\phi} = \frac{0,7 + \ln \nu}{2,25} \quad (9)$$

Величина  $U_k$  зависит от числа отдельно изолированных катушек в фазе ( $n_k$ ) и, следовательно, от типа обмотки машины

$$U_k = \frac{U_\phi}{n_k}. \quad (10)$$

В связи с этим выражение (8) дает возможность оценить вероятность пробоя элементарного участка витковой изоляции за определенный отрезок времени, в течение которого произошло  $v$  включений машины. Последнее обстоятельство позволяет рассчитать и вероятность безотказной работы витковой изоляции обмотки за определенное время, т. е. надежность ( $R_{\text{витк}}$ )

$$R_{\text{витк}} = (1 - q)^N, \quad (11)$$

где

$N$  — число элементарных участков витковой изоляции во всей обмотке машины.

$$N = n (S_{\text{нар}} + 1,5S_{\text{вн}} - 1,5) \frac{\bar{l}_w}{l_{\text{обр}}} \cdot z, \quad (12)$$

$S_{\text{нар}}$  и  $S_{\text{вн}}$  — соответственно число проводников в нарушенном и во внутренних слоях обмотки в пазу;

$\bar{l}_w$  — средняя длина витка обмотки;

$z$  — число пазов статора.

Экспериментальная проверка результатов расчета надежности витковой изоляции, проведенная на 100 двигателях А02-32-4, показала несущественное расхождение опытных и расчетных данных (расчет. —  $R_{\text{витк}} = 0,921$ , эксперимент. —  $R_{\text{витк}} = 0,93$ ).

Анализ результатов расчета позволяет найти главную причину ненадежности обмоток: высокий коэффициент заполнения паза, низкая культура производства, малое число катушек в фазе, малый диаметр провода, большая частота включений, низкий уровень контроля и т. д.). Все это дает возможность в каждом конкретном случае наметить пути повышения надежности обмоток машин.

## Выводы

1. Надежность электрических машин в основном определяется надежностью изоляции их обмоток.
2. Оценку надежности изоляции обмоток низковольтных электрических машин следует производить, исходя из количества сквозных дефектов в изоляции и уровня коммутационных перенапряжений.
3. Теоретико-вероятностный методы расчета надежности изоляции обмоток машин позволяют установить связь между надежностью, параметрами обмотки машины и режимом ее эксплуатации.
4. Оценка надежности обмоток машин в период, когда в изоляции под действием эксплуатационных факторов появляются сквозные дефекты, требует дополнительных исследований условий работы машин, условий работы изоляции в обмотках машины и влияния этих условий на скорость образования дефектов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Н. А. Козырев. Изоляция электрических машин и методы ее испытаний. «Энергия», 1963.
2. Н. А. Тищенко. Надежность асинхронных двигателей. «Вестник электропромышленности», 1962, № 3.

3. Э. К. Стрельбицкий, О. П. Муравлев, Ю. П. Похолков. Влияние обмоточно-изолирующих работ на пробивное напряжение витковой и корпусной изоляции асинхронных двигателей. Изв. ВУЗов, «Электромеханика», 1966, № 1.

4. I. S. Johnson. Processes of breakdown of insulation electromotors «Electrical insulation materials and application» 5-th conf. Chicago. III. 1963.

5. ГОСТ 13377-67.

6. Э. К. Стрельбицкий, Ю. П. Похолков, О. П. Муравлев, Л. И. Штуден, В. М. Федоров. Методика расчета надежности всыпных обмоток асинхронных электродвигателей мощностью от 0,18 до 100 квт. ТМТЦНТИП, Томск, 1969.

7. Э. К. Стрельбицкий, Ю. П. Похолков, О. П. Муравлев, Л. И. Штуден, В. М. Федоров. Методика расчета долговечности всыпных обмоток асинхронных двигателей мощностью от 0,18 до 100 квт. Томск, 1969.

8. А. К. Митропольский. Техника статистических вычислений. Физматгиз, 1964.