

**ВЕРОЯТНОСТНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ
ИЗОЛЯЦИИ ВСЫПНЫХ ОБМОТОК АСИНХРОННЫХ
ДВИГАТЕЛЕЙ**

Ю. П. ПОХОЛКОВ, Э. К. СТРЕЛЬБИЦКИЙ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин
и общей электротехники)

Надежность электрических машин общепромышленного применения определяется в основном надежностью изоляции их обмоток. Причины отказов изоляции электрических машин в настоящее время изучаются в СССР и за рубежом [1, 2]. Основной причиной отказов низковольтных электрических машин является наличие сквозных дефектов в витковой и корпусной изоляции [3]. Сквозные дефекты изоляции, представляющие собой проколы, порезы, трещины, могут появиться как в процессе изготовления самих изоляционных материалов и проводов, так и в процессе изготовления или эксплуатации машины.

Выявление дефектов в процессе эксплуатации машины происходит либо импульсами коммутационных перенапряжений, либо рабочим напряжением в случае, если обмотка сильно увлажнена или загрязнена.

Оценка дефектности изоляции и параметров распределения пробивного напряжения дефектных мест, а также оценка уровня коммутационных перенапряжений позволяет произвести расчет надежности изоляции обмоток.

В Томском политехническом институте разработана методика расчета надежности изоляции всыпных обмоток асинхронных двигателей в период приработки [4]. Экспериментальная проверка методики и основные работы по внедрению ее в практику конструкторских бюро и электромашиностроительных предприятий были проведены инженерами СКБ завода «Сибэлектромотор» Штуденом Л. И., Федоровым В. М., Мышковым И. Е.

В настоящее время в СССР электромашиностроительные предприятия используют эту методику для оценки гарантированной надежности изоляции обмоток в период приработки.

**Расчет надежности витковой изоляции всыпных обмоток
асинхронных двигателей**

Дефектность изоляции провода определяется по результатам испытания провода на пробой переменным напряжением. Испытаниям подвергаются 150—250 образцов провода, извлеченного из пазов машины после укладки обмоток (до пропитки). Пробой изоляции при испытаниях происходит между металлом провода и плоским металлическим электродом. Длина образца провода 50—100 мм.

Дефектность изоляции q определяем как долю образцов провода, имеющих сквозные дефекты

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

где

$n_{\bar{U}_1 + 3\sigma_1}$ — число образцов провода, пробитых напряжением не выше $\bar{U}_1 + 3\sigma_1$;

\bar{U}_1, σ_1 — соответственно среднее значение и среднеквадратическое отклонение пробивного напряжения провода, имеющего явный сквозной дефект.

Эти параметры определяются при пробое проводов с искусственно поврежденной изоляцией.

$\sum_{i=1}^i n_i$ — общее число испытанных образцов.

Перейдем к дефектности элементарного участка изоляции одиночного провода.

Радиус элементарного участка изоляции (δ) определим, исходя из максимального 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 (n) на площади изоляции, характеризующейся 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.

Для проводов диаметром $d_{из} \leq 0,95$ мм $k=1$, для проводов $d_{из} > 0,95$ мм

$k = \frac{0,95}{d_{из}}$. Считая, что сквозное повреждение изоляции образца провода есть событие редкое, принимаем распределение дефектов по длине провода, подчиняющееся закону Пуассона [5]

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

где

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

Тогда вероятность повреждения элементарного участка изоляции одиночного 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')

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

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

\bar{u}_2 и σ_2 — соответственно среднее значение и среднеквадратическое отклонение пробивного напряжения пары поврежденных проводников с совпадающими дефектами;

\bar{u}_2 и σ_2 — определяются экспериментально на искусственно поврежденных проводниках.

Учитывая, что в пазу машины между проводниками имеются расстояния, распределенные по показательному закону, напряжение по фазе распределено линейно, а проводники равномерно перемешаны, запишем выражение для оценки вероятности пробоя элементарного участка пары проводников ($q_{эл}$) в пазу машины

$$q_{эл} = P^2 \lambda \int_0^{U_k} e^{-\lambda U} \cdot F \left(\frac{U - U_2}{\sigma_2} \right) \left(1 - \frac{U}{U_k} \right) dU, \quad (7)$$

где

λ — параметр показательного закона распределения пробивного напряжения между проводниками в пазу машины.

Параметр λ определяется исходя из коэффициента заполнения паза (k_3), средней электрической прочности пропитывающего состава ($\bar{E}_п$) и средней доли объема пропитывающего состава в промежутке между проводниками $\bar{v}_п$

$$\lambda = \frac{1}{\left(1,075 \sqrt{\frac{1}{k_3} - d_{неиз}} \right) \cdot \bar{E}_л \cdot \bar{v}_п}, \quad (7a)$$

$d_{неиз}$ — диаметр неизолированного провода;

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

Уровень амплитуд импульсов коммутационных перенапряжений, приходящих на обмотку с вероятностью, близкой к 1, увеличивается с увеличением числа включений ν и, следовательно, времени работы машины t .

Примечание. При нормальных условиях работы машины время в данном расчете может быть взято не более 5000 часов.

Зависимость амплитуд коммутационных перенапряжений на фазе обмотки двигателя U_ϕ от числа включений машины ν может быть оценена по формуле, полученной в результате обработки экспериментальных данных

$$e^{2,25U_\phi - 0,7} = \nu. \quad (8)$$

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

$$U_k = \frac{U_\phi}{n_k}. \quad (9)$$

В связи с этим выражение (7) дает возможность оценить вероятность пробоя элементарного участка изоляции на определенный отрезок вре-

мени. Последнее обстоятельство позволяет рассчитать и вероятность безотказной работы витковой изоляции обмотки за определенное время, т. е. надежность $R_{\text{витк}}$

$$R_{\text{витк}} = (1 - q_{\text{эл}})^N, \quad (10)$$

где

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

$$N = n (S_{\text{нар}} + 1,5S_{\text{вн}} - 1,5) \frac{\bar{l}_w}{l_{\text{обр}}} \cdot Z, \quad (11)$$

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

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

Z — число пазов статора.

Расчет надежности корпусной изоляции обмоток асинхронных двигателей

При расчете надежности корпусной изоляции обмоток изоляция представляется в виде ряда последовательно соединенных конденсаторов. Исходными данными к расчету являются распределения пробивных напряжений отдельных слоев изоляционных материалов, полученные экспериментально после укладки обмотки (до пропитки) и уровень коммутационных перенапряжений. Испытанию подвергаются образцы корпусной изоляции, осторожно извлеченные из пазов статора. Испытания проводятся переменным напряжением в электродах типа «игла-плоскость». За площадь элементарного участка изоляции, для которого в первую очередь определяется вероятность пробоя, принимаем площадь плоского электрода, используемого при испытаниях ($78,5 \text{ мм}^2$). Вероятность пробоя элементарного участка двухслойной изоляции $P(AB)$ со слоями A и B определяем следующим образом:

$$P(AB) = P(A)P_A(B) + P(B)P_B(A) - P(A)P(B), \quad (12)$$

где

$P(A)$ [$P(B)$] — соответственно вероятности пробоя слоя A , B при непробитом слое B , A ;

$P_B(A)P_A(B)$ — соответственно вероятности пробоя слоев A , B при пробитых слоях B , A .

Вероятность пробоя элементарного участка трехслойной изоляции $P(ABC)$

$$P(ABC) = P(AB) \cdot P_{AB}(C) + P(AC) \cdot P_{AC}(B) + P(BC) \cdot P_{BC}(A) - P(A) \cdot P_A(B) \cdot P_A(C) - P(B)P_B(A)P_B(C) - P(C)P_C(A)P_C(B) + P(A)P(B)P(C). \quad (13)$$

Обозначения по смыслу соответствуют обозначениям в формуле (12).

Примечание. Вероятность пробоя четырех- и пятислойных композиций изоляции определяются по формулам, аналогичным формулам (12), (13).

Вероятности пробоя отдельных слоев изоляционных материалов при различных сочетаниях пробитых и непробитых слоев в композиции определяются по экспериментальным распределениям пробивного напряжения с учетом появления определенной амплитуды коммутационного перенапряжения и распределения напряжения по слоям изоляции в соответствии с их диэлектрическими проницаемостями и толщинами.

Так, например, вероятность пробоя элементарного участка любого i -го слоя изоляции при других непробитых слоях композиции из n слоев определяется при напряжении $U(i)$

$$U(i) = \frac{U_{\phi} \frac{d_i}{\varepsilon_i} \prod_{i=1}^n \varepsilon_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\varepsilon_i} \prod_{l=1}^n \varepsilon_l}, \quad (14)$$

где

U_{ϕ} — амплитуда коммутационного перенапряжения, приходящего на фазу обмотки за определенное число включений или время работы машины (см. формулу (8));

d_i — толщина i -го слоя изоляции;

ε_i — диэлектрическая проницаемость i -го слоя изоляции.

При расчете напряжения, приходящегося на отдельный слой изоляции при пробитом одном или нескольких слоях, ε пробитых слоев приравнивается к единице, а толщина — к нулю. Надежность корпусной изоляции обмотки двигателя ($R_{\text{корп}}$)

$$R_{\text{корп}} = [1 - P_{\text{эл}}] \frac{S_{\text{корп}}}{k' S_{\text{эл}}}, \quad (15)$$

где

$P_{\text{эл}} = P(\text{AB})$ или $P(\text{ABC})$ или $P(\text{ABCD})$ и т. д. — в зависимости от числа слоев, из которого состоит корпусная изоляция;

$S_{\text{корп}}$ — полная площадь корпусной изоляции обмотки машины;

$S_{\text{эл}}$ — площадь элементарного участка;

k' — коэффициент, учитывающий долю площади корпусной изоляции, находящуюся под напряжением, достаточным для выявления дефектов.

Расчет надежности междуфазной изоляции ($R_{\text{мф}}$) производится аналогично расчету надежности корпусной изоляции. Надежность всей изоляции всыпной обмотки асинхронного двигателя определится в этом случае следующим образом:

$$R_{\text{из. обм}} = R_{\text{витк}} \cdot R_{\text{корп}} \cdot R_{\text{мф}}. \quad (16)$$

Данный расчет надежности учитывает только технологические дефекты и справедлив при таком времени работы машины, в течение которого не происходит интенсивного теплового старения изоляции, приводящего к появлению новых дефектов.

Данные экспериментов по исследованию старения изоляции низковольтных машин под воздействием эксплуатационных факторов свидетельствует о том, что это время составляет около 5 тысяч часов.

Опытная проверка результатов расчета по методике, проведенная на 100 двигателях типа А02-32-4, показала удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных данных.

В табл. 1 приведены результаты расчетов и эксперимента.

Таблица 1

Надежность вида изоляции	Данные	
	эксперимент	расчет
Витковой	0,93	0,921
Корпусной	0,99	0,985
Междуфазной	0,98	0,987
Изоляции обмотки	0,902	0,895

Примечание. Расчет проводился для числа включений 75 тыс. Эксперимент длился 3 тыс. часов при рабочей температуре и частоте реверсирования 25 реверс. в час.

Расчет надежности изоляции обмоток с учетом старения может быть проведен по предлагаемой методике при условии, что будет известна зависимость дефектности, изоляции от уровня воздействующих факторов и длительности их воздействия.

Выводы

1. Предложена методика расчета надежности изоляции всыпных обмоток асинхронных двигателей общепромышленного применения в период приработки и нормальной эксплуатации, учитывающая технологические, конструктивные и эксплуатационные факторы.

2. Для использования методики расчета надежности изоляции обмоток машин за период, когда происходит интенсивное старение изоляции, необходимо исследовать условия работы изоляции в обмотках и скорость образования дефектов в изоляции под воздействием этих условий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. А. Козырев. Изоляция электрических машин и методы ее испытаний. «Энергия», 1963.
2. I. S. Johnson. Processes of breakdown of insulation electromotors. „Electrical insulation materials and application“, 5-th conf. Chicago III, 1963.
3. Э. К. Стрельбицкий, О. П. Муравлев, Ю. П. Похолков. Влияние обмоточно-изолированных работ на пробивное напряжение витковой и корпусной изоляции асинхронных двигателей. Изв. вузов, «Электромеханика», 1966, № 1.
4. 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. Томский межотраслевой территориальный центр НГИП, Томск, 1969.
5. А. К. Митропольский. Техника статистических вычислений. Физматгиз, 1964.