

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОРПУСНОЙ ИЗОЛЯЦИИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ СО ВСЫПНЫМИ ОБМОТКАМИ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО

Э. К. СТРЕЛЬБИЦКИЙ, А. С. ГИТМАН, Ю. П. ПОХОЛКОВ

При проектировании асинхронных двигателей возникает необходимость конструирования одно- или многослойной корпусной изоляции, способной выдерживать как рабочие напряжения, так и перенапряжения, возникающие в период эксплуатации. Для этой цели необходимо исследовать различные комбинации изоляционных материалов, т. е. решать задачу синтеза. Противоположная задача (задача анализа) возникает, например, в процессе изготовления двигателей, когда необходимо определить причины, влияющие на величину брака из-за пробоя корпусной изоляции.

Разброс свойств изоляции, случайный характер нанесения повреждений в процессе изготовления, а также влияние случайных воздействий окружающей среды в процессе эксплуатации требуют применения статистических методов исследования. Учитывая также то, что процесс пробоя описывается нелинейными зависимостями, для решения поставленных задач наиболее целесообразно построение математической модели и применение метода Монте-Карло.

Для этого принимаем следующие допущения:

1. Пробой изоляции равновозможен в пределах «элементарного» участка, определяемого площадью испытательного электрода.
2. Изоляция проводников, прилегающих к «элементарному» участку, представляет собой сплошной слой с толщиной, равной односторонней толщине изоляции проводников.

Принятые допущения позволяют представить корпусную изоляцию в пределах «элементарного» участка в виде цепи последовательно соединенных конденсаторов, где каждый конденсатор эквивалентен одному слою изоляции.

Изоляция между обкладками каждого конденсатора имеет свой закон распределения пробивных напряжений. Все случайные воздействия на изоляцию можно учесть изменением параметров законов. Пробой корпусной изоляции равносильен пробоем всех конденсаторов цепи, причем, последовательность пробоя является независимой и пробитая изоляция не восстанавливается. Для нахождения статистических параметров необходимо подвергнуть испытаниям на пробой все материалы, входящие в композицию корпусной изоляции. С этой целью изоляционные материалы извлекаются из пазов с принятием мер предосторожности, исключающих дополнительные повреждения. Закон распределения пробивных напряжений изоляции провода определяется для провода с длиной, равной сумме длин отрезков, прилегающих к «элементарному» участку.

Так как в подавляющем большинстве случаев толщина корпусной изоляции меньше 10 проц. от величины радиуса закругления паза, поле можно считать плоским. При этом падение напряжения на конденсаторах определяется по формуле:

$$U_i = \frac{U d_i \prod_{i=1}^n \epsilon_i}{\epsilon_i \sum_{j=1}^n \frac{d_j \prod_{i=1}^n \epsilon_i}{\epsilon_j}} \quad (1)$$

$$(i = 1, 2, \dots, n); (j = 1, 2, \dots, n),$$

где  $U$  — приложенное напряжение;  
 $d_i$  — толщина изоляции  $i$ -го слоя.  
 $\epsilon_i$  — диэлектрическая проницаемость  $i$ -го слоя.

Толщина изоляции и диэлектрическая проницаемость, входящие в (1), являются случайными величинами, и для них должны быть известны законы распределения.

При моделировании на каждом шаге необходимо вычислять вероятность пробоя цепи конденсаторов. Рассмотрим цепь, состоящую из двух конденсаторов. Обозначим через  $A(B)$  событие, заключающееся в том, что первый (второй) конденсатор пробит после начального распределения напряжений; через  $A/B$  ( $B/A$ ) — событие заключающееся в том, что первый (второй) конденсатор пробит после пробоя второго (первого). Через  $AB$  обозначим пробой всей цепи. Найдем вероятность пробоя цепи  $P(AB)$  через вероятность противоположного события

$$P(AB) = 1 - P(\overline{AB})$$

Событие  $\overline{AB}$  (цепь непробита) эквивалентно объединению несовместных событий

$$\overline{AB} = \overline{AnB}, \overline{AnB/A} \text{ и } \overline{A/BnB}, \text{ т. е.} \\ \overline{AB} = (\overline{AnB}) \text{ и } (\overline{AnB/A}) \text{ и } (\overline{A/BnB}). \quad (2)$$

Переходя к вероятностям, получим

$$P(\overline{AB}) = P(\overline{A}) P(\overline{B}) + P(A) P_A(\overline{B}) + P(B) P_B(\overline{A}) = \\ = 1 + P(A) P(B) - P(A) P_A(B) - P(B) P_B(A) \quad (3)$$

Отсюда вероятность пробоя цепи в соответствии с (2)

$$P(AB) = P(A) P_A(B) + P(B) P_B(A) - P(A) P(B) \quad (4)$$

Для цепи с тремя конденсаторами вероятность пробоя цепи

$$P(ABC) = P(AB) P_{AB}(C) + P(AC) P_{AC}(B) + P(BC) P_{BC}(A) - \\ - P(A) P_A(B) P_A(C) - P(B) P_B(A) P_B(C) - P(C) P_C(A) P_C(B) + \\ + P(A) P(B) P(C) \quad (5)$$

В (5) вероятности  $P(AC)$  и  $P(BC)$  вычисляются аналогично вероятности  $P(AB)$  по (4).

Например,

$$P(BC) = P(B) P_B(C) + P(C) P_C(B) - P(B) P(C).$$

Корпусная изоляция асинхронных двигателей со всыпными обмотками состоит из числа слоев (с учетом слоя изоляции проводников), не превышающего четырех.

Для цепи из четырех конденсаторов

$$P(ABCD) = P(ABC) P_{ABC}(D) + P(ABD) P_{ABD}(C) + \\ + P(ACD) P_{ACD}(B) + P(BCD) P_{BCD}(A) - P(AB) P_{AB}(C) P_{AB}(D) - \\ - P(AC) P_{AC}(B) P_{AC}(D) - P(AD) P_{AD}(B) P_{AD}(C) - \\ - P(BC) P_{BC}(A) P_{BC}(D) - P(BD) P_{BD}(A) P_{BD}(C) -$$

$$\begin{aligned}
& - P(CD) P_{CD}(A) P_{CD}(B) + P(A) P_A(B) P_A(D) P_A(C) + \\
& + P(B) P_B(A) P_B(C) P_B(D) + P(C) P_C(A) P_C(B) P_C(D) + \\
& + P(D) P_D(A) P_D(B) P_D(C) - P(A) P(B) P(C) P(D) \quad (6)
\end{aligned}$$

В (6) вероятности  $P(ABD)$ ,  $P(ACD)$  и  $P(BCD)$  вычисляются аналогично вероятности  $P(ABC)$  по (5).

Процесс моделирования производился на электронной цифровой вычислительной машине (ЭЦВМ). Для каждой реализации пробоя корпусной изоляции, состоящей из  $n$  слоев, в соответствии с заданными законами распределения формируются величины  $d_i$  и  $e_i$ . После этого последовательно производится имитация пробоя числа слоев  $i$ : от  $i=0$  до  $i=m-1$ . При числе пробитых слоев  $i$  необходимо вычислить вероятности пробоя оставшихся целых слоев, во всех возможных сочетаниях, число которых равно  $C_m^i$ . Общее число сочетаний

$$M = \sum_{i=0}^{m-1} C_m^i - 1 = 2^m - 1.$$

Затем определяется вероятность пробоя «элементарного» участка в зависимости от числа слоев по формулам 4, 5 или 6. После выполнения необходимого количества реализаций происходит статистическая обработка и печать результатов.

Переход от вероятности пробоя «элементарного» участка к вероятности пробоя всей корпусной изоляции двигателя производится в соответствии с [1]. Обозначим через  $k$  отношение всей площади изоляции двигателя к площади «элементарного» участка, т. е.

$$k = \frac{S_{\text{полн}}}{S_{\text{эл уч}}}.$$

Тогда вероятность пробоя изоляции на корпус

$$p = 1 - [1 - p(S_{\text{эл уч}})]^k \quad (7)$$

Так как величина  $P(S_{\text{эл уч}}) \ll 1$ , то

$$p \approx kp(S_{\text{эл уч}}). \quad (8)$$

Оценка требуемого количества реализаций  $N$  на ЭЦВМ определяется по формуле [2]

$$N = \frac{t_\alpha^2(1-p)}{pd_{\text{max}}^2}. \quad (9)$$

где  $t_\alpha$  — квантили нормального распределения,

$$\Phi(t_\alpha) = \alpha$$

$d_{\text{max}}$  — максимальная относительная ошибка решения.

#### ЛИТЕРАТУРА

А. С. Зингерман. Определение пробивного напряжения по испытаниям образцов. Электричество, № 3, 1950.

2. Н. П. Бусленко. Математическое моделирование производственных процессов, Издательство «Наука», 1964.