

МОДЕЛЬ НАДЕЖНОСТИ КОРПУСНОЙ ИЗОЛЯЦИИ

А. П. МАТЯЛИС, Э. К. СТРЕЛЬБИЦКИИ

(Представлена научным семинаром кафедры электрических машин и отделом электрических машин НИИ АЭМ)

Особенностью корпусной изоляции, оказывающей существенное влияние на форму математической интерпретации, является ее многослойность. Наличие нескольких разнородных слоев со случайными параметрами приводит к неопределенности как в отношении распределения напряжений, так и в последовательности пробоя слоев. Дополнительные трудности создает сложность формы распределения пробивных напряжений элементарных участков отдельных слоев. Распределения пробивных напряжений элементарных участков, как правило, представляют собой смеси распределений напряжений поврежденных и неповрежденных участков с сильно различающимися средними значениями. Поэтому в общем случае аналитическое представление затруднено и предпочтительнее является численно вероятностная модель.

В [1] описан разработанный нами алгоритм применения метода Монте-Карло для расчета вероятности брака корпусной изоляции.

Достоинство метода статистических испытаний состоит в достаточной скорости расчета на ЦВМ и независимости сложности представления от вида распределений пробивных напряжений слоев, входящих в композицию. Очевидным недостатком является невозможность проведения дисперсионного анализа, имеющего целью ранжирование отдельных причин пробоя по степени влияния на аварийность корпусной изоляции с последующей разработкой рекомендаций по устранению слабых мест. Кроме того, весьма затруднительно введение в схему расчета возникающего перенапряжения как случайной величины.

Поэтому для ряда практически важных случаев разработан аналитический метод, изложенный ниже. Для определенности рассмотрим метод на конкретном примере корпусной изоляции двигателей серий А2, А3 и А4. Корпусная изоляция этих двигателей состоит из слоя пленкоэлектрокартона (картон-лавсан), слоя лавсана и эмалевого покрытия провода.

Напряжение, приходящееся на i -й слой, равно

$$V_i = V \frac{d_i}{\sum_j \frac{d_j}{\epsilon_j}} = V \cdot \kappa_i, \quad (1)$$

где V — возникающее фазное перенапряжение,

$$\kappa_i = \frac{d_i}{\sum_j \frac{d_j}{\epsilon_j}}.$$

Среднее значение перенапряжения, приходящегося на i -й слой

$$\bar{V}_i = \bar{V} \bar{\kappa}_i, \quad (2)$$

где

$$\bar{\kappa}_i = \frac{\bar{d}_i}{\varepsilon_i \sum_j \frac{\bar{d}_j}{\varepsilon_j}}.$$

Дисперсия напряжения i -го слоя с точностью до членов второго порядка

$$D(V_i) = \bar{\kappa}_i^2 D(V) + D_{\text{доп}}(V_i), \quad (3)$$

где $D(V)$ — дисперсия фазного перенапряжения;

$D_{\text{доп}}(V)$ — дополнительная дисперсия напряжения i -го слоя, вызванная колебаниями d и ε .

Дополнительная дисперсия равна скалярному произведению вектора квадратов коэффициентов влияния толщин и диэлектрических проницаемостей на напряжение i -го слоя на вектор соответствующих дисперсий. Ввиду близости средних значений для различных материалов можно оперировать усредненными значениями ε и $D(\varepsilon)$ без существенной потери точности. Формула для расчета дополнительной дисперсии

$$D_{\text{доп}}(V_i) = \frac{\bar{V}_i^2}{\left(\sum_j \bar{d}_j\right)^4} \left\{ D(d_i) \left(\sum_{j+i} \bar{d}_j\right)^2 + \right. \\ \left. + (\bar{d})^2 \sum_{j+i} D(d_j) + \frac{D(\varepsilon) \cdot (\bar{d}_i)^2}{\varepsilon^2} \left(\sum_{j+i} \bar{d}_j\right)^2 + \frac{(\bar{d}_i)^2 D(\varepsilon)}{\varepsilon^2} \sum_{j+i} (\bar{d}_j)^2 \right\}. \quad (4)$$

Расчеты, проведенные по формуле (4), показали возможность пренебрежения величиной $D_{\text{доп}}(V_i)$ по сравнению с $D(V_i)$.

При превышении приложенным напряжением V_i пробивного напряжения i -го слоя U_i этот слой пробивается, и приложенное напряжение V_i распределяется между оставшимися слоями согласно формуле (1).

Вероятность пробоя всей цепи при единичном импульсе перенапряжения (для простоты возьмем трехслойную композицию) [1] +

$$P_1(ABC) = P(AB)P_{AB}(C) + P(AC)P_{AC}(B) + P(BC)P_{BC}(A) - \\ - P(A)P_A(B)P_A(C) - P(B)P_B(A)P_B(C) - \\ - P(C)P_C(A)P_C(B) + P(A)P(B)P(C), \quad (5)$$

где

$$P(AB) = P(A)P_A(B) + P(B)P_B(A) - P(A)P(B);$$

$$P(AC) = P(A)P_A(C) + P(C)P_C(A) - P(A)P(C);$$

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

Вероятность пробоя за ν импульсов перенапряжения

$$P_\nu(ABC) = 1 - [1 - P_1(ABC)]^\nu. \quad (6)$$

Вероятности типа $P(A)$, входящие в выражение (5), могут быть рассчитаны по формулам

$$P(A) = P\{V_i \geq U_i\} \cdot P\{V_i > U_{i \text{ мин}}\};$$

$$P\{V_i \geq U_i\} = F\left(\frac{\bar{V}_i - \bar{U}_i}{\sigma_{V_i}}\right); \quad (7)$$

$$P\{V_i > U_{i \text{ мин}}\} = F\left(\frac{\bar{V}_i - U_{i \text{ мин}}}{\sigma_{V_i}}\right);$$

$$\sigma_{V_i} = \sqrt{D(V_i) + D(U_i)}.$$

$U_{i\text{мин}}$ — минимальное пробивное напряжение i -го слоя;
 $U_{i\text{мин}} = 327$ в для воздушного слоя.

Расчет по формулам (5) предполагает однородность участков отдельных слоев и всей композиции корпусной изоляции. В действительности некоторые участки слоев повреждены и характеризуются резко уменьшенными пробивными напряжениями. Изучение гистограмм пробивных напряжений слоев листовой изоляции и изоляции провода дает основание представить каждое из распределений смесью распределений вида

$$f_i(U_i) = p_i f_{1i}(U) + (1 - p_i) f_{2i}(U), \quad (8)$$

где p_i — доля участков i -го слоя, имеющих повреждения, т. е. вероятность повреждения участка;

$f_{1i}(U)$ — плотность распределения пробивных напряжений поврежденных участков, т. е. плотность распределения пробивных напряжений воздуха или пропитывающего лака в соответствующих толщинах;

$f_{2i}(U)$ — плотность распределения пробивных напряжений неповрежденных участков.

Формула (5) определяет вероятность пробоя единичным импульсом одного элементарного участка, то есть участка такой площади, в пределах которой пробивное напряжение в любой точке можно считать неизменным. Такая формулировка является несколько расплывчатой ввиду возможности перекрытия по поверхности. Поэтому площадь элементарного участка может быть определена лишь с некоторой вероятностью того, что пробой произойдет в пределах площади элементарного участка, к которому приложено напряжение. Нетрудно понять, что величина участка будет зависеть как от числа слоев, так и от параметров слоев, что при большом разнообразии типов участков приводит к непомерному усложнению расчетов.

Чтобы избежать ненужных усложнений, связанных с точным расчетом пренебрежимо малых вероятностей пробоя отдельных типов участков, проведем отсеивающий анализ. На этой стадии мы можем произвольно задаться размером элементарного участка, лишь соблюдая условие

$$nP_S \{V > U\} \geq P_{ns} \{V > U\},$$

где $P_S \{V > U\}$ — вероятность пробоя элементарного участка площадью S ;

$P_{ns} \{V > U\}$ — вероятность пробоя элементарного участка площадью nS .

При наличии двух типов участков каждого слоя композиции, состоящей из n слоев, число типов участков композиции составляет $2n$.

Повреждения слоев изоляции в общем случае нельзя считать независимыми, поскольку при укладке обмотки внутренний слой лавсана может быть поврежден только со стороны внутренней полости паза (укладочным инструментом) или со стороны пакета статора (заусенцами). В обоих случаях это связано с обязательным повреждением соседнего слоя: в первом случае верхнего слоя лавсана, во втором — электрокартона. Проведенные нами испытания корпусной изоляции на различных этапах технологического процесса изготовления обмотки на заводе «Сибэлектромотор» показали, что повреждения внутреннего слоя лавсана в основном определяются совместным повреждением двух слоев лавсана на этапе укладки обмотки в пазы машины. Доля типов повреждений для каждого слоя по отношению к общему числу повреждений слоя приведена в табл. 1.

Таблица 1

Материал	Совместное повреждение трех слоев	Повреждение двух слоев лавсана со стороны внутренней полости паза	Совместное повреждение электрокартона и внутреннего слоя лавсана	Независимые повреждения слоя
Внешний слой лавсана <i>B</i>	0	0,21	—	0,79
Внутренний слой лавсана <i>C</i>	0	0,87	0,05	0,08
Электрокартон <i>D</i>	0	—	0,003	0,997

В табл. 2 приведены возможные типы участков четырехслойной корпусной изоляции асинхронных двигателей серии АО2 с указанием вероятности их появления и пробоя единичным импульсом применительно к технологии производства завода «Сибэлектромотор». Здесь приняты следующие обозначения: \bar{A} — поврежденный участок, *A* — неповрежденный участок.

Таблица 2

Тип участка	Доля участка площадью 0,196 мм ²	Вероятность пробоя участка при $\gamma=1$	Вероятность появления хотя бы одного участка в машине	Математическое ожидание числа участков в машине
1	2	3	4	5
$\bar{A}\bar{B}\bar{C}\bar{D}$	$0,9764 \cdot 10^{-13}$	0,2297	$0,4965 \cdot 10^{-7}$	$0,4965 \cdot 10^{-7}$
$A\bar{B}\bar{C}\bar{D}$	$0,2967 \cdot 10^{-9}$	$0,1964 \cdot 10^{-3}$	$0,1509 \cdot 10^{-3}$	$0,1509 \cdot 10^{-3}$
$\bar{A}B\bar{C}\bar{D}$	$0,8678 \cdot 10^{-9}$	$0,3297 \cdot 10^{-4}$	$0,4413 \cdot 10^{-3}$	$0,4413 \cdot 10^{-3}$
$A\bar{B}C\bar{D}$	$0,2637 \cdot 10^{-5}$	$0,6037 \cdot 10^{-8}$	0,7384	1,341
$\bar{A}\bar{B}C\bar{D}$	$0,3261 \cdot 10^{-12}$	$0,3686 \cdot 10^{-12}$	$0,1658 \cdot 10^{-6}$	$0,1658 \cdot 10^{-6}$
$\bar{A}B\bar{C}D$	$0,5071 \cdot 10^{-14}$	$0,6595 \cdot 10^{-12}$	$0,2578 \cdot 10^{-8}$	$0,2578 \cdot 10^{-8}$
$\bar{A}B\bar{C}D$	$0,4507 \cdot 10^{-10}$	$0,5202 \cdot 10^{-17}$	$0,2292 \cdot 10^{-4}$	$0,2292 \cdot 10^{-4}$
$A\bar{B}C\bar{D}$	$0,9908 \cdot 10^{-9}$	$0,1101 \cdot 10^{-15}$	$0,5038 \cdot 10^{-3}$	$0,5038 \cdot 10^{-3}$
$\bar{A}\bar{B}C D$	$0,2898 \cdot 10^{-8}$	$0,8169 \cdot 10^{-17}$	$0,1473 \cdot 10^{-2}$	$0,1474 \cdot 10^{-2}$
$A\bar{B}\bar{C}\bar{D}$	$0,1541 \cdot 10^{-10}$	$0,3462 \cdot 10^{-15}$	$0,7836 \cdot 10^{-5}$	$0,7836 \cdot 10^{-5}$
$A\bar{B}C D$	$0,8806 \cdot 10^{-5}$	$0,9040 \cdot 10^{-21}$	0,9086	4,478
$A\bar{B}\bar{C} D$	$0,1369 \cdot 10^{-6}$	$0,9040 \cdot 10^{-21}$	$0,6725 \cdot 10^{-1}$	$0,6961 \cdot 10^{-1}$
$\bar{A}B\bar{C}\bar{D}$	$0,3701 \cdot 10^{-7}$	$0,5310 \cdot 10^{-25}$	$0,1866 \cdot 10^{-1}$	$0,1882 \cdot 10^{-1}$
$\bar{A}B\bar{C} D$	$0,3289 \cdot 10^{-3}$	$0,1140 \cdot 10^{-30}$	1	167,2
$A\bar{B}C\bar{D}$	$0,1125 \cdot 10^{-3}$	$0,7832 \cdot 10^{-29}$	1	57,2
$A\bar{B}C D$	0,999547	$0,1487 \cdot 10^{-35}$	1	508260

Анализ табл. 2 дает основание сделать следующий вывод. Участки, содержащие хотя бы один неповрежденный слой лавсана, имеют исче-

зающе малую вероятность пробоя. Дальнейшему анализу подлежат только участки, содержащие поврежденные слои лавсана.

При испытании электроизоляционных материалов в электродах «игла — плоскость» пробой редко происходит в точке касания иглы. Место пробоя удалено от острия иглы на расстояние x , среднее значение \bar{x} и среднее квадратическое отклонение σ_x которого определяются электрической прочностью и степенью однородности материала. Вне зависимости от наличия повреждения слоя на площади радиуса x существует и неповрежденная изоляция и, следовательно, при независимости пробоя любых участков изоляции приложенным напряжением V возможен пробой как в месте повреждения, так и неповрежденной изоляции. Это обстоятельство приводит к неопределенности распределения напряжения по пути пробоя.

Примем допущение, что каждый путь пробоя имеет свое распределение напряжения, которое не зависит от состояния рядом лежащих

Таблица 3

Обозначение пути пробоя	Путь пробоя
AD	Неповрежденный слой A — неповрежденный слой D
$\bar{A}D$	Повреждение на слое A — неповрежденный слой D
$A\bar{D}$	Неповрежденный слой A — повреждение на слое D
$A\bar{D}$	Повреждение на слое A — повреждение на слое D

участков слоев изоляции, а также от того, что некоторые повреждения отдельных слоев входят в разные пути пробоя.

Определим вероятность пробоя корпусной изоляции, если имеется одно совпадающее повреждение обоих слоев лавсана. Возможные пути пробоя слоя A (эмаль провода) и D (электрокартон) представлены в табл. 3.

Вероятность пробоя корпусной изоляции по поврежденным местам зависит от удаления повреждений на слоях A

и D от точки повреждения слоев лавсана, поэтому необходимо рассмотреть состояние эмали провода и электрокартона в окрестностях повреждения лавсана. Для этого разобьем слои изоляции A и D на кольца шириной h с центром в точке прокола слоев лавсана и средним радиусом

$$r_{Ai} = r_{Di} = \frac{h}{2} + (i - 1)h, \quad (9)$$

где i — номер кольца.

Величина h определяется требуемой точностью расчетов.

Вероятность повреждения элементарного участка изоляции площадью πh^2 определяется из условия:

$$1 - Q = (1 - q)^{\frac{S}{\pi h^2}}, \quad (10)$$

где

q — вероятность повреждения элементарного участка;

Q — вероятность наличия хотя бы одного повреждения на площади S .

Величина Q определяется по результатам испытаний корпусной изоляции.

Условная вероятность пробоя корпусной изоляции при наличии сквозного повреждения слоев лавсана равна вероятности пробоя хотя бы по одному из путей, указанных в табл. 3. Рассмотрим каждый из этих путей.

1. Вероятность появления участков неповрежденной эмали и электрокартона в окрестности повреждения слоев лавсана равна 1, следова-

тельно, вероятность пробоя по пути неповрежденных слоев A и D определится как вероятность пробоя трехслойной композиции

$$P_1 = 1 - [1 - P_1(\overline{A}\overline{B}\overline{C}D)]^n. \quad (11)$$

2. При определении вероятности пробоя по пути повреждений нужно учесть удаленность дефектного элементарного участка от точки повреждения слоев лавсана, а также возможность скрытия повреждений пропитывающим лаком. Если величина h мала $0,1 \dots 0,5$ мм, то можно считать, что на элементарном участке невозможно появление более одного повреждения. Тогда события, заключающиеся в появлении на элементарном участке слоя повреждения, заполненного лаком, и появлении на этом участке повреждения, незаполненного лаком, являются несовместными. Поэтому вероятность пробоя по пути повреждения элементарного участка эмали, удаленного от места повреждения слоев лавсана на расстояние r_{Ai} и неповрежденного электрокартона, равна сумме

$$q_A q_L p'_{2i} + q_A (1 - q_L) p_{2i},$$

где q_A — вероятность повреждения элементарного участка слоя A ; q_L — вероятность скрытия повреждения пропитывающим лаком; p'_{2i} и p_{2i} — условные вероятности пробоя по вышеуказанному пути при наличии заполненного лаком повреждения на элементарном участке слоя A и незаполненного лаком повреждения соответственно.

Количество элементарных участков слоя A , удаленных на расстояние r_{Ai} от поврежденных слоев лавсана, определяется отношением площади i -го кольца к площади элементарного участка

$$n_i = \frac{2\pi r_{Ai} h}{\pi h^2} = 2i - 1. \quad (12)$$

Используя условие независимости пробоя корпусной изоляции по любому из возможных путей и применив формулу вероятности произведения независимых событий, получим вероятность пробоя корпусной изоляции хотя бы по одному из путей поврежденного участка слоя эмали и неповрежденного электрокартона

$$P_2 = 1 - \prod_{i=1}^i \{1 - q_A [q_L p'_{2i} + (1 - q_L) p_{2i}]\}^{n_i}. \quad (13)$$

3. Вероятность пробоя корпусной изоляции по пути поврежденного участка электрокартона и неповрежденного слоя эмали определяется аналогично случаю 2.

$$P_3 = 1 - \prod_{i=1}^i \{1 - q_D [q_L p'_{3i} + (1 - q_L) p_{3i}]\}^{n_i}. \quad (14)$$

Здесь p'_{3i} и p_{3i} — условные вероятности пробоя по пути повреждения слоя D и неповрежденного слоя A при наличии на элементарном участке слоя D повреждения, заполненного лаком и незаполненного лаком соответственно.

При этом предполагается, что совместного повреждения всех слоев пазовой коробочки в машине, прошедшей контрольные испытания, не существует.

4. Предположим, что каждый элементарный участок слоев A и D поврежден. Тогда будут существовать пути пробоя по повреждениям

с каждого элементарного участка одного слоя на все элементарные участки второго слоя. Выделим те пути, у которых

$$r_{iD} + r_{iA} = j \cdot h = \text{const}, \quad j = 1, 2, 3 \dots$$

Пробой по любому из этих путей равновероятен, а их количество определяется выражением

$$n_j = \sum_{i=1}^j (2i - 1) [2j - (2i - 1)]. \quad (15)$$

В действительности элементарные участки повреждены только с определенной вероятностью, и часть повреждений заполнена пропитывающим лаком. Пространство событий, определяющее наличие пути пробоя по поврежденным местам для любых элементарных участков слоев A и D , представлено в табл. 4.

Таблица 4

Обозначение пути пробоя	Путь пробоя	Вероятность появления	Вероятность пробоя
$\bar{A}_j \bar{D}_j$	Поврежденный элементарный участок слоя A — поврежденный элементарный участок слоя D	$q_A q_D (1 - q_L)^2$	p_{4j}
$\bar{A}_{Lj} \bar{D}_j$	Заполненное лаком повреждение элементарного участка слоя A — поврежденный элементарный участок слоя D	$q_A q_D (1 - q_L) q_L$	p'_{4Aj}
$\bar{A}_j \bar{D}_{Lj}$	Поврежденный элементарный участок слоя A — заполненное лаком повреждение элементарного участка слоя D	$q_A q_D (1 - q_L) q_L$	p'_{4Dj}
$\bar{A}_{Lj} \bar{D}_{Lj}$	Заполненное лаком повреждение элементарного участка слоя A — заполненное лаком повреждение элементарного участка слоя D	$q_A q_D q_L^2$	p'_{4j}

Вероятность пробоя корпусной изоляции хотя бы по одному из путей по поврежденным слоям A и D при наличии совпадающих повреждений слоев лавсана вычисляется по формуле

$$P_4 = 1 - \prod_{j=1}^j \{1 - q_A q_D [q_L^2 p_{4j} + (1 - q_L) q_L p'_{4Aj} + (1 - q_L) q_L p'_{4Dj} + (1 - q_L)^2 p_{4j}]\}^{n_j}. \quad (16)$$

Вероятность пробоя корпусной изоляции по месту совпадающих повреждений слоев лавсана при наличии такого повреждения равна

$$P \{ \Pi_j \bar{B} \bar{C} \} = 1 - (1 - P_1) (1 - P_2) (1 - P_3) (1 - P_4). \quad (17)$$

Наконец, определим вероятность появления в машине повреждений слоев лавсана, сдвинутых на некоторое расстояние. Для этого площадь слоя B разобьем на кольца шириной h_B с центром в точке повреждения слоя C . Тогда вероятность того, что в машине существует повреждение слоя B , сдвинутого на расстояние r_{Bi} от повреждения слоя C , равна

$$Q_{Bri} = 1 - (1 - q_B)^{2i-1}; \quad (18)$$

$$r_{Bi} = \frac{h_B}{2} + (i - 1) h_B.$$

Вероятность пробоя корпусной изоляции по пути сдвинутых дефектов на слоях лавсана при наличии повреждения слоя C определяется так же, как и при совпадающих повреждениях, с той лишь разницей, что в каждом случае путь пробоя удлиняется на r_{Bi} и правая часть формул (11, 13, 14, 16) умножается на Q_{Bri} .

Безусловная вероятность пробоя корпусной изоляции машины определится как вероятность пробоя хотя бы по одному из возможных путей.

$$P_k = 1 - [1 - P\{\Pi/\bar{B}\bar{C}\}]^{n_{\bar{B}\bar{C}}} \prod_{i=1}^i [1 - P\{\Pi/\bar{B}_i\bar{C}\}]^{n_{\bar{C}}}, \quad (19)$$

где $n_{\bar{B}\bar{C}}$ — математическое ожидание числа совпадающих поврежденных слоев лавсана;

$n_{\bar{C}}$ — математическое ожидание числа повреждений слоя C .

Проведенные по вышеизложенной методике расчеты вероятности пробоя корпусной изоляции показали, что она в основном определяется вероятностью пробоя совпадающих дефектов лавсана. В табл. 5 приведены результаты расчета вероятности пробоя корпусной изоляции двигателей серии А02 для $v = 10\,000$ и $q_d = 0,7$ с указанием погрешности при исключении из расчета путей пробоя по пропитанным дефектам и по пути сдвинутых повреждений на слоях лавсана.

Таблица 5

Учтенные при расчете пути пробоя	P_k	Погрешность, %
Все возможные пути по поврежденным слоям лавсана	0,000348	
Все возможные пути пробоя только по совпадающим повреждениям на слоях лавсана	0,000846	0,2
Возможные пути пробоя по совпадающим повреждениям на слоях лавсана, за исключением путей пробоя по повреждениям, заполненным лаком	0,000832	1,9

Сравнивая полученные результаты, видим, что при практических расчетах можно исключить из рассмотрения повреждения, заполненные в процессе пропитки лаком, а также (при небольших дефектностях) пути пробоя по сдвинутым повреждениям слоев лавсана. При этом объем расчета сокращается в несколько раз при незначительной потере точности.

Таким образом, исходными данными для расчета надежности корпусной изоляции асинхронных двигателей являются дефектности ее отдельных слоев. При этом нам необходимо получить информацию о вероятности совпадения повреждений слоев лавсана.

Можно предложить несколько схем испытаний, отвечающих этому требованию.

1. Испытывается внутренний слой лавсана, извлеченный из пазов после укладки обмотки. На гистограмме пробивных напряжений отчетливо различаются два участка:

а) участок, характеризующий частоту сквозных повреждений (среднее пробивное напряжение сквозного повреждения равно пробивному напряжению воздушного промежутка соответствующей толщины);

б) участок, характеризующий частоту неповрежденных участков лавсана.

Вероятность совместного повреждения двух слоев лавсана определится как вероятность повреждения внутреннего слоя лавсана за вычетом доли повреждений этого слоя на этапах технологического процесса до укладки обмотки в пазы машины. Недостатком этой схемы является большой объем испытаний, связанных с разборкой машин. Число машин, которое приходится разбирать для получения достаточного количества образцов корпусной изоляции, во много раз превышает число машин, разбираемых для оценки повреждаемости витковой изоляции.

2. Для расчета надежности корпусной изоляции можно использовать данные ОТК о величине брака по вине корпусной изоляции. Этот метод основывается на идее, что отказы в период приработки являются продолжением выявления скрытых дефектов, начатых на испытательной станции.

Безусловно, такой метод должен базироваться на предварительном изучении частоты повреждений отдельных слоев, но непосредственно для оценки надежности используются только данные ОТК.

Таблица 6

Вид брака	Частота
Смещение пазовой изоляции вдоль паза	0,0041
Смещение подклиника, неравномерность высоты боковых стенок пазовой изоляции	0,0099
Повреждение изоляции пазовой коробочки	0,0063

При использовании этого метода необходимо иметь в виду, что существуют типы дефектов корпусной изоляции, которые полностью выявляются и отбраковываются на испытательной станции. Эти дефекты не связаны с повреждениями слоев. Обычно, это сдвиги отдельных слоев и коробочки в целом. Частота такого брака на заводе «Сибэлектромотор» показана в табл. 6. Разумеется,

при испытании отдельных слоев такие дефекты не обнаруживаются.

Среднее число совпадающих дефектов лавсана определяется из выражения

$$P_{k \text{ исп}} = 1 - [1 - P_{\text{исп}} \{P/\bar{B}\bar{C}\}]^{n_{\bar{B}\bar{C}}}, \quad (20)$$

где $n_{\bar{B}\bar{C}}$ — среднее число совпадающих дефектов слоев лавсана;
 $P_{k \text{ исп}}$ — частота брака корпусной изоляции по вине поврежденной изоляции пазовой коробочки;

$P_{\text{исп}} \{P/\bar{B}\bar{C}\}$ — вероятность пробоя корпусной изоляции по месту повреждения двух слоев лавсана при наличии одного такого повреждения, определяемая по вышеизложенной методике при

$$V = U_{\text{исп}}, \quad \sigma_2 = \sigma_U, \quad \nu = 1, \quad q_d = 0.$$

При расчете надежности изоляции по данным ОТК следует учесть, что в машине, прошедшей контрольные испытания, не существует дефектов, которые выявляются испытательным напряжением. При учете этого

обстоятельства и при исключении из рассмотрения вероятности пробоя поврежденных, заполненных лаком, и вероятностей пробоя по сдвинутым дефектам на слоях лавсана расчетные формулы примут вид

$$\begin{aligned}
 P_1 &= \{1 - [1 - P_1(A\bar{B}\bar{C}D)]^y\} (1 - P_{1\text{исп}}); \\
 P_2 &= 1 - \prod_{i=1}^i [1 - q_A(1 - q_L)p_{2i}]^{n_i(1-p_{2i\text{исп}})}; \\
 P_3 &= 1 - \prod_{i=1}^i [1 - q_D(1 - q_L)p_{3i}]^{n_i(1-p_{3i\text{исп}})}; \\
 P_4 &= 1 - \prod_{j=1}^j [1 - q_Aq_D(1 - q_L)^2 p_{4j}]^{n_j(1-p_{4j\text{исп}})}; \\
 P_k &= 1 - [1 - P\{\Pi/\bar{B}\bar{C}\}]^{n_{\bar{B}\bar{C}}} [1 - p_{\text{исп}}\{\Pi/\bar{B}\bar{C}\}].
 \end{aligned} \tag{21}$$

Здесь $P_{1\text{исп}}$, $p_{2i\text{исп}}$, $p_{3i\text{исп}}$, $p_{4j\text{исп}}$, $P_{\text{исп}}\{\Pi/\bar{B}\bar{C}\}$ — условные вероятности пробоя корпусной изоляции испытательным напряжением по соответствующим путям при наличии таких путей пробоя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Э. К. Стрельбицкий, А. С. Гитман, Ю. П. Похолков. Исследование корпусной изоляции асинхронных двигателей со вспяными обмотками методом Монте-Карло. «Известия ТПИ», том 160, 1966.