ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА им. С. М. КИРОВА

Том 229 1972

МОДЕЛЬ НАДЕЖНОСТИ ВИТКОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ ВСЫПНЫХ ОБМОТОК В ПЕРИОД ПРИРАБОТКИ

А. П. МАТЯЛИС, Э. К. СТРЕЛЬБИЦКИЙ

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

Проведенный Томским политехническим институтом анализ качества витковой изоляции показал наличие большого количества слабых мест проводов, имеющих недопустимо низкое пробивное напряжение.

Условимся называть отказом витковой изоляции хотя бы один электрический пробой между соседними витками обмотки машины, т. е. витковое замыкание в рабочем или переходном режиме.

Отказ происходит, если хотя бы в одном месте напряжение между соседними витками превысит пробивное напряжение изоляционного промежутка. Основной причиной отказа является наличие проводников с поврежденной изоляцией, которые мы будем называть дефектными проводниками.

Обмотка машины представляется состоящей из множества элементов. Элементом является изоляционный промежуток между соседними проводниками длиной $l_{эл}$ в направлении оси проводника. Элементарный участок в общем случае имеет пробивное напряжение

$$U_{эл} = U_э + U_л, \tag{1}$$

где $U_э$ — пробивное напряжение эмалевых слоев соседних проводников;
$U_л$ — пробивное напряжение промежутка между изолированными проводниками, заполненного воздухом или пропитывающим составом.

Целью деления обмотки на элементарные участки является получение такой длины участка $l_{эл}$, в пределах которого пробивное напряжение можно считать неизменным. Для существующих в настоящее время толщин и пробивных напряжений эмалевого покрытия проводников круглого сечения можно считать, что $l_{эл} = 1$ *мм*.

Элементарные участки будем классифицировать по наличию или отсутствию отдельных слоев в его составе.

Обозначим:

$\overline{A}$ — событие, состоящее в том, что один слой эмали элементарного участка поврежден. В дальнейшем будет показано, что повреждение эквивалентно отсутствию слоя. Вероятность этого события $P\{\overline{A}\} = p$.

$\overline{A}$ — событие, состоящее в том, что между изолированными проводниками имеется зазор, заполненный воздухом или пропитывающим лаком. Вероятность этого события $P\{B\} = 1 - g$.

$\overline{B}$ — событие, состоящее в том, что изолированные проводники касаются. Вероятность этого события $P\{\overline{B}\} = g$.

Полное пространство событий: $\bar{A}\bar{A}\bar{B}$, $\bar{A}\bar{A}B$, $\bar{A}A\bar{B}$, $(A\bar{A}\bar{B})$, $A\bar{A}B$, AAB, $A\bar{A}B$, (AAB). Их вероятности приведены в таблице.

Тип эл. участка	Характеристика эл. участка	$\bar{B}$	B
		а	б
1	AA	$(1-p)^2 g$	$(1-p)^2 (1-g)$
2	$\bar{A}A$ или $A\bar{A}$	$2p(1-p) g$	$2p(1-p)(1-g)$
3	$\bar{A}\bar{A}$	$p^2 g$	$p^2(1-g)$

Общее число элементарных участков витковой изоляции подсчитывается с учетом того, что каждый проводник теоретически может касаться с шестью соседними проводниками, если он находится в середине паза, или с четырьмя соседними проводниками, если он прилегает к корпусной изоляции паза.

$$N = (2w_{\text{нар}} + 3w_{\text{вн}} - 3)\frac{l_w}{2l_{\text{эл}}} \cdot z, \tag{2}$$

где $w_{\text{нар}}$ — число проводников в наружном слое секции;
$w_{\text{вн}}$ — число проводников во внутренних слоях секции;
l_w — средняя длина витка;
z — число пазов в машине.

Вероятность повреждения элементарного участка определяется по данным испытаний проводников, вынутых из обмотанной непропитанной машины. Пробивное напряжение поврежденного участка представляет собой пробивное напряжение воздушного слоя соответствующей толщины (точнее, напряжение перекрытия по поверхности соответствующей длины) и, следовательно, значимо отличается от пробивного напряжения эмалевого слоя. Это обстоятельство позволяет отказаться от трудоемкого получения гистограмм пробивных напряжений и удовлетвориться бинарной классификацией изоляции: повреждена или не повреждена. В этом случае испытания проводятся при фиксированном испытательном напряжении, что значительно упрощает процедуру испытаний и повышает производительность труда. Уровень испытательного напряжения и размер электродов должны быть выбраны такими, чтобы, с одной стороны, пробивалось большинство поврежденных проводников, а, с другой стороны, вероятность пробоя неповрежденных участков была невелика. Необходимо иметь в виду, что пробивное напряжение возрастает при увеличении диаметра проводника, если испытания проводятся на плоском электроде, и при увеличении диаметра дробинок, если испытания проводятся в дроби. Причиной увеличения пробивного напряжения является увеличение длины перекрытия по поверхности. При обоих методах испытания выявляются практически все поврежденные участки, но параметры пробивного напряжения могут различаться по вышеуказанным причинам.

Испытания проводников на плоском электроде достаточно хорошо имитируют условия пробоя на соседний проводник. Однако при этом в большинстве случаев происходит перекрытие по поверхности эмали, что приводит к большим пробивным напряжениям, соизмеримым с пробивными напряжениями неповрежденных слоев эмали. Этот метод предъявляет высокие требования к точности измерения и поддержания стабильных условий опыта. Гораздо менее чувствителен к точности измерений метод испытаний в дроби, поскольку противные напряжения слабых мест существенно меньше пробивных напряжений эмали и распознавание поврежденных и неповрежденных участков не представляет труда.

Величина дефектности, полученная при испытаниях в дроби, должна быть уменьшена в 5—6 раз, так как в дальнейшем расчет дефектности ведется на один соседний проводник.

Установление закона распределения расстояний между проводниками и расчет вероятности плотного касания нами произведено методами теории массового обслуживания. Аналогом вероятности нулевого ожидания при обслуживании клиента в очереди является вероятность плотного касания, а время простоя прибора аналогично расстоянию между проводниками.

Вероятность плотного касания

$$g = \Psi, \tag{3}$$

где Ψ — линейный коэффициент заполнения паза.

$$\Psi = 0{,}93\sqrt{\kappa_{зап}}, \tag{4}$$

$\kappa_{зап}$ — коэффициент заполнения свободной площади паза, используемый в практике электромагнитного расчета.

Закон распределения расстояний между изолированными проводниками

$$Y(x) = 1 - (1 - \Psi)\, e^{-\lambda x}, \tag{5}$$

где λ — число проводников на единицу линейного размера паза (высоты, ширины).

Пробой элементарного участка происходит под действием коммутационного перенапряжения V, величина которого зависит как от разности номеров соседних витков по схеме обмотки, так и от величины импульса перенапряжения фазы обмотки. Нам необходимо определить вероятность события

$$P\{V > U_{эл}\}, \tag{6}$$

где

$$V = \frac{\Delta w}{w} V_ф;$$

$$U_{эл} = U_{э1} + U_{э2} + U_л;$$

Δw — разность номеров соседних витков по схеме обмотки;
w — число витков фазы;
V — величина импульса коммутационного перенапряжения фазы;
$U_{э1}$ — пробивное напряжение одного эмалевого слоя;
$U_{э2}$ — пробивное напряжение второго эмалевого слоя;
$U_л$ — пробивное напряжение промежутка между изолированными проводниками.

Эта задача достаточно сложна, так как величины $V_ф$, $U_э$, Δw, и $U_л$ являются случайными, распределенными по различным законам. Случаен и тип элементарного участка.

Дополним пространство событий, перечисленных в таблице, событиями П и $\overline{\text{П}}$, обозначающими соответственно пробой или непробой элементарного участка. Событие $\bar{A}A\bar{B}\text{П}$, например, заключается в том, что элементарный участок, состоящий из одного неповрежденного эмалевого слоя и из одного поврежденного эмалевого слоя, плотно касающихся друг с другом, пробит коммутационным перенапряжением. Нам предстоит вычислить следующие вероятности:

$P\{AA\bar{B}П\}$ — вероятность пробоя участков типа 1 а,
$P\{AABП\}$ — вероятность пробоя участков типа 1 б,

$P\{AABП\}$ — вероятность пробоя участков типа 2 а,
$P\{AABП\}$ — вероятность пробоя участков типа 2 б,
$P\{AABП\}$ — вероятность пробоя участков типа 3 а,
$P\{AABП\}$ — вероятность пробоя участков типа 3 б.

Для выполнения поставленной задачи необходимо определить законы распределения перечисленных выше случайных величин или их числовые характеристики.

Определим теперь законы распределения пробивных напряжений различных типов элементарных участков.

Технологический процесс нанесения эмалевой изоляции состоит в многократном пропускании провода через калибры увеличивающегося диаметра. Каждый новый слой располагается относительно центра провода эксцентрично, однако существует минимальная односторонняя толщина слоя, обусловленная смачивающим свойством лака.

Для установления минимальной односторонней толщины эмалевого покрытия были исследованы пробивные напряжения эмалевого покрытия после 1, 2, 3, 4, 5 проходов через калибр.

Исследования показали, что распределение пробивного напряжения одного слоя не является равномерным, как это можно было предположить при отсутствии смачивания. Оценка минимальной толщины одного слоя дает значение 1, 2 ... 1,5 *мк,* что соответствует минимальному пробивному напряжению

$$U'_{\text{мин}} = 200\ldots250\ \text{в}.$$

При увеличении числа слоев распределение суммы пробивных напряжений слоев асимптотически стремится к усеченному нормальному с параметрами

$$\begin{gathered} \overline{U} = rU'_{\text{мин}} + (\overline{U}_i - U'_{\text{мин}})\,r = r\overline{U}_i\,; \\ \sigma_U^2 = \frac{r}{3}\,(\overline{U}_i - U_{\text{мин}})^2; \\ U_{\text{мин}} = rU'_{\text{мин}} \end{gathered} \tag{7}$$

и плотностью

$$\begin{cases} f(U) = C_{\text{н}}\dfrac{1}{\sqrt{2\pi}\,\sigma_U}\exp\left[-\dfrac{(U-\overline{U})^2}{2\sigma_U^2}\right]; & U \geqslant U_{\text{мин}} \\ f(U) = 0; \quad U < U_{\text{мин}}, \end{cases} \tag{8}$$

где

$C_{\text{н}}$ — нормирующий множитель;
r — число проходов при эмалировании провода. Обычно $r = 6$—7;
$\overline{U}_i$ — среднее пробивное напряжение i-го слоя.

При испытании провода в дроби и в скрутках пробой происходит в наиболее слабом месте, т. е. в точке, обладающей минимальной толщиной эмалевого слоя. Поэтому распределение пробивного напряжения неповрежденного провода является распределением экстремальных значений усеченного нормального распределения с плотностью

$$\begin{cases} f_{\text{нп}}(U_{\text{п}}) = C_{\text{н}}^1\, n f(U)\left[1 - \displaystyle\int_{U'_{\text{мин}}}^{U} f(U)\,dU\right]^{n-1}; & U \geqslant U_{\text{мин}}; \\ f_{\text{нп}}(U_{\text{п}}) = 0; \quad U < U_{\text{мин}}, \\ C_{\text{н}}^1 = \dfrac{1}{1 - C_{\text{н}}^{-n}}\,. \end{cases} \tag{9}$$

Здесь n — число участков на отрезке провода, в пределах которых пробивное напряжение можно считать неизменным.

Формула (9) может быть использована для определения числа участков n, пробивное напряжение которых не коррелировано между собой, и длины элементарного участка $l_{\text{эл}}$. Таким путем установлено, что $l_{\text{эл}} \approx 1$ *мм*.

Вероятность пробоя участков типа 1 а при воздействии коммутационных перенапряжений может быть подсчитана следующим образом.

Плотность вероятности превышения коммутационным перенапряжением пробивного напряжения эмалевых слоев является плотностью композиции

$$\Delta U = V - U_{\text{э}}. \tag{10}$$

Так как V и $U_{\text{э}}$ распределены нормально, то и их разность распределена нормально с параметрами

$$\Delta\bar{U} = \bar{V} - \bar{U}_{\text{э}};$$
$$\sigma^2_{\Delta U} = \sigma^2_V + \sigma^2_U. \tag{11}$$

Вероятность того, что $\Delta U > 0$ равняется

$$P'\{\Delta U > 0\} = \int\limits_0^\infty \frac{1}{\sigma_{\Delta U}\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(U - \Delta\bar{U})^2}{2\sigma^2_{\Delta U}}\right] dU = F\left(\frac{\Delta\bar{U}}{\sigma_{\Delta U}}\right). \tag{12}$$

Пробой эмалевого слоя происходит в том случае, когда величина импульса перенапряжения превышает пробивное напряжение слоя, однако при этом величина импульса перенапряжения должна превышать минимальное пробивное напряжение слоя.

Итак, вероятность отказа элементарного участка типа 1 а при единичном воздействии импульса коммутационного перенапряжения равна

$$q_1' = P'\{\Delta U > 0\} \cdot P''\{V > U_{\text{мин}}\}, \tag{13}$$

где

$$P''\{V > U_{\text{мин}}\} = F\left(\frac{\bar{V} - U_{\text{мин}}}{\sigma_V}\right) - \tag{14}$$

вероятность превышения импульсом перенапряжения минимального пробивного напряжения эмалевого слоя.

Средняя вероятность пробоя элементарного участка подсчитывается с учетом распределения величины перенапряжения по катушке

$$\bar{q}_1' = 3\int\limits_0^1 F\left(\frac{\kappa\bar{V}_\kappa - \bar{U}_{\text{э}}}{\sqrt{\kappa^2\sigma^2_{V\kappa} + \sigma^2_{\text{э}}}}\right) F\left(\frac{\kappa\bar{V}_\kappa - U_{\text{мин}}}{\kappa\sigma_{V\kappa}}\right)(1-\kappa)^2\, d\kappa. \tag{15}$$

Вероятность пробоя хотя бы одного элементарного участка типа 1 а в машине при единичном импульсе перенапряжения равна

$$q_1 = 1 - (1 - q_1')^{N_{1a}}, \tag{16}$$

где

$$N_{1a} = (1-p)^2\, g \cdot N.$$

Этой вероятностью можно пренебречь вследствие ее малости по сравнению с вероятностью пробоя элементарных участков типа 3.

Вероятность пробоя участков типа 3 при воздействии коммутационных перенапряжений подсчитывается по аналогичным формулам. Предварительно вычислим параметры пробивного напряжения воздушных и лаковых промежутков. Толщины воздушных и лаковых промежутков равны толщинам двойного эмалевого слоя и, следовательно, распределены по усеченному нормальному закону с параметрами

$$\bar{\delta} = \delta_э,$$
$$\sigma = \sigma_э, \tag{17}$$
$$\delta_{мин} = 2r\delta'_{мин}.$$

Величина δ может быть взята из справочника, а среднее квадратическое отклонение двойной толщины рассчитывается по формуле

$$\sigma \cong \frac{2,4\,\bar{\delta}}{\sqrt{6r}}. \tag{18}$$

Пробивное напряжение воздуха в тонких слоях, согласно закону Пашена, линейно зависит от толщины, за исключением начального участка $\delta=0$—$0,008$ *мм* при атмосферном давлении

$$U(\delta) = 300 + 7000\,\delta, \tag{19}$$

где δ — в *мм*.

Минимальное значение пробивного напряжения воздушного промежутка составляет $U_{мин} = 327$ вольт.

Вследствие линейности можно считать $U_э$ распределенным нормально с параметрами

$$\bar{U}_э = 2E_в\bar{\delta},$$
$$\sigma_э = 1,2\frac{\bar{U}_э}{\sqrt{6r}} \tag{20}$$

и плотностью

$$\begin{cases} f(U) = \dfrac{1}{\sqrt{2\pi}\,\sigma_э}\exp\left[-\dfrac{(U-\bar{U}_э)^2}{2\sigma_э^2}\right]; \quad U \geqslant 327\ в; \\ f(U) = 0; \quad U < 327\ в. \end{cases} \tag{21}$$

Вероятность превышения импульсом перенапряжения пробивного напряжения элементарного участка типа 3

$$P\{\Delta U > 0\} = \int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\sigma_{\Delta U}}\exp\left[-\frac{(U-\Delta\bar{U})^2}{2\sigma_{\Delta U}^2}\right]dU = F\left(\frac{\Delta\bar{U}}{\sigma_{\Delta U}}\right), \tag{22}$$

где

$$\Delta\bar{U} = \bar{V} - \bar{U}_э;$$
$$\sigma_{\Delta U}^2 = \sigma_V^2 + \sigma_э^2. \tag{23}$$

Вероятность пробоя элементарного участка типа 3 при воздействии единичного импульса перенапряжения

$$q_3' = F\left(\frac{\Delta U}{\sigma_{\Delta U}}\right)\cdot F\left(\frac{\bar{V}-U_{мин}}{\sigma_V}\right), \tag{24}$$

где $F\left(\dfrac{\bar{V}-U_{мин}}{\sigma_V}\right)$ — вероятность превышения импульсом перенапряжения минимального пробивного напряжения воздушного промежутка.

Средняя вероятность пробоя элементарного участка подсчитывается по формуле, аналогичной (15),

$$\bar{q}_3' = 3\int_0^1 F\left(\frac{\kappa\bar{V}_\kappa - U_э}{\sqrt{\kappa^2\sigma_{V\kappa}^2 + \sigma_э^2}}\right)\cdot F\left(\frac{\kappa\bar{V}_\kappa - U_{мин}}{\kappa\sigma_{V\kappa}}\right)(1-\kappa)^2 d\kappa. \tag{25}$$

Интеграл (25) не является табличным и для практических вычислений может быть заменен суммой

$$\bar{q}_3' \cong \frac{3}{M} \sum_{i=M}^{i=0} F_1(i) F_2(i) \left(1 - \frac{i}{M}\right)^2, \tag{26}$$

где

$$F_1(i) = F\left(\frac{i\overline{V}_к - MU_э}{\sqrt{i^2\sigma_{Vк}^2 + M^2\sigma_э^2}}\right); \tag{27}$$

$$F_2(i) = F\left(\frac{i\overline{V}_к - MU_{мин}}{i\sigma_{v\,к}}\right). \tag{28}$$

Суммирование удобнее проводить от $i = M$ до $i = 0$. Полное число членов ряда достаточно взять $M = 10 \dots 20$, причем суммирование можно прекратить уже на половине, так как $F_2(i)$ быстро уменьшается с уменьшением i. Практически в эксплуатации выявляется около 20% слабых мест.

Определим интенсивность отказов в период приработки.

Среднее число дефектов в обмотке

$$a = N_{3a} = Ngp^2. \tag{29}$$

Это число невелико: для асинхронных двигателей 2—4 габаритов

$$a = 0{,}2 \dots 2{,}0.$$

Обозначим через x число дефектов в данной машине. Распределение числа дефектов по машинам подчиняется закону Пуассона

$$P(x) = \frac{a^x}{x!} e^{-a}. \tag{30}$$

Доля машин, не имеющих дефектов,

$$P(0) = e^{-a}. \tag{31}$$

Витковая изоляция этих машин не может отказать в период приработки.

Интенсивность отказов представляет сумму интенсивностей отказов машин, имеющих 1, 2, 3, и т. д. дефектов. Весовые коэффициенты суммы определяются по формуле (30).

Вероятность отказа машины, имеющей один дефект при единичном импульсе перенапряжения

$$Q_{\nu=1,\, x=1} = q_{3a}'. \tag{32}$$

Вероятность отказа машины за ν импульсов перенапряжения

$$Q_{\nu,\, x} = 1 - (1 - q_{3a}')^{\nu}. \tag{33}$$

Вероятность отказа машины, имеющей x дефектов за ν импульсов перенапряжения

$$Q_{\nu,\, x} = 1 - (1 - q_{3a}')^{x\nu}. \tag{34}$$

Интенсивность отказа в зависимости от ν

$$\lambda(\nu) = e^{-a} \sum_{x=1}^{\infty} \frac{a^x}{x!} \frac{\partial}{\partial \nu} \left[1 - (1 - q_{3a}')^{x\nu}\right]. \tag{35}$$

Для практических расчетов можно воспользоваться приближенной формулой интенсивности отказа на одно включение в интервале от ν до $\nu + \Delta\nu$.