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

Том 222 1975

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ВИТКОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК НИЗКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

А. П. МАТЯЛИС, Ю. П. ПОХОЛКОВ, Э. К. СТРЕЛЬБИЦКИЙ

(Представлена научным семинаром кафедры электроизоляционной и кабельной техники)

Одной из основных задач теории и практики надежности электрических машин является создание методов расчета вероятности их безотказной работы. Правильные, отражающие действительность математические модели могут быть получены лишь с учетом физики явления отказа. Количественное соответствие результатов расчета действительным определяется исходными предпосылками, учитываемыми переменными и их взаимосвязями.

Накопленный экспериментальный материал показывает, что определение предотказного состояния изоляции по изменению свойств изоляции, общих для всего объема, практически невозможно. Сопротивление, тангенс угла диэлектрических потерь и даже пробивное напряжение изменяются слабо, а затем наступает отказ. Это приводит к мысли, что причиной отказа является резкое по величине и во времени изменение свойств в ограниченном объеме.

Изучение влияния технологического процесса изготовления обмоток на свойства изоляции [1, 2] и процесса старения, сравнение прочности неповрежденной изоляции с уровнем воздействующих в эксплуатации напряжений позволили установить, что физической причиной пробоя изоляции низковольтных электрических машин является наличие дефектов. Под дефектом понимается сквозное повреждение изоляции (технологические повреждения, трещины, отслаивания и т. п.).

Разработанная ранее методика расчета долговечности всыпных обмоток асинхронных двигателей обладает недостатком, вытекающим из концепции о том, что при отказе пробивается изоляция [3]. Нижеизложенный метод расчета вероятности отказа исходит из того, что в эксплуатации отказ происходит в результате пробоя воздушных промежутков в дефектных местах рабочим напряжением или коммутационными перенапряжениями.

С точки зрения надежности витковая изоляция представляется последовательным соединением элементов. Элементом считается дефект на одном из соприкасающихся витков обмотки.

Отказ витковой изоляции происходит в результате возникновения короткого замыкания соседних витков. Короткое замыкание возникает в результате пробоя изоляции рабочим напряжением или коммутационными перенапряжениями. При этом следует учитывать, что не каждый пробой (перекрытие по поверхности изоляции) импульсами коммутационных перенапряжений приводит к отказу обмотки.

Условная вероятность возникновения короткого замыкания, если произошло перекрытие по поверхности изоляции импульсом коммутационного перенапряжения, зависит от величины перекрываемого расстояния z, величины импульса перенапряжения v и величины рабочего напряжения U. Эта зависимость определена экспериментально. Получена следующая эмпирическая формула для определения вероятности возникновения короткого замыкания при одном перекрытии коммутационным перенапряжением:

$$P\{K/\Pi\} = 1 - \exp\left(-\frac{0{,}00701 \cdot U + 0{,}000154\, V}{z}\right). \tag{1}$$

Если на касающихся витках имеются дефекты и расстояние между медью этих витков в местах дефектов равно z, то вероятность пробоя этого промежутка рабочим напряжением равна

$$q_z(U_c) = \int\limits_0^{U_c} f(V/U_c)\left[\int\limits_0^{V} f(U_z)\, dU\right] dV, \tag{2}$$

где $f(U_z)$ — плотность вероятности пробивного напряжения промежутка длиной z;

U_c — амплитуда максимального значения напряжения (с учетом колебания напряжения сети), приходящегося на секцию;

$f(V/U_c)$ — условная плотность вероятности напряжения V между касающимися витками, если величина напряжения на секции равна U_c.

Вероятность пробоя промежутка z одним импульсом коммутационного перенапряжения и возникновения короткого замыкания равна

$$q_z(V_c) = \int\limits_0^{\infty} f(V_c)\left\{\int\limits_0^{V_c} f(V/V_c)\left[\int\limits_0^{V} f(U_z)\cdot dU \cdot P\{K/\Pi\}\right]\cdot dV\right\}\cdot dV_c, \tag{3}$$

где $f(V_c)$ — плотность вероятности распределения величины коммутационных перенапряжений на секции обмотки.

Вероятность пробоя одного элемента на интервале времени $\Delta\tau$ при учете всех возможных расстояний z, если дефектность остается постоянной, равна

$$q_{1\Delta\tau} = \int\limits_0^{\infty} f(z)\,\{1 - [1 - q_z(V_c)]^{f_p \cdot \Delta\tau}\,[1 - q_z(U_c)]\}\, dz, \tag{4}$$

где $f(z)$ — плотность вероятности распределения величины промежутка между медью в месте дефекта одного из соприкасающихся витков и медью в месте дефекта второго витка;

f_p — расчетное число коммутационных операций в единицу времени, при которых возникают перенапряжения, превышающие величину U_c.

Интеграл (4) вычисляется численным методом и может быть использован для любых низковольтных электрических машин, если известны плотности распределения, входящие в выражения (3) и (4).

Дефекты в изоляции распределены случайно. Распределение их числа описывается пуассоновским законом, а величина промежутков между дефектами имеет экспоненциальное распределение с параметрами λ. Расстояние y от фиксированного дефекта на одном из касающихся витков до дефекта на другом витке, который может быть расположен по обе стороны от фиксированного, будет иметь плотность

$$f(y) = 2\lambda \cdot \exp(-2\lambda y); \quad y \geqslant 0, \tag{5}$$

где λ — среднее число дефектов на единицу длины провода.

Величина z равна сумме расстояния y и двусторонней толщины изоляции провода x

$$z = x + y. \tag{6}$$

Толщина изоляции распределена нормально с плотностью

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\sigma_x} \exp\left[-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma_x^2}\right], \tag{7}$$

где $\bar{x}$ — среднее значение двусторонней толщины изоляции провода;
σ_x — среднее квадратическое отклонение двусторонней толщины изоляции.

Распределение расстояния z опишется композицией законов распределения величин x и y

$$f(z) = \int_0^\infty 2\lambda e^{-2\lambda y} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\sigma_\kappa} \exp\left[-\frac{(z-y-\bar{x})^2}{2\sigma_x^2}\right] dy =$$

$$= 2\lambda \cdot e^{-2\lambda(z-\bar{x}-\lambda\sigma_x^2)}\, F\left(\frac{z-\bar{x}-2\lambda\sigma_x^2}{\sigma_x}\right), \tag{8}$$

где $F\left(\frac{z-\bar{x}-2\lambda\sigma_x^2}{\sigma_x}\right)$ — функция нормального распределения.

Распределение коммутационных перенапряжений в настоящее время получено для асинхронных двигателей и в общем случае описывается суперпозицией законов распределения [3, 4]. Если пренебречь величинами импульсов перенапряжений, равных и близких к номинальному напряжению, то оставшуюся часть распределения можно аппроксимировать нормальным законом, и значение $f_р$ следует принимать равным $(0{,}7 \div 0{,}8) f$, где f частота включения или реверсирования двигателей.

В низковольтных асинхронных машинах перенапряжения распределены равномерно по секциям и виткам обмотки [4]. Напряжение между парой касающихся витков с разностью номеров по схеме обмотки, равной l, будет иметь плотность распределения

$$f(V/l) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\sigma_{Vx}} \exp\left[-\frac{(V-\kappa\bar{V}_с)^2}{2\sigma_{V\kappa}^2}\right], \tag{9}$$

где

$$\bar{V}_с = \frac{\bar{V}_ф}{n_с};$$

$\bar{V}_ф$ — среднее значение величины фазных коммутационных перенапряжений;
$n_с$ — число секций в фазе;

$$\kappa = \frac{l}{S};$$

S — количество витков в секции;

$$\sigma_{V\kappa} = \kappa\sigma_{Vс};$$

$$\sigma_{Vс} = \frac{\sigma_{Vф}}{n_с};$$

$\sigma_{Vф}$ — среднее квадратическое отклонение величины фазных коммутационных перенапряжений.

Для асинхронных двигателей $V_ф = 1{,}55$ *кв* и $\sigma_{Vф} = 0{,}54$ *кв* [3].

Экспериментально было установлено, что распределение величины κ для пар касающихся витков всыпных обмоток имеет плотность

$$f(\kappa) = 3(\kappa - 1)^2, \quad 0 \leqslant \kappa \leqslant 1, \tag{10}$$

что подтверждается также результатами, приведенными в [5].

Пробой промежутка z происходит при условии

$$\Delta U = V - U_z > 0.$$

Величины U_z и V распределены нормально, поэтому и разность их имеет нормальное распределение с параметрами

$$\begin{cases} \sigma^2_{\Delta U\kappa} = \sigma^2_{V\kappa} + \sigma^2_{Uz} \\ \Delta\overline{U}_\kappa = \kappa\,\overline{U}_с - \overline{U}_z \end{cases} \tag{11}$$

и плотностью

$$f(\Delta U_\kappa) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\sigma_{\Delta U\kappa}} \cdot \exp \cdot \left[- \frac{(\Delta U - \Delta\overline{U}_\kappa)^2}{2\sigma^2_{\Delta U\kappa}} \right]. \tag{12}$$

Величины $\overline{U}_z$ и σ_{Uz} определяются экспериментально путем пробоя пар искусственно поврежденных образцов провода при соответствующих значениях z и при окружающих условиях, соответствующих условиям, в которых находится обмотка в эксплуатации.

Таким образом, аппроксимация распределения коммутационных перенапряжений нормальным законом приводит к существенному сокращению объема вычислений. Выражение (3) приводится к виду

$$q_z(V_с) = 3 \int_0^1 F\left(\frac{\Delta\overline{U}_\kappa}{\sigma_{\Delta U\kappa}}\right) \left[1 - \exp\left(- \frac{0{,}00701\,U_с + 0{,}000154\,\overline{V}_с}{z}\,\kappa \right) \right] \times$$

$$\times (\kappa - 1)^2\, d\kappa. \tag{13}$$

Для вычисления средней вероятности пробоя витковой изоляции нужно знать среднее значение λ. На основании статистически спланированного эксперимента, поставленного с целью изучения дефектообразования изоляции провода ПЭТВ, была получена следующая зависимость величины λ от воздействующих нагрузок:

$$\lambda(\tau, \Theta, f) = \lambda_0 + \tau c \cdot e^{b_1(\Theta - \Theta_0) + b_{11}(\Theta - \Theta_0)^2 + b_2 f}, \tag{14}$$

где λ_0 — число дефектов на единицу длины провода до старения $\left(\frac{1}{мм}\right)$;

τ — время старения (*час*);

Θ — рабочая температура (°C);

f — частота реверсирования или включения (1/*час*);

Θ_0 — температура класса изоляции (°C);

$c = 0{,}325 \cdot 10^{-6}$; $b_1 = 0{,}631 \cdot 10^{-1}$; $b_{11} = -0{,}39 \cdot 10^{-3}$; $b_2 = 0.148 \cdot 10^{-2}$.

Основное влияние на дефектообразование оказывает температура обмотки. При эксплуатации электрических машин она является случайной величиной, распределенной по нормальному закону. Среднее значение температуры определяется средней температурой окружающей среды и средним превышением температуры обмотки над температурой окружающей среды. Дисперсия определяется «перекосом» температур в обмотке, изменениями температуры окружающей среды, колебаниями напряжения сети и изменениями режимов работы. Среднее значение числа дефектов на единицу длины в момент времени τ определяется как математическое ожидание функции [6]

$$\overline{\lambda}_\tau = \int\limits_{-\infty}^{\infty} \lambda(\Theta, \tau, f) f(\Theta)\, d\Theta, \tag{15}$$

где

$$f(\Theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\cdot\sigma_\Theta} \cdot \exp\left[-\frac{(\Theta - \overline{\Theta})^2}{2\sigma_\Theta^2}\right].$$

Подставляя в (15) значения подынтегральных функций и сделав преобразования, получаем

$$\overline{\lambda}_\tau = \lambda_0 +$$

$$+ \tau c \frac{1}{\sqrt{1+2\sigma_\Theta^2 b_{11}}} \exp\left[\frac{b_1(\overline{\Theta} - \Theta_0 + 0{,}5\, b_1 \sigma_\Theta^2) + b_{11}(\overline{\Theta} - \Theta_c)^2}{1 + 2\sigma_\Theta^2 b_{11}} + b_2 f\right]. \tag{16}$$

При расчете вероятности пробоя элемента верхний предел интеграла (4) достаточно взять равным $z_m = 0{,}5 - 1$ *мм*, так как вероятности пробоя больших промежутков, как показали проведенные расчеты, ничтожно малы. Заменяя интеграл (4) суммой, получаем следующую формулу для расчета средней вероятности пробоя одного элемента на интервале рабочего времени $\tau_j - \Delta\tau$, τ_j:

$$\overline{q}_{1\Delta\tau j} = \frac{2\overline{\lambda}_{\tau j}\, z_m}{M_1} \sum_{i=0}^{i=M_1} e^{-2\overline{\lambda}_{\tau j}\left(\frac{z_m i}{M_1} - \overline{x} - \overline{\lambda}_{\tau j}\, \sigma_x^2\right)} F(i)\,\{1 - \tag{17}$$

$$- [1 - q_V(i)]^{f_p \Delta\tau} [1 - q_U(i)]\},$$

где

$$F(i) = F\left(\frac{z_m i - M_1 \overline{x} - 2M_1 \overline{\lambda}_{\tau j}\, \sigma_x^2}{M_1 \sigma_x}\right); \tag{18}$$

$$q_V(i) = \frac{3}{M_2} \sum_{i_1=0}^{i_1=M_2} F\left(\frac{i_1 \overline{V}_c - M_2 \overline{U}_z}{\sqrt{i_1^2 \sigma_{Vc}^2 + M_2^2 \sigma_{Uz}^2}}\right)\left(\frac{i_1}{M_2} - 1\right)^2; \qquad z = \frac{i\cdot z_m}{M_1}; \tag{19}$$

$$q_U(i) = \frac{3}{M_3} \sum_{i_2=0}^{i_2=M_3} F\left(\frac{i_2 U_c - M_3 \overline{U}_z}{M_3 \sigma_{Uz}}\right)\left(\frac{i_2}{M_3} - 1\right)^2; \quad z = \frac{i\cdot z_m}{M_1}. \tag{20}$$

Значение $\Delta\tau$ выбирается таким образом, чтобы величины уровня дефектности $\overline{\lambda}\tau$ в момент времени $\tau - \Delta\tau$ и τ отличались несущественно. Число членов ряда выбирается из расчета, чтобы отношение $\frac{z_m}{M_1}$ было равно $0{,}02 \div 0{,}03$ *мм*. Число членов M_2 и M_3 достаточно взять равным $10 \div 20$.

Условная вероятность отказа машины по вине витковой изоляции на интервале времени 0, $\tau_j - \Delta\tau$, τ_j при условии, что на интервале времени 0, $\tau_j - \Delta\tau$ отсутствовал отказ, равна

$$q_{\Delta\tau j} = 1 - (1 - \overline{q}_{1\Delta\tau j})^{N_э}, \tag{21}$$

где $N_э = \psi L \overline{\lambda}\tau_j$ — число элементов по всей обмотке;

L — общая длина пар соседних витков в обмотке;

ψ — коэффициент, учитывающий долю плотно касающихся соседних витков.

Принимается, что отказ возможен только в случае плотного касания витков. Это обусловлено тем, что в нормальных условиях эксплуатации уровень рабочих напряжений недостаточен для пробоя воздушных промежутков, превышающих толщину изоляции, а после воздействия кратковременных импульсов коммутационных перенапряжений прочность воздушного промежутка восстанавливается. В случае плотного касания воздушный промежуток между изолированными проводниками отсутствует и при пробое (перекрытия по поверхности) достаточно мощным импульсом коммутационного перенапряжения образуются на поверхности изоляции проводящие мостики, приводящие к короткому замыканию витков рабочим напряжением.

Вероятность плотного касания

$$\psi = 0{,}93 \sqrt{\kappa_{зап}}, \qquad (22)$$

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

Величина L определяется по формуле [7]

$$L = (w_н + 1{,}5\, w_в - 1{,}5)\, l_w z_п, \qquad (23)$$

где $w_н$ — число проводников в наружном слое секции;
$w_в$ — число проводников во внутренних слоях секции;
l_w — средняя длина витка;
$z_п$ — число пазов в машине.

Расчет удобно проводить при использовании равных интервалов ремени $\Delta\tau$. Вероятность отказа витковой изоляции на интервале времени $\tau_j - \Delta\tau$, τ_j

$$Q_{\Delta\tau j} = q_{\Delta\tau j}\,(1 - Q_{\tau j - \Delta\tau}), \qquad (24)$$

где $Q_{\tau_j - \Delta\tau}$ — вероятность отказа витковой изоляции до момента времени $\tau_j - \Delta\tau$.

Вероятность отказа за время $\tau = n\Delta\tau$ равна

$$Q_\tau = \sum_{j=1}^{n} Q_{\Delta\tau j}. \qquad (25)$$

В заключение отметим, что для асинхронных двигателей при нормальных условиях эксплуатации вероятность пробоя элемента рабочим напряжением, определяемая по формуле (2), значительно меньше вероятности пробоя коммутационными перенапряжениями. Поэтому в практических расчетах ею можно пренебречь. Эта вероятность становится существенной, когда прочность элемента снижается, например, при конденсации влаги, если обмотка двигателя находится в атмосфере высокой влажности.

ЛИТЕРАТУРА

1. О. П. Муравлев, Ю. П. Похолков, Э. К. Стрельбицкий. Влияние обмоточно-изолировочных работ на пробивное напряжение витковой изоляции асинхронных двигателей. Изв. вузов СССР, «Электромеханика», 1966, № 1.
2. Э. К. Стрельбицкий, О. П. Муравлев, Ю. П. Похолков, А. С. Гитман. Исследование дефектности витковой и корпусной изоляции всыпных обмоток асинхронных двигателей. Известия ТПИ, т. 160. Томск, изд-во ТГУ, 1966.
3. Методика расчета долговечности всыпных обмоток асинхронных электродвигателей мощностью от 0,18 до 100 квт. ОТЭ, 139, 191, МЭТП. СКБЭМ, Томск, 1969.
4. О. Д. Гольдберг. Теоретическая и экспериментальная разработка методов расчета показателей надежности, ускоренных испытаний и контроля качества асинхронных двигателей. Автореферат диссертации. М., 1971.
5. О. Д. Гольдберг. Качество и надежность асинхронных двигателей. М., «Энергия», 1968.
6. Е. С. Вентцель. Теория вероятностей. М., Физматгиз, 1962.
7. А. С. Гитман, О. П. Муравлев, Ю. П. Похолков, Э. К. Стрельбицкий. Методика расчета надежности витковой изоляции асинхронных двигателей в период приработки. Известия ТПИ, т. 190. Томск, изд-во ТГУ, 1968.