

# РЕСУРС ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ МАСЛОНАПОЛНЕННЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Васин В.П., докт. техн. наук, ООО НТЦ «ЭДС»  
Долин А.П., канд. техн. наук, ОАО «ФСК ЕЭС»

**А**ктуальность создания полноценной методологической основы расчетов и прогнозирования расходования ресурса трансформаторного оборудования (далее трансформаторов) общеизвестна. Она связана с проблемой замены значительного числа трансформаторов, которая назрела в ЕЭС России в силу ее жизненного цикла, поэтому объективное обоснование выбора очередности и временной последовательности такой перестройки электроэнергетики имеет большую практическую потребность.

Указанная проблема чрезвычайно объемна, но авторы в данной статье ограничиваются вопросами расходования ресурса бумажной изоляции, поскольку именно ресурс бумажной изоляции, как правило, определяет ресурс трансформатора [1]. Главное, как показывает обзор исследований по этой проблеме, — это необходимость учета большого числа факторов, влияющих на старение изоляции трансформаторов.

Расчеты исчерпания ресурса изоляции рассмотрены в учебниках [2 и др.] (где даны примеры их применения), в справочной книге [1] и других работах. Однако практическое использование указанных разработок вызывает существенные затруднения. Прежде всего, это связано с необходимостью проведения «вскрытия» трансформаторов (то есть проведения достаточно дорогостоящих капитальных ремонтов) для отбора проб бумажной изоляции и определения их степени полимеризации, кроме того, отсутствием обоснованных методов оценки износа бумажной изоляции по содержанию в масле фурановых соединений (выделяющихся в процессе деструкции целлюлозы) в реальных отечественных условиях при наличии у трансформаторов термосифонных и адсорбционных фильтров и достаточно регулярной в них замены силикагеля, который адсорбирует соединения фурана. Следует также отметить, что, как правило, исследования, посвященные старению бумажной изоляции трансформаторов, решают вопрос об определении износа изоляции и не дают оценок ее остаточного ресурса.

Так, в [1] утверждается, что «ресурс изоляции по условию снижения степени полимеризации до 200 ед. может быть оценен по предложению СИГРЭ по выражению

$$\text{Ресурс} = \frac{(1/200 - 1/СП_0) \exp[13350/(v + 273)]}{(8760 A)}, \quad (1)$$

где  $СП_0$  — степень полимеризации целлюлозной изоляции на начало рассматриваемого промежутка времени,  $v$  — температура наиболее нагретой точки изоляции;  $A$  — показатель скорости старения, зависящий от влагосодержания, наличия кислот и кислорода».

При этом, как видно из приведенной формулы, приходится считать постоянными температуру обмотки, влагосодержание изоляции и уровень окислительных процессов (в том числе, кислотное число масла). Однако все эти факторы существенно изменяются в процессе эксплуатации. Рост указанных параметров приводит к очень большому увеличению скорости старения изоляции, которая носит переменный во времени характер, так как влияющие факторы существенно меняются в процессе эксплуатации.

Динамику теплового износа изоляции, как известно, описывает интегральное выражение (формула Монтзингера) [1, 2]: относительный износ изоляции на интервале времени  $(t_0, t_0 + T)$   $L$  определяется выражением:

$$L(t_0, t_0 + T) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0 + T} \exp[\ln 2 \cdot (\theta_h - 98)/\Delta] dt, \quad (2)$$

где  $\theta_h$  — температура наиболее нагретой точки обмотки трансформатора, а  $\Delta$  принимают равной 6 °С (МЭК) или 7 °С (Россия) [1]. При этом  $\theta_h$  является функцией времени в соответствии с режимами работы трансформатора. Это выражение также рекомендуется документом МЭК IEC 60076-7 и отраслевыми отечественными стандартами.

В (2) под интегралом стоит функция, называемая скоростью старения изоляции, имеющая простой физический смысл: если она равна 1, то интеграл будет равен  $T$  и относительный износ изоляции на рассматриваемом отрезке времени тоже равен 1. Это означает, что износ на  $(t_0, t_0 + T)$  в годах равен длине этого интервала, то есть  $T$ . Например, если  $T$  будет равно 25 годам, то за это время произойдет полный износ изоляции.

Если на рассматриваемом интервале времени функция  $\exp[\ln 2 \cdot (\theta_h - 98)/\Delta]$  больше 1, то относительный износ изоляции на интервале времени  $(t_0, t_0 + T)$  будет больше единицы. Абсолютный износ будет в таком случае больше  $T$ , то есть за промежуток времени длиной  $T$  износ  $I$ , исчисляемый в годах, будет больше  $T$ :  $I = L(t_0, t_0 + T) \cdot T > T$ . Поэтому к моменту

времени, когда износ, выражаемый в годах, станет равным  $T$ , произойдет полный износ изоляции.

Если же подинтегральная функция на всем интервале меньше 1, то относительный износ изоляции на нем будет меньше единицы. В физическом выражении износ будет соответственно меньше  $T$ . Итак, подинтегральная функция имеет физический смысл скорости относительного износа как функции температуры наиболее нагретой точки. Громадное достоинство этого выражения (2) заключается в том, что оно дает возможность анализировать износы изоляции при разных нагрузках трансформатора в динамике.

Задача состоит в том, чтобы учесть в этом выражении указанные выше факторы. Анализ формулы (2) показывает направление, в котором следует доработать способы учета влажности при расчетах износа изоляции в текущем времени, чтобы иметь возможность учитывать динамику изменения увлажнения изоляции и окисления масла в формуле (2).

Есть вполне обоснованная возможность учесть повышение скорости износа изоляции при ее увлажнении на основе данных, приведенных в [1, рис. 19.12], о влиянии влагосодержания бумаги на скорость теплового старения. Зависимость роста скорости старения от влагосодержания бумаги приведена графически на плоскости с логарифмическим масштабом и по оси абсцисс (по ней откладывается влагосодержание бумаги  $w_6$ ), и по оси ординат (по ней откладывается относительная скорость старения). Эта зависимость линейная, ее параметры приведены также в численном выражении: при увеличении влагосодержания от 0,3% до 1% скорость старения увеличивается в 6 раз. Поэтому на плоскости с координатами  $(\ln w, \ln V_w)$  зависимость отображается прямой, проходящей через точки  $M_1$  и  $M_2$  с координатами  $M_1 (0,3; 1)$ ;  $M_2 (1,6)$ :  $\ln V_w = k (\ln w_6 - \ln 0,3)$ .

Значение  $k$  определяется из условия, что координаты точки  $M_2 (1; 6)$ , удовлетворяют этому уравнению:  $k = \ln 6 / \ln(1/0,3) = 1,493$ . Итак, влияние влагосодержания бумаги на скорость старения выражается формулой

$$V_w = (w/0,3)^{1,493}. \quad (3)$$

Соответственно интеграл для относительного износа изоляции (2) при  $w \geq 0,3$  следует скорректировать на учет увлажнения бумаги умножением подинтегральной функции (относительной скорости теплового старения изоляции) на  $V_w$

$$L(t_0, t_0+T) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} V_w \exp [\ln 2 \cdot (\theta_h - 98) / \Delta] dt = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} (w/0,3)^{1,493} \exp [\ln 2 \cdot (\theta_h - 98) / \Delta] dt, \quad (4)$$

или при  $w \geq w_{баз}$

$$L(t_0, t_0+T) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} (w/w_{баз})^{1,493} \exp [\ln 2 \cdot (\theta_h - 98) / \Delta] dt. \quad (5)$$

Здесь вопрос о значении  $w_{баз}$  имеет смысл оставить открытым на усмотрение каждого исследователя, но, по-видимому,  $w_{баз}$  следует принимать не больше чем 0,5%.

В (5) под интегралом стоят функции, зависящие от времени, они могут быть получены по результатам измерений параметров изоляции (например, по  $\text{tg} \delta$  масла и обмотки или по равновесному состоянию) при периодических обследованиях или средствами мониторинга.

Прежде всего рассмотрим, какие практические выводы из полученной формулы вытекают. Для получения качественных выводов применим теорему о среднем значении для интеграла в выражении (5)

$$L(t_0, t_0+T) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} (w/w_{баз})^{1,493} \exp [\ln 2 \cdot (\theta_h - 98) / \Delta] dt = (w_{cp}/w_{баз})^{1,493} \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \exp [\ln 2 \cdot (\theta_h - 98) / \Delta] dt, \quad (6)$$

где  $w_{cp}$  — значение влагосодержания бумажной изоляции в некоторой промежуточной точке интервала интегрирования.

Для прозрачности выводов рассмотрим промежуток времени длиной в 1 час. Из опыта эксплуатации известно, что влагосодержание бумажной изоляции — медленно меняющаяся величина и для промежутка времени в 1 час можно приближенно принять ее постоянной  $w = w_{cp}$ . Тогда относительный износ увлажненной изоляции будет приближенно равен

$$L(t_0, t_0+T) = (w_{cp}/w_{баз})^{1,493} \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \exp [\ln 2 \cdot (\theta_h - 98) / \Delta] dt = (w_{cp}/w_{баз})^{1,493} L_{c.из}(t_0, t_0+T), \quad (7)$$

где  $L_{c.из}(t_0, t_0+T)$  — относительный износ изоляции с влагосодержанием менее чем 0,3% («сухой изоляции»).

Это равенство означает, что увлажнение изоляции приводит к увеличению относительного износа изоляции в  $(w_{cp}/w_{баз})^{1,493}$ .

При  $w_{cp} = 1$  увеличение износа произойдет в 6 раз по отношению к износу сухой изоляции при малом содержании кислорода в масле. Отечественные нормативы допускают увлажнение твердой изоляции до 4%. Но если подставить в (7) это значение, то получим, что износ возрастает при таком увлажнении бумаги в 47,8 раз. Это означает, что за сутки износ составит 47,8 суток и восемь таких суток в году приведут к износу более чем в 1 год.

Не менее существенным оказывается влияние на деградацию изоляции окисления масла. К сожалению, в явном виде данных о влиянии этого фактора в известных работах нет. Данные о влиянии кислотности даются совместно с данными о влиянии увлажнения. В [1, табл. 22.1] (по данным СИГРЭ) приведена оценка показателя скорости старения для окисленного масла при повышенном содержании кислорода, согласно которой скорость старения возрастает более чем в четыре раза: отношение показателей скорости старения равно

8,3/2,0=4,15. Это позволяет дать предварительную оценку учета окисления введением под интеграл еще одного множителя, учитывающего относительное увеличение скорости старения из-за окисления масла:

$$V_{ок} = (K/K_{баз})^\eta, \quad (8)$$

где  $K$  — кислотное число масла;  $K_{баз}$  — кислотное число, принятое за базовое значение.

Проводя операции, подобные изложенным выше, получаем показатель степени в (8)  $\eta = 2,05$ , при  $K_{баз} = 0,008$  мг КОН/г.

Интеграл старения (относительный износ изоляции) с учетом влияния увлажнения бумажной изоляции и окисления масла при  $w \geq w_{баз}$  и  $K \geq K_{баз}$  принимает вид

$$L(t_0, t_0+T) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \left( \frac{K}{K_{баз}} \right)^{2,05} \left( \frac{w}{w_{баз}} \right)^{1,493} \exp[\ln 2 \cdot (\theta_n - 98)/\Delta] dt. \quad (9)$$

Полученное выражение для оценки процесса старения дает возможность учесть важнейшие факторы, повышающие скорость старения, в динамике процесса. Покажем, насколько велико влияние рассматриваемых факторов на значения износа изоляции на интервале времени 1 месяц. При этом  $K$  и  $w$  (поскольку это медленно меняющиеся функции времени) можно вынести за знак интеграла и оценить

$$L(t_0, t_0+T) = \left( \frac{K}{K_{баз}} \right)^{2,05} \left( \frac{w}{w_{баз}} \right)^{1,493} \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \exp[\ln 2 \cdot (\theta_n - 98)/\Delta] dt.$$

Таким образом, влияние увлажнения бумаги и окисления масла количественно выражается значениями  $V_K = (K/K_{баз})^{2,05}$  и  $V_w = (w/w_{баз})^{1,493}$ .

Например, при  $K = 0,0148$  мг КОН/г и  $w = 1,2\%$  получаем  $V_K = 3,55$  и  $V_w = 7,92$ , соответственно  $V_K \cdot V_w = 28,1$ , то есть учет увлажнения бумаги и окисления масла дает возрастание относительного износа изоляции примерно в 28 раз!

Работающие в настоящее время системы мониторинга мощных трансформаторов показывают, что относительное старение, рассчитанное по (1), принимает значение в диапазоне 0,02-0,04. Учет  $K$  и  $w$  указанными значениями даст действительное старение, близкое и даже превосходящее 1 (0,56-1,12), то есть учет увлажнения и окисления может кардинально изменить оценку состояния изоляции. Из этого следует, что при решении вопроса о продлении срока службы трансформатора, проработавшего 25-35 лет, необходимо очень подробно учесть работу его с увлажненной изоляцией и оценить возможность продления с учетом поправки на ускоренный износ в периоды повышенной влажности. При этом, поскольку возможности непосредственного измерения износа изоляции крайне ограничены, вопрос о реальном состоянии изоляции остается открытым. Как известно, ряд специалистов ориентируется на учет множества других факторов: содержания кислорода в масле  $c_{O_2}$ , значения  $R_{60}$ ,  $tg\delta$  изоляции обмоток и старение масла (характеризуемое, например, стабильностью

масла против окисления  $S_M$ ) и др. Однако количественные оценки здесь пока отсутствуют. Какие пути возможны для развития, подсказывает логика полученных результатов с учетом столь различных факторов, как увлажнение бумаги и окисление масла в подынтегральном выражении в формуле Монтзингера.

Прямое развитие ее состоит в том, что, кроме множителей  $V_K$  и  $V_w$ , надо вводить новые множители, зависящие от  $R_{60}$ ,  $tg\delta$ ,  $c_{O_2}$ . Это представляется экстравагантным, но все же может быть оправдано следующими соображениями. Подынтегральное выражение в формуле (6) преобразуем следующим образом

$$V = (K/K_{баз})^{2,05} (w/w_{баз})^{1,493} \exp[\ln 2 \cdot (\theta_n - 98)/\Delta] = \exp[2,05 \ln(K/K_{баз}) + 1,493 \ln(w/w_{баз}) + \ln 2 \cdot (\theta_n - 98)/\Delta].$$

Это показывает, что по существу учет факторов, влияющих на износ изоляции, состоит в суперпозиции их логарифмов с соответствующими коэффициентами. Если фактор мало влияет, то коэффициент при нем оказывается близким к 0, а результирующая скорость старения не изменяется. Поэтому естественно искать способы учета содержания кислорода  $c_{O_2}$ , стабильности масла против окисления  $S_M$  и др. введением соответствующих добавок к показателю степени экспоненты, то есть искать уточненное выражение в виде

$$V = \exp[2,05 \ln(K/K_{баз}) + 1,493 \ln(w/w_{баз}) + \ln 2 \cdot (\theta_n - 98)/\Delta + k_{O_2} \ln(c_{O_2}/c_{O_2баз}) + k_{С.Т.М.} \ln(S_M/S_{M.баз})].$$

Это разложение можно продолжить подобно тому, как функцию многих переменных разлагают в ряд Тейлора.

Какие соображения могли бы служить для оценки значений введенных коэффициентов? Конечно, прежде всего, экспериментальная проверка, которую надо делать, но можно воспользоваться и качественными сопоставлениями.

Например, можно считать, что влияние окисления масла и повышения концентрации кислорода примерно одинаковы, то есть коэффициент  $k_{O_2}$  должен быть близок к 2,05.

Из предыдущего следует, что необходимы развернутые исследования по динамике процессов износа изоляции, поскольку существующие методы расчета расхода ресурса дают на отдельных промежутках времени значения, заниженные в десятки раз. Одновременно приведенные выше коэффициенты, позволяющие учесть существенное возрастание скорости деструкции, требуют проведения испытаний, нацеленных на их уточнение.

Для эксплуатации неизменным остается требование относительно недопущения увлажнения бумажной изоляции и значительного окисления масла.

При решении вопросов продления сроков эксплуатации необходимо учитывать возможность увлажнения изоляции и в последующей эксплуатации. Но такая информация отсутствует, поэтому возникает необходимость прогнозировать и изменение нагрузок, и изменение климатических условий и т.п. И таким образом вытекает насущная необходимость рассмотрения

процессов старения как случайных процессов, про которые можно дать оценки их математического ожидания и среднеквадратического отклонения их значений.

Как показано в [3, 4], при анализе расхода ресурсов как случайного процесса на многолетнем промежутке времени удобно рассматривать при дискретном изменении времени, то есть время наблюдения взять с шагом в 1 год.

Для  $T = 1$  год относительный износ изоляции численно равен абсолютному износу, выраженному в годах. И это удобно для анализа и обоснования принятия разных решений. При этом одновременно и существенно упрощается модель процесса: вместо задачи анализа и прогнозирования случайных функций надо работать со случайными последовательностями.

Итак, вводится в рассмотрение последовательность значений износа изоляции за 1 год

$$I_{i_0}, I_{i_0+1}, I_{i_0+2}, \dots, I_{i_0+k}, \dots,$$

где  $i_0$  — номер года, в котором было начато наблюдение. Ниже считаем  $i_0 = 1$ .

Можно привести и другие аргументы о предпочтительности рассмотрения таких последовательностей. Наиболее важный из них заключается в том, что при отсутствии экстраординарных событий (аварий на трансформаторе, значительных изменений условий работы, модернизации или поломки элементов системы охлаждения и т.п.) можно считать, что износы примерно одинаковы и различаются вследствие случайных причин.

Кроме того, как всякая физическая величина  $I_i$  является случайной величиной (СВ) со своим математическим ожиданием (МО) —  $m_i$  и среднеквадратическим отклонением (СКО) —  $\sigma_i$ .

Абсолютный износ изоляции в годах за  $n$  лет  $I_{\text{сум}}(n)$  равен

$$I_{\text{сум}}(n) = I_1 + I_2 + \dots + I_n.$$

Так как износ изоляции  $I_k = L_k$ , то

$$I_{\text{сум}}(n) = L_1 + L_2 + \dots + L_n.$$

Поделив это равенство на  $n$ , получаем, что относительный износ изоляции за  $n$  лет равен среднему относительному износу за год

$$L_{\Sigma n} = (L_1 + L_2 + \dots + L_n)/n. \quad (10)$$

Здесь в правой части равенства стоит сумма случайных величин  $L_k$ , математические ожидания которых будут равны  $m_k$ , а их СКО —  $\sigma_k$  (поскольку за год  $L_k = I_k$ ). Поэтому математическое ожидание  $L_{\Sigma n}$  будет равно  $\Sigma m_k/n$ .

Если бы они были независимы, можно было бы утверждать, что их среднее значение есть СВ, распределение вероятностей которой близко к нормальному (гауссовому) распределению вероятностей (на основе основной теоремы теории вероятностей). Но они зависимы и потому предположение о нормальном распределении суммарного относительного износа за  $n$  лет следует считать упрощающим, хотя центральная теорема теории вероятностей при определенных условиях распространена и на суммы слабо зависимых СВ.

Принимая допущение, что износы за годы — независимые СВ, получаем, что дисперсия  $L_{\text{сум}}(n)$  будет равна  $D_{\Sigma n}(n) = \Sigma(\sigma_k)^2/n^2$ . Следовательно, СКО суммарного относительно износа будет равна

$$\sigma_{\Sigma n} = (1/n) \sqrt{(\sigma_1)^2 + (\sigma_2)^2 + \dots + (\sigma_n)^2}. \quad (11)$$

Итак, приведенные соотношения определяют закон распределения вероятностей для относительного износа изоляции за  $n$  лет. Если получены его числовые характеристики, то все вопросы, связанные с определением вероятности полного износа изоляции за  $n$ , решаются стандартными методами, известными из курса теории вероятностей.

Из этого следует, что необходимо обеспечить достоверное определение вероятностных характеристик износов за 1 год и изменчивости их с ростом времени, то есть выявить закономерности изменения  $m_k, \sigma_k$  с изменением  $k$ . Если  $n$  достаточно велико (более 10-15), то гипотеза о нормальном распределении  $L_{\text{сум}}(n)$  может быть признанной, что позволяет получить формулы для решения задачи об оставшемся ресурсе. В этом случае функция распределения вероятностей  $L_{\text{сум}}(n)$  выражается через функцию Лапласа

$$F_{\Sigma n}(x) = \Phi[(x - m_{\Sigma n})/\sigma_{\Sigma n}] = \Phi[(x - \Sigma m_k/n)/\sigma_{\Sigma n}], \quad (12)$$

где  $\Phi$  есть стандартный интеграл вероятностей

$$\Phi(x) = (1/2\pi) \int_{-\infty}^x \exp(-t^2/2) dt.$$

Соотношение (12) позволяет рассчитывать  $\gamma$ -процентный ресурс изоляции, то есть число лет, для которых износ изоляции с вероятностью  $\gamma$  не достигнет предельного значения  $I_{\text{пр}}$ . Зададимся  $\gamma$  (например,  $\gamma = 95\%$  или  $\gamma = 0,95$ ). Износ за  $n$  лет будет полным, если

$$nL_{\Sigma n} + I_0 \geq I_{\text{пр}}, \quad (13)$$

где  $I_0$  — износ к началу рассматриваемого периода,  $I_{\text{пр}}$  — предельно допустимый износ. Потребуем, чтобы вероятность события  $\{nL_{\Sigma n} + I_0 \geq I_{\text{пр}}\}$ , была меньше  $1 - \gamma$ . Это эквивалентно  $F_{\Sigma n}[(I_{\text{пр}} - I_0)/n] \geq \gamma$  или

$$[(I_{\text{пр}} - I_0)/n - m_{\Sigma n}]/\sigma_{\Sigma n} \geq F^{-1}(\gamma),$$

где  $F^{-1}$  есть обратная к  $F$  функция. Обозначим  $F^{-1}(\gamma) = X_\gamma$ , получаем

$$I_{\text{пр}} - I_0 \geq n m_{\Sigma n} + X_\gamma n \sigma_{\Sigma n}. \quad (14)$$

Это означает, что абсолютный средний износ за  $n$  лет плюс добавка, пропорциональная СКО за это же число лет, умноженная на число, зависящее от уровня принимаемого риска, то есть на  $X_\gamma$ , должен быть меньше запаса по износу на начало рассматриваемого периода  $I_{\text{пр}} - I_0$ .

Неравенство (14) будем решать относительно числа лет  $n$ . Это даст число лет, в течение которых износ изоляции с вероятностью не менее  $\gamma$  не достигнет предельного значения. Для этого надо подставить в него выражения для  $m_{\Sigma n}$  и  $\sigma_{\Sigma n}$ , получим

$$m_1 + m_2 + \dots + m_n + X_\gamma \sqrt{(\sigma_1)^2 + (\sigma_2)^2 + \dots + (\sigma_n)^2} \leq I_{пр} - I_0.$$

Для ответа на вопрос об оставшемся ресурсе надо найти наибольшее  $n$ , при котором выполняется это неравенство. Решается неравенство прямым перебором значений сумм, стоящих в левой части неравенства, до тех пор, пока оно не будет нарушено. Если все  $m_i$  и  $\sigma_i$  одинаковы т.е.  $m_i = m$ ,  $\sigma_i = \sigma$ , то неравенство решается аналитически в общем виде. Оно принимает вид

$$mn + X_\gamma n^{0.5} \sigma \leq I_{пр} - I_0,$$

откуда получаем

$$n^{0.5} \leq [-X_\gamma \sigma + (X_\gamma^2 \sigma^2 + 4m(I_{пр} - I_0))^{0.5}] / 2m$$

или

$$n_{\max} = [-0,5X_\gamma v + (0,25X_\gamma^2 v^2 + (I_{пр} - I_0)/m)^{0.5}]^2,$$

где  $v = \sigma/m$  — есть коэффициент вариации износа изоляции за год.

Здесь, как правило, получаются не целые числа, решение дает наименьшее целое, не превосходящее приведенное  $n$ .

Приведем без вывода формулу для  $n$  в случае, если  $I_0$  есть гауссовская СВ с математическим ожиданием  $m_0$  и СКО  $\sigma_0$

$$n_{\max}(\gamma) = [-0,5X_\gamma v + \sqrt{0,25X_\gamma^2 v^2 + (\sigma_0/\sigma)^2 + (I_{пр} - m_0)/m}]^2 - (\sigma_0/\sigma)^2.$$

В [4] дано более общее решение, когда и  $I_{пр}$  являются тоже случайной величиной.

Для расчетных примеров ниже принимаются следующие условия:  $\gamma = 0,95$ ;  $X_\gamma = 1,645$ ;  $I_{пр} = 25$  лет;  $m_0 = 18$  лет;  $\sigma_0 = 0,1m_0 = 1,8$  года;  $m$  и  $\sigma$  варьируются. Анализ табл. 1 показывает, что определяющим фактором является среднее значение износа изоляции за год. Но влияние дисперсии игнорировать нельзя.

Таблица 1

**Оставшийся ресурс R(лет) — функция МО износа за год**

Вариации годового износа $v$	Оставшийся ресурс изоляции R, лет, при среднем износе изоляции за год $m$ , лет			
	0,2	0,4	0,5	0,6
0,4	19,9	13,2	7,8	6,5
0,5	19,8	13,0	7,7	6,3
0,6	19,6	12,8	7,5	6,2
0,7	19,4	12,6	7,3	6,0
0,8	19,1	12,4	7,1	5,8
$(I_{пр} - I_0)/m$	35	17,5	14	11,7
$(I_{пр} - I_0)/(m+2\sigma)$	19,4	9,7	7,7	6,48

Представляет интерес сопоставление полученных значений ресурса с расчетными значениями по математическому ожиданию. Грубая оценка допустимой продолжительности эксплуатации как частного  $(I_{пр} - I_0)/m$  дает значение, существенно большее, чем гамма-процентный ресурс, а именно 35 вместо 19,9; 17,5 вместо 13,2; 14 вместо 7,8 и 11,7 вместо 6,5 (см.6-ю строку табл. 1). Это объясняется тем, что ресурс, соответствующий  $(I_{пр} - I_0)/m$ , дает лишь 50 %-ную гарантию недостижения полного износа (формула  $R = (I_{пр} - I_0)/m$

может быть получена также из выражения (16), если в нем положить  $X_\gamma = 0$ , что соответствует гарантии безопасности 0,5). Поэтому считать по среднему значению нельзя.

Но вместе с тем  $(I_{пр} - I_0)/m$  дает оценку сверх искомого значения, а частное  $(I_{пр} - I_0)/(m + 2\sigma) = (I_{пр} - I_0)/m(1 + 2v)$  — нижнюю оценку ресурса для малых значений  $v$ . Для  $v = 0,4$  это показано в последней строке таблицы:  $7/0,2 \cdot 1,8 = 19,4 < 19,9$ ;  $7/0,4 \cdot 1,8 = 9,7 < 13,2$ ;  $7/0,5 \cdot 1,8 = 7,77 < 7,8$ ;  $7/0,6 \cdot 1,8 = 6,48 < 6,5$ . Поэтому наряду с подробным вероятностным анализом возможны простые оценки сверху и снизу.

Но главное, конечно, в том, что при среднем износе за год меньше 0,4 проблемы с продлением срока эксплуатации по условию термической деградации целлюлозы нет: при уже отработанных 18-ти годах возможность продления оценивается согласно приведенной таблице в ~ 20 лет. Итак, главное — это уверенное прогнозирование среднегодового износа изоляции и его СКО.

Перейдем к расчетам зависимостей результатов от начального износа изоляции. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Оставшийся ресурс R(лет) как функция  $m_0$  при  $v=0,2$ ;  $m=0,6$  лет;  $\sigma_0=0,1 \cdot m_0$**

$m_0$ , лет	12	14	16	18	20	21
R, лет	18,1	14,3	10,5	6,7	2,8	0,9
$(I_{пр} - m_0)/m$ , лет	21,7	18,3	15	11,7	8,3	6,7

Здесь в клетках третьей строки приведены результаты расчета ресурса по математическим ожиданиям, а R — допустимые годы эксплуатации с гарантией безопасности  $\gamma$ .

Имеют место следующие положения.

При неглубоких начальных износах ( $m_0$  не более 18) убывание ресурса пропорционально приращению  $m_0$ , что можно показать аналитически. Это свойство может быть полезным при анализе процессов износа изоляции.

При глубоких начальных износах ( $m_0$  более 20) решение ресурсных неравенств может исчезнуть; это означает, что заданную гарантию безопасности по условию износа изоляции обеспечить в принятых условиях невозможно: чтобы получить решение, надо снижать значение  $\gamma$ .

Как видно из приведенного анализа, в данном подходе имеются возможности получения нетривиальных выводов и простых оценочных выражений. Однако разработка их далеко выходит за рамки данной работы.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Силовые трансформаторы. Справочная книга. — М.: Энергоатомиздат, 2004.
2. Электрическая часть станций и подстанций // Под ред. А.А.Васильева. — М.: Энергоатомиздат, 1990.
3. Васин В.П., Верещагин Д.В. Проблема прогнозирования расхода ресурса электротехнического

оборудования и возможности применения временных рядов // В сб. «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Вып. 56. Задачи надежности реформируемых систем энергетики и методы их решения. — Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2006.

4. Васин В.П., Долин А.П. К задаче оценки остаточного ресурса силовых маслонаполненных трансформаторов. — Новое в российской электроэнергетике, 2008, № 3.

### ВЫВОДЫ

1. Анализ опытных данных и расчеты по результатам мониторинга показывают, что учет увлажнения бумаги и окисления масла может привести к увеличению скорости старения изоляции в десятки раз.

2. Предложенное в статье обобщение формулы теплового износа изоляции с учетом влагосодержания бумажной изоляции и кислотного числа масла дает возможность в процессе эксплуатации (при мониторинге) оценивать старение изоляции с учетом этих факторов. Такой учет осуществляется посредством численного интегрирования произведения трех скоростей: относительной скорости теплового старения, относительной скорости повышения старения при увлажнении изоляции и относительной скорости повышения старения при окислении масла.

3. Выражение для повышения относительной скорости старения изоляции из-за увлажнения получены по подробным экспериментальным данным и не вызывают сомнений в обоснованности.

4. Выражение для повышения относительной скорости из-за окисления масла вследствие отсутствия числовых данных были получены качественно, но с сохранением порядка влияния. Здесь целесообразны опытные проработки для получения более корректных данных.

5. Для информационного обеспечения такой методики необходимо создание статистической базы данных о расходе ресурса за один год: при минимальных запросах — о его математическом ожидании и СКО, при максимальных требованиях — о распределении вероятностей расхода ресурса за год. При современном уровне развития информационных технологий эта задача вполне разрешима.

6. Проведенные расчеты показывают, что учет увлажнения бумаги окисления масла может полностью изменить оценку состояния изоляции, поскольку на интервалах повышенных значений влагосодержания и кислотного числа расход ресурса возрастает в десятки раз.

7. Предлагаемую методику целесообразно использовать в системе мониторинга для оценки расхода ресурса бумажной изоляции силовых трансформаторов, а также для оценки ожидаемого остаточного ресурса трансформаторов.



## Глобальная Энергия

### ОБЪЯВЛЕНЫ ИМЕНА ЛАУРЕАТОВ МЕЖДУНАРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ПРЕМИИ «ГЛОБАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ-2008»

Международный комитет по присуждению премии «Глобальная энергия» принял решение присудить Премию «Глобальная энергия-2008» следующим ученым

#### **Академику Эдуарду Волкову (Россия) и профессору Клементу Боуману (Канада)**

за теоретическое обоснование, создание и внедрение в промышленную эксплуатацию высокоэффективных технологий выработки синтетического топлива из битуминозных сланцев и нефтяных песков, восполняющих часть мировой потребности в энергоресурсах

#### **Академику Олегу Фаворскому (Россия)**

за исследование в области прикладной газовой динамики, разработку и создание газотурбинных двигателей, установок для децентрализованной электроэнергетики и высокоэффективных газоперекачивающих станций.

Международная энергетическая премия «Глобальная энергия» — награда за выдающиеся теоретические, экспериментальные и прикладные исследования, разработки, изобретения и открытия в области энергии и энергетики.

На соискание Премии в 2008 г. было допущено 182 номинационные работы. Премиальный фонд Международной энергетической премии «Глобальная энергия» в 2008 г. составил 30 млн рублей. Имена лауреатов были объявлены 16 апреля 2008 г. на специальной пресс-конференции, проведенной в пресс-центре Информационного агентства ИТАР-ТАСС. По традиции ежегодно в июне Премию вручает Президент Российской Федерации.

**Редакция журнала «ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность» сердечно поздравляет члена редакционной коллегии академика Олега Николаевича Фаворского с присуждением высокой награды и желает ему дальнейших творческих успехов на благо России.**