

УДК 303.092.5:621.317.333.4

## ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ПОЛИМЕРНОЙ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ИЗОЛЯЦИИ

З.А. Узагалиев

Показано применение вероятностной модели накопления повреждений (В-модели) в полимерной высоковольтной изоляции. Предложена методика моделирования электрофизических процессов электрического старения полимерных диэлектриков под действием напряжения.

*Ключевые слова:* диэлектрик; дендрит; модель; напряжение; изоляция; цикл нагружения; кумулятивные повреждения.

---

## PROBABILISTIC MODEL OF DAMAGE ACCUMULATION IN THE POLYMER HIGH VOLTAGE INSULATION

Z.A. Uzagaliev

It is described the use of a probabilistic model of damage accumulation (B-model) to a polymeric high voltage insulation. It is offered the modeling techniques of electro physical processes of electrical aging of polymeric insulators under the action of.

*Key words:* dielectric; dendrite; model; voltage; insulation; loading cycle; the cumulative damage.

Теория марковских цепей (процессов) широко применяется в различных прикладных задачах. Так, Дж. Богданов и Ф. Козин в своей работе [1] выполнили систематическое описание феноменологических процессов марковского типа. Они показали, что сочетание первичной статистики в виде представленных ансамблей выборочных функций реализации процесса накопления повреждений (независимо от их природы) и теории марковских цепей позволяет достаточно просто строить оригинальные, весьма содержательные и точные модели кумулятивного накопления повреждений (названные им В-моделями).

В данной работе сделана попытка использования В-модели для оценки долговечности изоляции высоковольтных конструкций. Кратко изложено основные положения и суть В-модели [1].

Кумулятивное повреждение (КП) определено как необратимое накопление повреждений в течение времени эксплуатации, которое неизбежно ведет к списанию или отказу изделия. Данное определение КП включает в себя ряд явлений, таких как коррозия, эрозия, износ, ползучесть, выносливость, рост усталостных трещин, старение полимеров, гниение, электролиз и т. п.

Для оценки надежности изделия и стойкости его жизненного цикла необходимо уметь модели-

ровать соответствующий тип КП. При построении стохастической модели КП авторы работы [1] воспользовались идеями цепи Маркова и моделью удара. Особенность модели удара заключается в том, что здесь время и повреждения дискретны. В модели предполагается:

1) процесс эксплуатации состоит из повторяющихся циклов нагружения ЦН (ЦН – это повторяющийся период функционирования изделия, в течение которого могут накапливаться повреждения). Время  $t$  измеряется числом ЦН и дискретно, т. е.  $t = 0, 1, 2, \dots$ ;

2) состояние поврежденности дискретны и обозначены через  $1, 2, \dots, j, \dots, b$  (отказ);

3) накопление повреждений в ЦН зависит только от него и от состояния повреждения в его начале;

4) повреждение за ЦН может перейти только из текущего состояния в состояние с номером, на единицу большим.

Условие постоянной жесткости ЦН означает: то, что происходит внутри одного ЦН, может происходить внутри любого другого ЦН. Условие постулирует, что повреждение рассматриваются только в начале и конце ЦН. Модель ничего не говорит о количественных аспектах того, что

происходит внутри ЦН. Таким образом, в модели интерес представляют только начала и концы циклов нагружения. Условие 3 является условием марковости, т. е. накопление повреждений ЦН зависит только от ЦН и состояния повреждения в его начале. Как достигнут это уровень поврежденности – несущественно.

При достижении состояния  $b$  происходит замена или отказ изделия; поэтому  $b$  является поглощающим состоянием и  $p_b = 1$ , при этом  $p_j = \text{Вер}\{\text{Отказ} \mid \text{в состоянии } j\}$ .

Условие 4 подразумевает, что имеется модель с единичными скачками и что остальные состояния  $1, 2, \dots, b-1$  должны быть переходящими, поскольку повреждение, покидающее одно состояние и переходящее в следующее более высокое состояние, никогда не возвращается в предыдущее состояние.

Из этих предположений вытекает, что эта версия модели КП является стационарным марковским процессом (дискретные время и состояния).

Сформулированы эти идеи в математических терминах следующим образом. Через  $D_0$  обозначена случайная величина (СВ), означающая состояние повреждения, в котором находится изделие в момент времени  $t = 0$ . Начальное распределение вероятностей  $p_0$  по состояниям повреждения при  $t = 0$  задается вектором – строкой.

$$p_0 = \{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{b-1}, 0\} P\{D_0 = j\} = \pi_j \geq 0,$$

$$\sum_1^{b-1} \pi_j = 1.$$

Здесь подразумевается: ни одно изделие не начинает эксплуатироваться в состоянии отказа, поскольку принято, что  $\pi_b = 0$ . Величины  $\pi_j$  образуют вероятностную весовую функцию (ВВФ) для  $D_0$ .

С каждым ЦН постоянной жесткости ассоциируется одна и та же матрица переходных вероятностей (МПВ)  $P$ ; согласно условию 4 переход возможен только из заданного состояния в верхнее, т. е. матрица должна иметь вид:

$$P = \begin{bmatrix} p_1 & q_2 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & p_2 & q_2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_3 & q_3 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & & & & \ddots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & p_{b-1} & q_{b-1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $0 \leq p_0 \leq p_j + q_j = 1$ ,  $p_j$  – вероятность остаться в состоянии  $j$  один шаг;  $q_j$  – вероятность перехода повреждения за один шаг из состояния  $j$  в состояние  $j+1$ . Из матрицы (1) с очевидностью вытекает, что все состояния повреждения  $1, \dots, b-1$  – переходные, а состояние  $b$  – поглощающее [1].

Граф переходов для этой матрицы показан на рисунке 1.

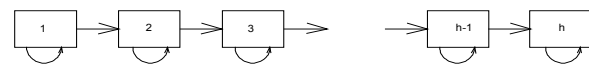


Рисунок 1 – Граф переходов

Пусть СВ  $D_t$  обозначает состояние повреждения, занятое в момент  $t$ , и

$$P\{D_t = j\} = p_t(j), j = 1, 2, \dots, b.$$

Здесь  $p_t(j) \geq 0, \sum_1^b p_t(j) = 1$ ; таким образом,  $p_t(j)$  образует МПВ  $P$  в момент  $t$  для состояний повреждения  $1, \dots, b$ . Для представления этой МПВ использовали вектор-строку

$$p_t = \{p_t(1), \dots, p_t(b)\}.$$

Опираясь на теорию марковских процессов, получено

$$p_t = p_0 P^t = p_{t-1} P, t = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

В этом выражении  $P^0 = I$ , где  $I$  – единичная матрица.

Уравнение (2) позволяет получить результаты, необходимые для определения основной вероятностной информации для модели КП, в которой наступление отказа определяется моментом перехода в состояние  $b$ . Кроме того, используя процедуру статистического моделирования, можно получить ансамбль выборочной функции.

Для построения вероятностной модели накопления повреждений в полимерной высоковольтной изоляции, по нашему мнению, особое значение имеет МПВ следующего вида:

$$P = \begin{bmatrix} + & + & 0 & 0 & 0 & + \\ 0 & + & + & 0 & \dots & 0 & + \\ 0 & 0 & + & + & & 0 & + \\ & & \vdots & & \ddots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & + & + \\ 0 & 0 & 0 & 0 & & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

с графом переходов (рисунок 2),

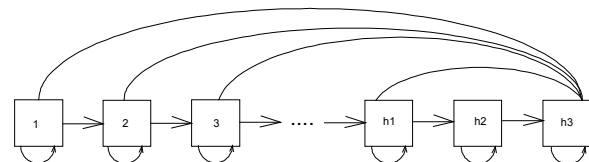


Рисунок 2 – Граф переходов

где состояния  $1, 2, 3, \dots, b-1, b-2$  – переходные, а  $b$  – поглощающее. Однако теперь разрешается совершать скачки не только в следующее состояние вверх, но и переходить из состояний  $1, 2, 3, \dots, b-2$  сразу в состояние  $b$ .

Для использования В-модели при решении поставленной задачи нужно определиться с тем, что будем в нашей задаче понимать под состоянием повреждений  $1, 2, \dots, j, \dots$ .

Вначале кажется, что наиболее простой путь – это определение состояния изоляции с помощью параметров: удельное сопротивление  $\rho$ , диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  и тангенс угла диэлектрических потерь  $\operatorname{tg}\delta$ . Но этот путь вызывает вопрос: какое из значений этих параметров принять за поглощающее состояние  $b$  (при текущем ЦН эти параметры изменяются непрерывно на относительно малое значение)?

Чтобы преодолеть эти трудности, тщательно проанализируем, какие текущие физические процессы в ходе эксплуатации приводят изоляцию в такое состояние, когда происходит мгновенное ее разрушение, т. е. пробой под воздействием действующих факторов (электрических, тепловых и механических). По современным представлениям [2], частичные разряды в твердой изоляции непосредственно обуславливают сам процесс развития разрушения, который можно представить состоящим из следующих этапов: 1) зарождение канала разрушения (зарождение дендрита); 2) прорастание канала (развитие канала); 3) образование канала высокой проводимости в дендрите, проросшего на всю толщину изоляции.

Зарождение канала разрушения (зарождение дендрита) произойдет после разрыва ряда связей материала в направлении электрического поля. В результате, в твердом диэлектрике образуется микроканал (полость), заполненный газом. Так как относительная диэлектрическая проницаемость твердого диэлектрика больше диэлектрической проницаемости газов, то напряженность поля в газовой полости будет выше, чем средняя напряженность поля в электрической изоляции. Если напряженность поля в полости достигнет электрической прочности, то произойдет разряд в газе (частичный разряд). Частичные разряды приводят к повышению у концов микроканала в твердом диэлектрике напряженности поля и температуры, что способствует ускоренному развитию разрушения (росту дендрита). Таким образом, прорастание дендрита обусловлено частичными разрядами. После того, как дендрит прорастает на всю толщину, в диэлектрике образуется газонаполненный канал малого диаметра, пробивное напряжение которого может достаточно большим. В последующие моменты времени, за счет разрушающего действия частичных разрядов, происходит разрушение канала и образование в нем высоко ионизированного газа, т. е. материала высокой проводимости. Разрушение дендрита и образование канала высокой

проводимости происходит в течение короткого промежутка времени.

Основное время при пробое твердой изоляции затрачивается на первые два этапа – зарождение и развитие дендрита. Можно считать, что диэлектрик пробит (пренебрегая третьим этапом), если дендрит пророс на всю толщину изоляции.

Таким образом, состояние разрушения определяется динамикой роста дендрита. Следовательно, за состояние разрушения можно взять количество разрушенных связей или текущую длину дендрита, а поглощающее состояние наступает, когда дендрит пронизывает всю толщину изоляции.

Для определения динамики зарождения и роста дендрита, а следовательно, и долговечности изоляции высоковольтных конструкций, с учетом специфических особенностей изоляционного материала, можно использовать подход, аналогичный описанному в [3]. Область изоляции разбивается на элементарные ячейки (рисунок 3) в форме параллелепипедов, в предположении, что в их пределах среды однородны. Производится расчет распределения напряженности электрического поля.

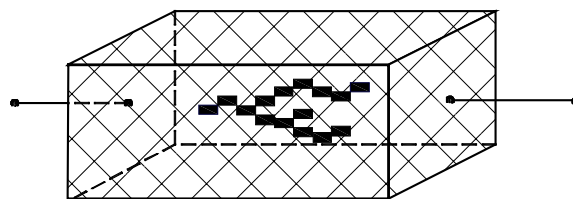


Рисунок 3 – Развитие дендритов в диэлектрике под действием напряжения

По рассчитанным уровням модуля напряженности электрического поля  $|\vec{E}|$  для каждой из элементарных ячеек определяется вероятность ее пробоя. Многие исследователи при использовании теории фракталов для моделирования пробоя твердых диэлектриков, вероятность перехода ячейки из непроводящего в проводящее состояние полагают пропорциональной напряженности электрического поля. Для того чтобы учесть экспериментальные данные, характеризующие свойства конкретного диэлектрика, вероятность пробоя  $j$ -й ячейки определяется не непосредственно по уровню  $|\vec{E}|$ , а опосредованно – через случайную величину – ее время жизни  $t_j$ , которое зависит не только от  $|\vec{E}|$ , но и от свойств диэлектрика [3]. Для нахождения  $t_j$  используется генератор случайных чисел, распределение которого совпадает с экспериментально найденным распределением времени до пробоя микрообъемов исследуемого сорта диэлектрика при рассчитанном уровне напряженности электрического поля. Принятый генератор запускается с помощью случайного числа  $K_j$ , фиксированного

для каждой ячейки. Эти числа моделируют случайное распределение диэлектрических свойств образца изоляционного материала. Из всех прогнозируемых значений величин времени жизни элементарных ячеек выбирают минимальную, а также отличающиеся от нее в пределах заданной точности счета. Величину текущего шага по времени  $\Delta t_n$  полагают равной этому минимальному времени:  $\Delta t_n = \min \{t_n\}$  (где n – номер шага по времени). Текущий момент времени определяют путем прибавления шага к предыдущему моменту времени:  $t_{n+1} = t_n + \Delta t_n$ . Ячейки, время до пробоя которых определено как минимальное, полагают перешедшими из диэлектрической фазы в фазу с большей проводимостью, что выразалось в замене соответствующих им диэлектрических проницаемостей и удельных проводимостей на другие величины, что в понятиях В-модели накопления повреждений означает переход из одного состояния в следующее. На следующем по времени шаге алго-

ритм повторяют. Таким образом, можно получить вероятностную модель накопления повреждений в полимерной высоковольтной изоляции, которую можно использовать, например, для изучения некоторых подробностей ускоренных испытаний, или применить эти модели в задачах надежности и технической эксплуатации.

#### *Литература*

1. *Богдановф Дж., Козин Ф.* Вероятностные модели накопления повреждений / пер. с англ. / Дж. Богдановф, Ф. Козин. М.: Мир, 1989. 344 с.
2. *Дмитриевский В.С.* Расчет и конструирование электрической изоляции: учеб. пособие для вузов / В.С. Дмитриевский. М.: Энергоиздат, 1981. 392 с.
3. *Резинкина М.М.* Моделирование зависимости формы дендритов в полиэтилене от уровня приложенного напряжения / М.М. Резинкина // ЖТФ. Томск, 2000. Т. 26. В. 5. С. 37–41.