

## МЕТОДЫ РАСЧЕТА ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ ОБРАЗЦА ДЛЯ ЛИНЕЙНОЙ КОММУЛЯТИВНОЙ МОДЕЛИ

Использование линейной коммулятивной модели позволяет рационально планировать эксперименты, оценивать надежность и долговечность деталей [1, 2]. В настоящей работе приводятся примеры определения времени жизни образца при произвольной временной функции воздействия.

**Аналитическое и численное решение.** Предположим, что на изоляцию воздействует напряжение, для которого экспериментально определена зависимость времени жизни от одного параметра воздействия (амплитуды, величины напряжения), т.е.  $\tau = f(U)$ . Допустим, что эта зависимость достаточно точно аппроксимируется функцией, например

$$U(\tau) = U_{\infty} + (U_0 - U_{\infty}) e^{-\alpha\tau}, \quad (1)$$

где  $\tau$  — время воздействия амплитудой (величиной)  $U(\tau)$ , которое вызывает полное разрушение образца изоляции.

При  $U \geq U_0$  образец будет пробит мгновенно после подачи напряжения; при  $U \leq U_{\infty}$  образец не будет пробит при любом времени воздействия. Уравнение (1) может быть записано в виде

$$\frac{1}{\tau} = \frac{\alpha}{\ln \frac{U_0 - U_{\infty}}{U(\tau) - U_{\infty}}}. \quad (2)$$

Для линейной коммулятивной модели  $\frac{1}{\tau}$  определяет долю разрушения при воздействии  $U(\tau)$  в течение единицы времени.

Допустим, что из опыта известна функция распределения воздействующих напряжений от времени  $U_1(t) = f(t)$ . Естественно, что в большинстве реальных задач это опытное распределение носит вероятностный характер и определено для некоторого конечного промежутка времени  $t_1$  с некоторой точностью. Положим, что эта зависимость также аппроксимирована, например

$$U_1(t) = (U_{01} - U_{\infty 1}) e^{-\beta t} + U_{\infty 1}. \quad (3)$$

Смысл этой зависимости следующий: для промежутка времени  $t_1$  длительность воздействия с амплитудой  $U_1 \geq U_1(t)$  равняется  $t$ . Если речь идет о воздействующих перенапряжениях, то распределение их по амплитудам может быть отнесено к  $t_1$  равному одному году. При рассмотрении большего числа лет все годы считаются равновероятными по перенапряжениям. При тех же условиях год можно разделить на части. Однако при делении возрас-

тает возможная ошибка, так как вероятностная кривая будет сохраняться, но отступление от нее реальных событий будет возрастать.

Для определения времени жизни образца воспользуемся условием накопления разрушения [1]. Доля разрушения образца в течение  $t_1$ :

$$y(t_1) = \int_0^{t_1} \frac{1}{\tau(U)} dt. \quad (4)$$

Подставляя (2) и (3) в (4), получим

$$y(t_1) = \int_0^{t_1} \frac{\alpha \cdot dt}{\ln \frac{U_0 - U_\infty}{(U_{01} - U_\infty)e^{-\beta t} + U_{\infty 1} - U_\infty}}. \quad (5)$$

Таким образом, для решения данной задачи надо с приемлемой точностью вычислить интеграл (5). В большинстве случаев подобные квадратуры не выражаются в аналитических функциях. Выберем оптимальный единичный промежуток  $\Delta t$  и проведем суммирование, считая, что в течение  $\Delta t_k$  амплитуда воздействия  $U_1(t_k)$  остается постоянной (рис. 1). Доля разрушения образца за время  $t_1$  выразится соотношением

$$y(t_1) = \sum_{k=1}^{k=n} \frac{1}{\tau_k} = \sum_{k=1}^{k=n} \frac{\alpha}{\ln \frac{U_0 - U}{(U_{01} - U_\infty)e^{-\beta t_k} + U_{\infty 1} - U_\infty}}, \quad (6)$$

где  $0 - t_n$  расчетный промежуток, в пределах которого воздействия еще не вызывают полного разрушения образца.

Полное разрушение образца наступит при выполнении условия [1]

$$\sum y(t_1) = 1. \quad (7)$$

При росте (уменьшении) времени воздействия по сравнению с  $t_1$  и сохранением формы кривой воздействующих напряжений доля разрушения пропорциональна времени. Откуда условие полного разрушения можно записать

$$t_p \sum_{k=1}^{k=n} \frac{\alpha}{\ln \frac{U_0 - U_\infty}{(U_{01} - U_\infty)e^{-\beta t_k} + U_{\infty 1} - U_\infty}} = 1, \quad (8)$$

где  $t_p$  – время работы образца до полного разрушения в долях  $t_1$ . Соответственно численное и аналитическое решение поставленной задачи выражается соотношениями:

$$t_p = \frac{1}{\alpha \sum_{k=1}^{k=n} \ln \frac{1}{(U_{01} - U_{\infty 1}) e^{-\beta t_{K}} + U_{\infty 1} - U_{\infty}}} \quad (9)$$

и

$$t_p = \frac{1}{\alpha \int_0^{t_1} \ln \frac{1}{(U_{01} - U_{\infty 1}) e^{-\beta t} + U_{\infty 1} - U_{\infty}} dt} \quad (10)$$

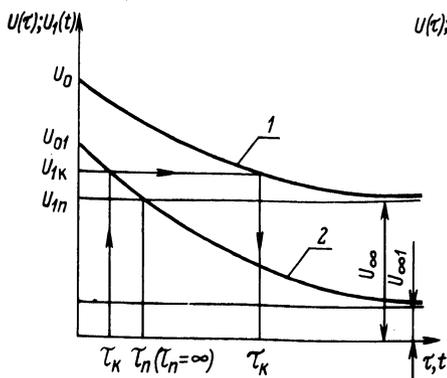


Рис. 1. К расчету времени жизни образца при заданных  $U(\tau)$  (1) и  $U_1(t)$  (2).

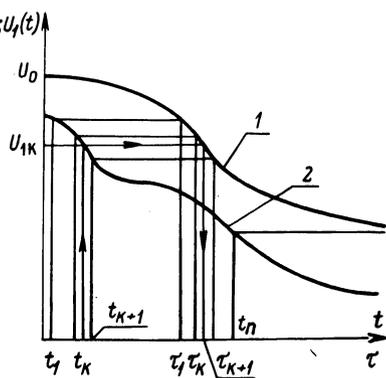


Рис. 2. Оценка времени жизни образца при графических зависимостях  $U(\tau)$  и  $U_1(t)$  — (1,2).

**Графическое решение для экспериментальных зависимостей произвольной формы.** Допустим, имеем зависимость времени жизни образца от одного параметра воздействия (амплитуды напряжения)  $\tau = f[U(\tau)]$ . Положим, что эта зависимость не имеет аналитических аппроксимаций и выражается графически. Воздействующие напряжения также даны в виде графика  $U_1(t)$  и отнесены к некоторому времени  $t_1$ . Время  $t_1$  достаточно длительно, так что форма этого графика не меняется при переходе к более длительным временам. Построим эти графики в согласованном масштабе (рис. 2).

Общее разрушение  $y(t_1)$  от суммы воздействия  $U_1(t)$ , относящихся к  $t_1$ , находится из рис. 2 прямым суммированием, т.е.

$$y(t_1) = \sum_{t_K = t_1}^{t_K = t_n} \frac{1}{\tau_K} \quad (11)$$

где  $t_k - t_{k-1} = \Delta t_k$  — единичный шаг суммирования. Зная  $y_1(t)$ , находим время  $t_p$  до полного разрушения образца в долях  $t_1$

$$y(t_1) \cdot t_p = 1; \quad t_p = \frac{1}{y(t_1)}. \quad (12)$$

Произвольный график  $U_1(t)$  может иметь смысл непрерывно меняющегося воздействия. В этом случае при согласовании масштабов  $U(\tau)$  и  $U_1(t)$  задача решается аналогично из условия

$$\begin{matrix} t_k = t_p \\ \sum \\ t_k = t_1 \end{matrix} y(t_k) = 1. \quad (13)$$

#### Л и т е р а т у р а

1. Степанчук К.Ф. Линейная коммулятивная модель разрушения и примеры ее использования при планировании и анализе испытаний образцов изоляции. — Изв. вузов. Сер. Энергетика, 1977, № 4. 2. Shiom i H. Application of Cummulative Degradation Model to Acceleration Life Test. — IEEE Transactions on Reliability, v., R-17, № 1, March, 1968.

УДК 621.317.7 (088.8)

Е.П.Гончарик, Ю.М.Куприянович

#### ИЗМЕРИТЕЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАЗЕМЛИТЕЛЯ

Для контроля электрических характеристик заземлителя необходимо измерять сопротивление заземляющего устройства, его потенциал и напряжение прикосновения (шага). Однако в настоящее время ни в СССР, ни за рубежом не производят серийного комплекта приборов, позволяющего измерить все эти параметры заземляющей системы. Более того, отсутствуют принципиальные разработки таких приборов.

В статье приводится схема прибора (рис. 1), который измеряет сопротивление заземлителей и их потенциал, потенциалы отдельных точек поверхности земли, напряжения прикосновения и шага в долях от полного потенциала.

Для получения значительных измерительных токов в качестве источника синусоидального напряжения обычно используется трансформатор собственных нужд или разделительный трансформатор со вторичным напряжением до 500 В. Однако не исключается применение маломощного генератора, подобного установленному в измерителе сопротивления заземления МС-08. Для обеспечения безопасности при измерениях с мощным источни-