



Шабловский Я.О., Киселевич В.В.

ВЕРОЯТНОСТНЫЕ АСПЕКТЫ НАДЁЖНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Предложена математическая модель отказа электрической изоляции, основанная на суперпозиции равномерного и экспоненциального законов распределения вероятностей. В рамках модели получено соотношение для временной зависимости функции интенсивности отказов изоляции, позволяющее проводить аналитическое описание надёжности на длительном интервале времени эксплуатации.

Ключевые слова: надёжность, интенсивность отказов, электрическая изоляция.

Введение

В настоящее время для количественной оценки надёжности электрической изоляции обычно используют вероятностное распределение Вейбулла-Гнеденко [1 – 3]. Между тем, это распределение применимо только к отдельным периодам эксплуатации изоляции (приработка, нормальная эксплуатация либо окончательный износ), причём у периода нормальной эксплуатации оказывается нехарактерная для «стареющих» объектов постоянная во времени интенсивность отказов.

Для оценки надёжности изоляции на длительном временном интервале применяют суперпозицию единичных законов распределения. Использование составного распределения приводит к увеличению числа его параметров, определение которых обычно сопряжено со значительными математическими трудностями. В связи с этим особую значимость приобретает выработка адекватных математических моделей [4], базирующихся на применении оптимальных вероятностных законов распределения, обеспечивающих корректное аналитическое описание надёжности изоляции на длительном временном интервале. Ниже выдвигается альтернативная математическая модель отказа электрической изоляции, основанная на сочетании равномерного и экспоненциального законов распределения вероятностей.

Теоретический анализ и его результаты

Формально рассматривая изолятор как объект, работающий до первого отказа (выхода из строя), можно охарактеризовать надёжность изоляции функцией интенсивности отказов [5, с. 10]

$$F(t) = \frac{\phi(t)}{1 - \Phi(t)}, \quad (1)$$

где t – время, $\phi(t)$ – плотность функции распределения вероятностей отказов, $\Phi(t)$ – функция распределения вероятностей отказов.

Величина $F(t)dt$ есть вероятность того, что элемент системы, имеющий наработку t , откажет в промежутке времени $[t; t+dt]$ Экспериментально интенсивность отказов

определяется как отношение приходящегося на единицу времени числа выбывших к моменту t элементов к общему числу таких элементов, сохранившихся исправными вплоть до момента t .

Отказ электрической изоляции будем рассматривать как суперпозицию внезапного отказа и постепенного отказа в результате естественного электрического износа. Прочие факторы старения изоляции мы здесь не учитываем, предполагая, что она эксплуатируется в нормальных условиях.

Идеальному внезапному отказу свойственно «отсутствие памяти»: предварительное использование устройства не влияет на остаточное время его безотказной работы. При этом наблюдается скачкообразное ухудшение свойств изоляции во времени, обусловленное резким воздействием деструктивных факторов значительной величины. В случае равномерного износа, характеризующегося постепенным ухудшением свойств изоляции, вероятность отказа равномерно возрастает со временем. Сделанное выше предположение моделирует отказ электрической изоляции наложением этих двух потоков событий: реальный отказ (при броске напряжения или ином случайном событии) тем вероятнее, чем больше изношена изоляция. Поэтому функции $\Phi(t)$ и $\phi(t)$ в формуле (1) в рассматриваемом случае выразятся линейными комбинациями соответствующих функций, относящихся к вероятностным распределениям внезапных отказов и равномерного износа.

Идеальные внезапные отказы описываются экспоненциальным распределением [6, с. 133 – 134]:

$$\phi_1(t) = t_0^{-1} e^{-t/t_0}, \quad \Phi_1(t) = 1 - e^{-t/t_0}, \quad (2)$$

где t_0 – математическое ожидание времени до внезапного отказа в заданных условиях.

Равномерный износ описывается равномерным (прямоугольным) распределением [6, с. 209]:

$$\phi_2(t) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}, & a \leq t \leq b; \\ 0, & t \notin [a, b]; \end{cases} \quad \Phi_2(t) = \begin{cases} 0, & t < a; \\ \frac{t-a}{b-a}, & a \leq t \leq b; \\ 1, & t > b. \end{cases} \quad (3)$$

В нашем случае $a=0$, что соответствует моменту ввода изоляции в эксплуатацию, $b=t_E$ – парциальное время полного износа изоляции в отсутствие внезапных отказов.

Суперпозиция вероятностных законов (2) и (3) даёт:

$$\phi(t) = \frac{c_w}{t_E} + (1 - c_w) \frac{e^{-t/t_0}}{t_0};$$

$$\Phi(t) = \frac{c_w t}{t_E} + (1 - c_w)(1 - e^{-t/t_0}), \quad (4)$$

где множитель c_w определяет долевым вклад равномерного износа при заданных условиях эксплуатации. Подставляя выражения (4) в формулу (1), окончательно получаем соотношение

$$F(t) = \frac{c_w + (1 - c_w) \frac{t_E}{t_0} e^{-t/t_0}}{t_E [1 + (1 - c_w)(e^{-t/t_0} - 1)] - c_w t}, \quad (5)$$

позволяющее моделировать реальные отказы эксплуатируемой электрической изоляции. Принимая во внимание, что $F(t)|_{t \rightarrow \bar{t}} \rightarrow \infty$, из выражения (5) можно определить время до отказа изоляции:

$$\bar{t} = t_E \left(1 + \frac{1 - c_w}{c_w} e^{-\bar{t}/t_0} \right).$$

При $\bar{t}/t_0 \geq 8$ с погрешностью менее 1,5% можно считать, что $\bar{t} \approx t_E$.

График функции (5) имеет «жёлобообразный» вид (см. рис. 1). На нём отчётливо выделяются три временных интервала: период приработки I, период нормальной эксплуатации II и период окончательного износа III.

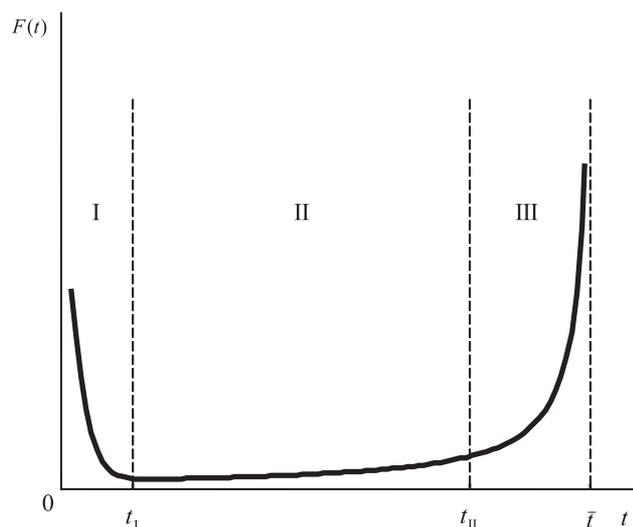


Рис. 1. Функция интенсивности отказов

В промежутке I интенсивность отказов стремительно убывает со временем. Длительность этого периода небольшая и определяется качеством изготовления изоляции [7]. В подавляющем большинстве случаев этот период не реализуется на практике вследствие того, что приработка изоляции может быть связана только с явлением «выжигания», т.е. выбраковывания изначально дефектных образцов изоляции, имеющих заведомо более низкую долговечность по сравнению с оставшимися в работе образцами [3, с. 54].

Промежуток II соответствует нормальной эксплуатации и характеризуется слабо возрастающей интенсивностью отказов. В начале эксплуатации $F(t)$ практически постоянна, в то время как по мере увеличения t интенсивность отказов возрастает, что указывает на развитие постепенных отказов, обусловленных естественным старением.

Временной промежуток III соответствует окончанию срока службы электрической изоляции: интенсивность её отказов стремительно возрастает со временем. Резкое ухудшение физико-химических свойств изоляции обу-

словлено интенсификацией процессов старения и износа. Эксплуатация изоляции на данном этапе недопустима.

По сравнению с классическим распределением Вейбулла-Гнеденко предложенное нами распределение обладает двумя преимуществами:

1) Охвачен весь срок эксплуатации электрической изоляции.

2) Период нормальной эксплуатации имеет естественную для “нормально стареющих” объектов плавную возрастающую интенсивность отказов.

На рис. 2 зависимости $F(t)$, рассчитанные по формуле (5) для силовых кабелей среднего напряжения, сопоставлены с экспериментальными данными [8, 9].

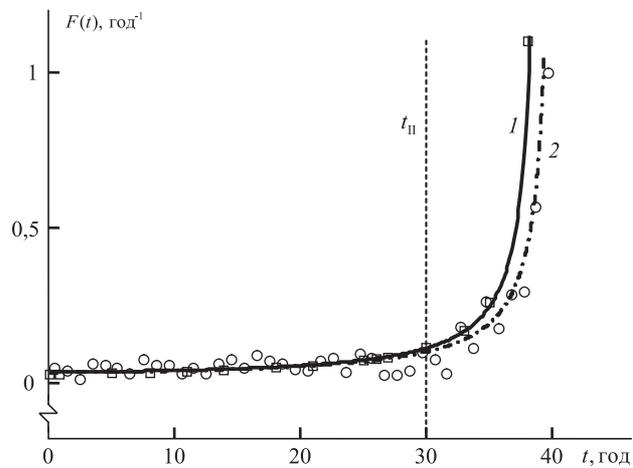


Рис. 2. Временные зависимости функции интенсивности отказов:

□□□ — силовых кабелей [8];
 ○○○ — изоляции силовых кабелей [9]

Расчёты проводились при следующих значениях: $c_w = 0,89$, $t_0 = 10$ лет, $t_E = 39$ лет, $\bar{t} = 39,097$ лет (для зависимости 1) и $c_w = 0,872$, $t_0 = 13$ лет, $t_E = 40$ лет, $\bar{t} = 40,265$ лет (для зависимости 2). Максимальное расхождение теоретических расчётов с экспериментальными данными в первом случае составило 0,135%, во втором случае — 6,344%.

Сравнительно большие значения параметра c_w указывают на преобладание равномерного износа изоляции над внезапными отказами. В обоих случаях период приработки отсутствует, а период нормальной эксплуатации составляет 30 лет. Среднее значение интенсивности отказов кабелей для периода нормальной эксплуатации составляет 0,05 год⁻¹.

Заключение

Предложена математическая модель отказа электрической изоляции, основанная на суперпозиции равномерного и экспоненциального законов распределения вероятностей. В рамках модели получены аналитические соотношения для расчёта основных количественных показателей надёжности изоляции: функции распределения вероятностей отказов, плотности этой функции и

функции интенсивности отказов. Применение выражения для интенсивности отказов электрической изоляции обеспечивает корректное аналитическое описание её надёжности на длительном временном интервале.

Литература

1. Гнеденко Б.В. Математические методы в теории надёжности / Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьев. — Москва: Наука, 1965. — С. 102–103.
2. Murthy D.N.P. Weibull models / D.N.P. Murthy, M. Xie, R. Jiang. — Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2004. — P. 9–10.
3. Фокин Ю.А. Оценка надёжности систем электроснабжения / Ю.А. Фокин, В.А. Туфанов. — Москва: Энергоиздат, 1981. — 224 с.
4. Ушаков И.А. О важности адекватных математических моделей при инженерном анализе надёжности / И.А. Ушаков // Надёжность. — 2011. — № 3 (38). — С. 2–14.
5. Ушаков И.А. Курс теории надёжности систем / И.А. Ушаков. — Москва: Дрофа, 2008. — 239 с.
6. Вадзинский Р.Н. Справочник по вероятностным распределениям / Р.Н. Вадзинский. — Санкт-Петербург: Наука, 2001. — 295 с.
7. Прохоров А.В. Критерии надёжности систем изоляции электрических машин. Выбор оптимального варианта системы изоляции / А.В. Прохоров // Надёжность. — 2012. — № 3 (42). — С. 80–88.
8. Коржов А.В. Метод оценки значимости влияния проектных и эксплуатационных факторов на срок службы изоляции силовых кабелей 6 (10) кВ городских электрических сетей / А.В. Коржов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. «Энергетика». — 2014. — Т. 14, № 1. — С. 31–34.
9. Юрченко Е.Ю. Статистические показатели надёжности элементов кабельных линий напряжением 6–10 кВ / Е.Ю. Юрченко, А.В. Коржов // Современные техника и технологии: материалы XIV междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных, г. Томск, 24–28 марта 2008 г. / Томский политехнический университет. — г. Томск, 2008. — Т. 1. — С. 123–125.

Перечень принятых в статье условных обозначений

- c_w — множитель, определяющий долевым вклад равномерного износа;
 $F(t)$ — функция интенсивности отказов;
 $f(t)$ — плотность функции распределения вероятностей отказов;
 $\Phi(t)$ — функция распределения вероятностей отказов;
 t — время;
 t_0 — математическое ожидание внезапного отказа в заданных условиях;
 t_1 — время приработки изоляции;
 t_{II} — время нормальной эксплуатации изоляции;
 t_E — парциальное время полного износа изоляции в отсутствие внезапных отказов;
 \bar{t} — время до отказа изоляции.