

*В.А. Пономарев*

(Национальный университет гражданской защиты Украины; e-mail: vap5@ua.fm)

## **МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ И ПРОГНОЗА ИХ ДАЛЬНЕЙШЕГО СРОКА СЛУЖБЫ**

*Разработана методика оценки эксплуатационного состояния изоляции кабельных линий, прогнозирования значений сопротивления изоляции на последующий срок эксплуатации, срока достижения изоляцией кабельных изделий критического состояния эксплуатации.*

*Ключевые слова: кабельное изделие, срок эксплуатации.*

*V.A. Ponomarev*

## **METHODOLOGY TO EVALUATE THE OPERATIONAL CONDITION OF THE INSULATION OF CABLE LINES AND PREDICTING ITS FUTURE LIFE**

*The methodology to evaluate the operational condition of the insulation of cable lines, forecast the values of resistance of isolation on the subsequent term of exploitation, the prognosis of term of achievement the isolation of cable wares of critical condition was developed.*

*Key words: cable goods, term of exploitation.*

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 24 марта 2015 г.

### **Введение**

Эксплуатация *кабельных изделий (КИ)* со временем приводит к старению изоляции его жил и оболочки. Это вызывает ухудшение электрозащитных свойств изоляции и является предпосылкой аварийных режимов работы КИ, что может привести к короткому замыканию и возникновению источника зажигания. Поэтому прогнозирование состояния работоспособности изоляции на дальнейший срок эксплуатации после периодических испытаний является актуальным для снижения вероятности возникновения пожара.

Согласно нормативным требованиям [1], предотвращение появления источника зажигания достигается поддержанием температуры нагрева поверхности материала ниже предельно допустимой, что составляет 80 % наименьшей температуры самовоспламенения материала. Для профилактики возникновения короткого замыкания изоляции КИ проводится её периодическая диагностика, в том числе замер сопротивления изоляции [2]. Сопротивление изоляции является доминирующей характеристикой, так как на срок службы изоляции с ПВХ пластиката в большей степени влияет электрическое старение [3].

## Результаты

Для предупреждения неожиданного выхода из строя изоляции КИ, в рамках классической модели регрессии [4] построим модель зависимости сопротивления изоляции КИ от времени эксплуатации для кабеля марки АВВГ 4×10. Начинаем с линейной модели:

$$R(t) = a_0 + a_1 \cdot t, \quad (1)$$

где  $R$  – сопротивление изоляции – определяющий параметр;

$t$  – время;

$a_0, a_1$  – коэффициенты (параметры) регрессии.

Неизвестные коэффициенты  $a_i$  (коэффициент  $a_0$  необходим для учёта всех неизвестных факторов, которые не учтены в модели, например, температура, влажность и т.д.) подлежат определению или статистической оценке. Эту оценку наиболее удобно проводить методом наименьших квадратов [4].

В каждой точке, в которой проводились измерения параметров, нужно минимизировать сумму квадратов отклонения теоретической кривой (1) от экспериментальных значений:

$$\sum_{i=1}^k (R_i - a_0 - a_1 \cdot t)^2 = F(a_0, a_1) \rightarrow \min, \quad (2)$$

где  $R_i$  – значение замеров сопротивления изоляции в  $i$  экспериментальных точках;

$k$  – количество экспериментальных точек ( $k = 9$ , в которых по 4-е значения случайной величины  $R_{ik}$  (4-е жилы)).

Опуская детальные вычисления методом наименьших квадратов, для марки АВВГ 4×10 получены  $a_0 = 233,254$ ,  $a_1 = -23,04$ .

После получения коэффициентов регрессии проводим оценку их значимости. Это оценка выполняется с использованием критерия Стьюдента [5]. Коэффициент считается значимым, если выполняется неравенство:

$$|a_i| \geq \Delta = t_{kr} \cdot \sqrt{\frac{S_y^2}{N}}, \quad (3)$$

где  $\Delta$  – интервал значимости;

$S_y^2$  – дисперсия воспроизведения, стандартная ошибка опыта;

$N$  – количество экспериментальных значений;

$t_{kr}$  – критическое значение критерия Стьюдента (табличная величина  $t_{kr}(\alpha, N) = t_{kr}(0,05, 36) = 2,028$ ).

Результаты следующие: модуль коэффициента регрессии  $a_0 = 233,254$ , модуль коэффициента регрессии  $a_1 = 23,04$ , интервал значимости  $\Delta = 14,649$ .

Учитывая условие (3), сделаем вывод, что коэффициенты регрессии  $a_0$  и  $a_1$  значимы.

Линейная модель зависимости сопротивления изоляции кабельного изделия от времени эксплуатации  $R(t)$  будет иметь вид:  $R(t) = 233,254 - 23,04 \cdot t$ .

Проверку адекватности модели осуществляем с использованием критерия Фишера [5]. Адекватность модели обоснована, если выполняется неравенство:

$$F = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_y^2} \leq F_{kr}(\alpha; f_{\text{ад}}; f_y). \quad (4)$$

где  $F$  – значение критерия Фишера;

$S_{\text{ад}}^2$  – дисперсия адекватности;

$F_{kr}$  – критическое значение критерия Фишера (определяется из таблиц при уровне значимости  $\alpha$ );

$f_{\text{ад}} = N - p - 1$  – число степеней свободы дисперсии адекватности;

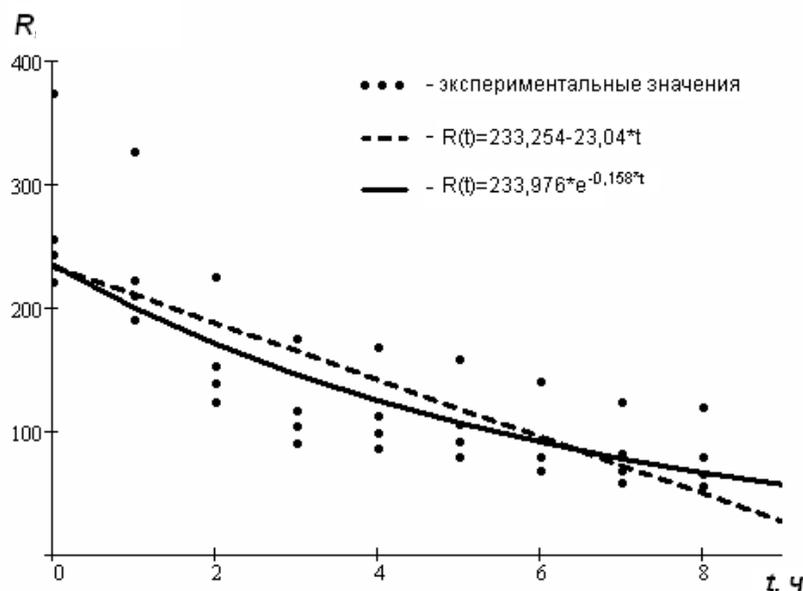
$p$  – количество коэффициентов в модели (для линейной модели  $p = 2$ :  $a_0, a_1$ );

$f_y$  – число степеней свободы дисперсии воспроизведения.

По результатам расчётов дисперсия адекватности  $S_{\text{ад}}^2 = 201,360$ , а значение критерия Фишера  $F = 0,1072$ . Критическое значение критерия Фишера равняется  $F_{kr}(0,05; 36-2-1; 9) = 2,85$ .

Так как выполняется условие критерия Фишера  $F \leq F_{kr}$ , то гипотеза об адекватности линейной модели принимается.

Однако, из экспериментальных значений (рис. 1) видно, что значения сопротивления изоляции лежат не на прямой линии. Это говорит о том, что скорость изменения значений сопротивления изоляции со временем изменяется, поэтому возникает вопрос о том, удовлетворяет ли нас линейная модель графически.



**Рис. 1.** Показательная и линейная модели зависимости сопротивления изоляции от времени эксплуатации с наложением на экспериментальные точки для кабеля марки АВВГ 4×10

Можно откорректировать модель, задавая её в виде показательной функции. Поэтому возьмем уточненную модель в виде:

$$R(t) = a_0 \cdot e^{a_1 t}. \quad (5)$$

После определенных вычислений значения коэффициентов регрессии для показательной модели  $a_0 = 233,976$ ,  $a_1 = -0,158$ .

Показательные уравнения для исследуемой марки кабеля  $R(t) = 233,976 \cdot e^{-0,158t}$ .

Дисперсия адекватности  $S_{ад}^2 = 117,919$ , а значение критерия Фишера  $F = 0,0628$ . Критическое значение критерия Фишера  $F_{кр}(0,05; 36-2-1; 9) = 2,85$ .

Поскольку для кабеля выполняется условие критерия Фишера  $F \leq F_{кр}$ , то гипотеза об адекватности показательной модели принимается.

Из приведенной зависимости (рис. 1) видно, насколько лучше показательная модель аппроксимирует экспериментальные данные. Поэтому принимаем за математическую модель зависимости сопротивления изоляции от времени эксплуатации показательную зависимость.

На основании полученной аналитической зависимости можно прогнозировать значение сопротивления изоляции на последующее время. Кроме того, из обратных зависимостей прогнозируется срок эксплуатации до достижения критического значения  $0,5 \text{ МОм}$ .

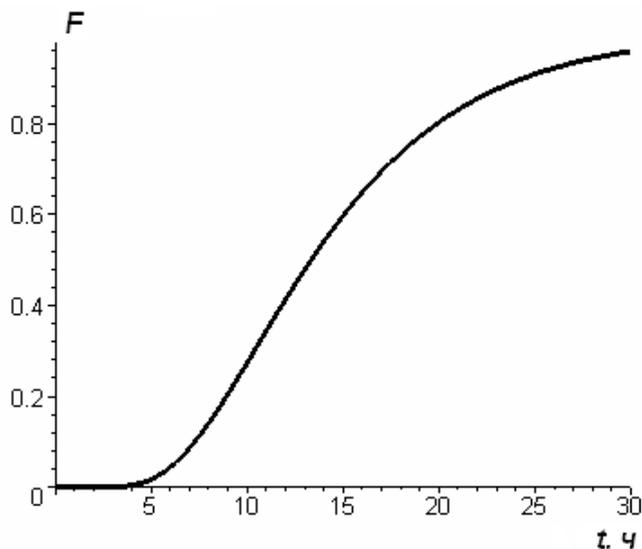
Также разработан порядок определения вероятности достижения изоляционным материалом КИ критического состояния, то есть достижения критического значения сопротивления изоляции  $0,5 \text{ МОм}$ . Для этого использованы распределения моделей отказов [6]: экспоненциальное, логарифмически-нормальное, Вейбулла,  $\alpha$ -распределение, диффузионно-монотонное и диффузионно-немонотонное.

Для выбора функции распределения по определению вероятности достижения изоляцией КИ критического состояния, статистика по каждой жиле проверена на соответствие по критерию согласия Пирсона по каждой из предложенных функций распределений моделей отказов. Выдвигались гипотезы о том, что генеральная совокупность распределена по соответствующему закону распределения.

После проведения проверки в соответствии с критерием согласия Пирсона на гипотез о том, что значения замеров сопротивления изоляции распределены по одной из функций моделей отказов, получены соответствующие условию критерия Пирсона  $\chi_{теор}^2 < \chi_{кр}^2$  функции отказов.

Для некоторых жил условие критерия Пирсона выполняется по нескольким распределениям одновременно. Выбрано то распределение, теоретическое значение критерия Пирсона которого наименьшее.

Пример графического отображения зависимости вероятности достижения изоляцией КИ критического значения от времени ускоренных испытаний для жилы № 1 кабеля марки АВВГ 4×10, распределенной по диффузионно-монотонному распределению, приведен на рис. 2.



**Рис. 2.** Зависимость вероятности достижения изоляцией кабельного изделия критического значения от времени ускоренных испытаний на примере жилы № 1 кабеля марки АВВГ 4×10

Из полученных распределений моделей отказов легко находятся значения вероятности достижения изоляцией КИ критического значения.

На основании рассмотренного выше предложена методика, которая по своей сути обеспечивает оценку эксплуатационного состояния изоляции КИ. Для оценки эксплуатационного состояния кабельной линии по разработанной методике нужны данные как минимум из трех протоколов периодических испытаний по измерению сопротивления изоляции (три точки сопротивления изоляции в зависимости от времени эксплуатации дают возможность получить аналитические функции аппроксимации).

Данная методика прошла апробацию при выполнении научно-исследовательской работы на тему: "Разработка рекомендаций по определению сроков пожаробезопасной эксплуатации кабельно-проводниковой продукции на участках Холодногорско-заводской линии Харьковского метрополитена". В рамках выполнения научно-исследовательской работы получен прогноз пожаробезопасной эксплуатации для определенных заказчиком участков кабельных линий.

## Выводы

Разработанная методика на основании периодических плановых замеров сопротивления изоляции позволяет неdestructивным способом оценить эксплуатационное состояние изоляции кабельной линии, предоставить прогноз значений сопротивления изоляции на дальнейшую эксплуатацию, получить прогноз срока достижения изоляцией кабельного изделия критического состояния эксплуатации и определить значение вероятности достижения данного состояния.

Предложенный подход позволяет прогнозировать дальнейшие изменения электрозащитных свойств изоляции.

## Литература

1. ГОСТ 12.1.004-91. Пожарная безопасность. Общие требования.
2. *Правила* технической эксплуатации электроустановок потребителей. Х.: изд-во "Форт", 2003. 264 с.
3. *Сканави Г.И.* Физика диэлектриков (Область сильных полей). М.: гос. изд. физ.-мат. лит., 1958. 907 с.
4. *Вентцель Е.С., Овчаров Л.А.* Теория вероятностей. М.: Высшая школа, 1999. 576 с.
5. *Большев Л.Н., Смирнов Н.В.* Таблицы математической статистики. К.: "Наука", 1965. 465 с.
6. ДСТУ 3433-96 (ГОСТ 27.005-97). Надёжность техники. Модели отказов. Основные положения.