

УДК 621.315.61

ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ СТАРЕНИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЕЙ И ПРОВОДОВ

Я. О. ШАБЛОВСКИЙ, кандидат физико-математических наук, доцент
В. В. КИСЕЛЕВИЧ, аспирант

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Предложена методика оценки технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса электрической изоляции кабелей и проводов. Методика предусматривает измерение значений активного сопротивления электрической изоляции, пересчет полученных значений сопротивления на унифицированные размеры изоляционного фрагмента и нормированную температуру, сравнение полученных значений с критериальным значением и последующий расчет остаточного ресурса изоляции. Применение методики способствует предупреждению чрезвычайных ситуаций, обусловленных износом изоляции кабелей и проводов.

Ключевые слова: пожароопасность, электротехнический объект, электроизоляция.

Введение

Пожароопасность электротехнического объекта определяется двумя факторами. Во-первых, такой объект содержит большое количество горючих изоляционных материалов. Во-вторых, в аварийном режиме высока вероятность возникновения внутреннего источника зажигания (искры, дуги, нагретые электрическим током детали) [1]. Наиболее высокой пожароопасностью обладают кабельные изделия (кабели и провода), на долю которых приходится свыше 60 % случаев аварий на электротехнических объектах [1]–[3].

Переход кабельного изделия в аварийное состояние обуславливается снижением сопротивления электрической изоляции ниже минимально допустимого порогового значения. Основными причинами снижения сопротивления электрической изоляции являются ее старение и физический износ. В связи с этим особую значимость приобретает разработка методов оценки состояния и прогнозирования долговечности электрической изоляции.

Ниже предлагается методика оценки технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса полимерной электрической изоляции кабелей и проводов.

Основная часть

В процессе эксплуатации электрическая изоляция непрерывно подвергается воздействию деструктивных факторов, обуславливающих ее износ и старение. Мгновенная интенсивность совокупного воздействия этих факторов является случайной величиной, вследствие чего имеющимися на современном этапе средствами весьма сложно предсказать срок службы кабеля (здесь, как обычно [4], под сроком службы понимают календарную продолжительность промежутка времени от начала эксплуатации объекта или ее возобновления после ремонта до его перехода в предельное (аварийное) состояние).

В качестве основного диагностического параметра, определяющего техническое состояние электрической изоляции, целесообразно использовать ее активное сопротивление. Такой выбор обусловлен следующими факторами:

1) активное сопротивление электрической изоляции кабелей и проводов является нормированной величиной, пороговое (предельно допустимое) значение которой установлено соответствующими нормативно-техническими документами;

2) активное сопротивление электрической изоляции сохраняет свои характеристики и свойства при переходе от экспериментальных образцов к строительным длинам кабелей и проводов;

3) величина активного сопротивления является интегральной характеристикой состояния электрической изоляции;

4) активное сопротивление электрической изоляции кабелей и проводов легко измерить.

Ухудшение эксплуатационных характеристик полимерной изоляции является результатом разрушения химических связей между углеводородным остовом и функциональными группами [5]. Процессы разрушения химических связей приводят к образованию нерастворимых низкомолекулярных веществ и полярных продуктов окисления полимера и, как следствие, к увеличению общей концентрации носителей заряда. Исходя из этого, будем полагать, что временная зависимость $\sigma(t)$ электропроводности полимерной изоляции определяется временной зависимостью $x(t)$ концентрации носителей заряда, причем

$$dx = axdt, \quad (1)$$

где a – коэффициент пропорциональности. Подставляя (1) в общее уравнение электропроводности [6]:

$$\sigma = qx\mu, \quad (2)$$

получим выражение для временной зависимости электропроводности изоляции:

$$\sigma(t) = q\mu x_0 \exp(at). \quad (3)$$

Здесь $q = ze$ – заряд иона с валентностью z ; e – элементарный заряд; μ – подвижность носителей заряда; x_0 – концентрация носителей заряда в начальный момент времени $t = 0$. Отсюда для электрического сопротивления R получаем:

$$R(t) = R_0 \exp(-at), \quad (4)$$

где $R_0 = (q\mu x_0)^{-1}$ – сопротивление электрической изоляции в начальный момент времени, соответствующий вводу кабельного изделия в эксплуатацию.

Обозначим \bar{R} – минимально допустимое пороговое значение сопротивления: по достижении значения $R = \bar{R}$ изоляция вырабатывает свой ресурс. Момент времени $t = t_f$, когда сопротивление становится равным \bar{R} , отождествим с фактическим сроком службы электрической изоляции. Это позволяет определить коэффициент a :

$$a = \frac{\ln(R_0/\bar{R})}{t_f}. \quad (5)$$

Подставляя (5) в (4), получим выражение, описывающее снижение активного сопротивления электрической изоляции со временем t :

$$R(t) = R_0 \left(\frac{R_0}{\bar{R}} \right)^{-t/t_f} \quad (6)$$

Уравнение (6) позволяет рассчитать значение сопротивления изоляции R в любой момент времени t и составляет теоретическую основу предлагаемой методики.

Значения начального (R_0) и минимально допустимого (\bar{R}) сопротивлений для данного кабельного изделия, находящегося в данных условиях эксплуатации, являются постоянными. Фактический срок службы t_f электрической изоляции кабельного изделия, наоборот, не является константой ввиду того, что реальные условия эксплуатации (токовые нагрузки, температура и т. д.) подвержены непрерывным стохастическим отклонениям от номинальных условий. Влияние и последствия этих отклонений можно учесть усредненно, воспользовавшись предложенным уравнением (6). Именно, подставив в уравнение (6) значения R_0 и \bar{R} , а также величину R_{t_3} сопротивления электрической изоляции, измеренного в момент контроля ее технического состояния ($t=t_3$), можно определить величину t_f фактического срока службы электрической изоляции в данных условиях эксплуатации:

$$t_f = t_3 \frac{\ln(\bar{R}/R_0)}{\ln(R_{t_3}/R_0)} \quad (7)$$

Остаточный ресурс электрической изоляции, эксплуатировавшейся в течение времени t_3 , определяется из выражения

$$\Delta t_f = t_f - t_3 \quad (8)$$

Достоверность оценки остаточного ресурса Δt_f на основе уравнений (7) и (8) обеспечивается тем, что значение t_f определяется по величине R_{t_3} , которая наиболее полно характеризует общую степень изношенности изоляции на момент диагностирования и отражает совокупное влияние воздействующих на нее «старящих» факторов.

Любое отклонение реальных условий эксплуатации от номинальных условий приводит к ускоренному либо замедленному износу электрической изоляции. Количественной характеристикой такого отклонения может служить безразмерный параметр:

$$v = \frac{t_N}{t_f} \quad (9)$$

где t_N – нормативный срок службы электрической изоляции*. В зависимости от значения параметра v , характеризующего относительную скорость износа электрической изоляции, можно выделить нормальный износ ($v = 1$), ускоренный износ ($v > 1$) и за-

* В нормативно-технической документации вместо срока службы электрической изоляции приводят значение срока службы кабельного изделия. Состояние электрической изоляции определяет техническое состояние и, как следствие, степень пожароопасности кабельного изделия в целом. Поэтому нормативный срок службы электрической изоляции полагаем равным нормативному сроку службы кабельного изделия.

медленный износ ($\nu < 1$). В качестве иллюстрации на рисунке 1 представлены характерные временные зависимости электрического сопротивления изоляции в процессе износа и старения кабельного изделия.

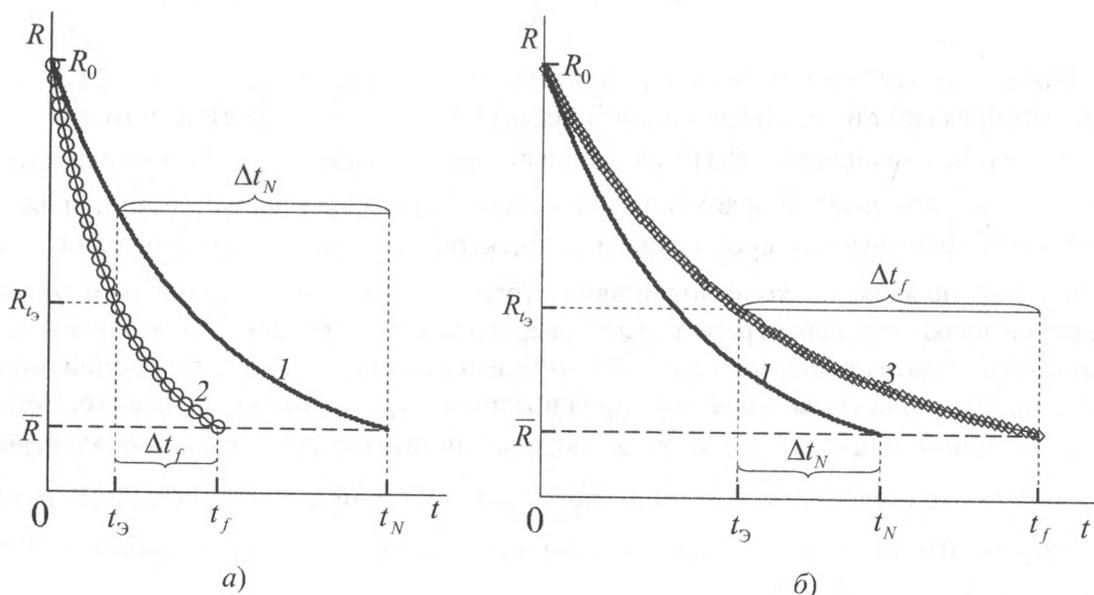


Рисунок 1 – Временные зависимости активного сопротивления электрической изоляции

Кривые 1 на рисунке 1, а, б соответствуют нормальному износу ($\nu = 1$), характерному для электрической изоляции, работающей в номинальном режиме. В этом случае фактический срок службы электрической изоляции кабельного изделия равен нормативному сроку службы. Разность между временем эксплуатации t_3 (отрезки 0– t_3 на рисунке 1, а, б) и нормативным сроком службы t_N (отрезки 0– t_N на рисунке 1, а, б) дает значение нормативного остаточного ресурса Δt_N (отрезки t_3 – t_N на рисунке 1, а, б).

В реальных условиях скорость износа всегда отлична от номинальной ($\nu \neq 1$).

Случаи ускоренного ($\nu > 1$) и замедленного ($\nu < 1$) износа электрической изоляции отображены на рисунках 1, а (кривая 2) и 1, б (кривая 3), соответственно. Ускоренный износ характерен для электрической изоляции, работающей в неблагоприятных условиях (перенапряжения, превышение длительно допустимой температуры токопроводящих жил, деструктивное воздействие окружающей среды и т. д.). При этом фактический срок службы электрической изоляции кабельного изделия меньше нормативного срока службы. Замедленный износ характерен для электрической изоляции, работающей в благоприятных условиях (небольшие токовые нагрузки, невысокая температура токопроводящих жил, незначительные механические воздействия и т. д.). При этом фактический срок службы электрической изоляции кабельного изделия больше нормативного срока службы. Разность между временем эксплуатации t_3 (отрезки 0– t_3 на рисунке 1, а, б) и фактическим сроком службы t_f (отрезки 0– t_f на рисунке 1, а, б) дает фактическое значение остаточного ресурса Δt_f (отрезки t_3 – t_f на рисунке 1, а, б).

Эксплуатация кабельного изделия в номинальном режиме означает снижение его сопротивления с номинальной скоростью. Ухудшение условий эксплуатации приводит к

увеличению скорости износа, а следовательно, и скорости снижения сопротивления, что выражается в увеличении наклона номинальной кривой I на временной зависимости и ее смещением в сторону меньших сроков службы (кривая 2 на рисунке 1, а). В случае улучшения эксплуатационных условий процессы износа замедляются, что приводит к уменьшению скорости снижения сопротивления, выражаемому в уменьшении наклона кривой I на временной зависимости, и ее смещением в сторону больших сроков службы (кривая 3 на рисунке 1, б).

Приведем пример использования предлагаемой методики и оценим остаточный ресурс одножильного силового кабеля марки ВВГ на напряжение 6 кВ.

Исходные данные об основных характеристиках электрической изоляции, заимствованные из технической документации на кабельное изделие: время эксплуатации электрической изоляции $t_3 = 3$ года; нормативный срок службы электрической изоляции $t_N = 30$ лет [7]; начальное значение активного сопротивления фрагмента поливинилхлоридной изоляции, измеренное при вводе кабеля в эксплуатацию при температуре окружающей среды и пересчитанное на унифицированные размеры (длину – 1 км) и нормированную температуру (20 °C), составляет $R_0 = 700$ МОм · км; минимально допустимое значение активного сопротивления фрагмента изоляции, пересчитанное на унифицированные размеры фрагмента (длину – 1 км) и нормированную температуру (20 °C), составляет $\bar{R} = 50$ МОм · км [7].

Последовательность расчета ресурсных характеристик электрической изоляции следующая.

1 Выбирают фрагмент изолированной жилы кабеля длиной $l = 0,01$ км.

2 Мегаомметром с выходным напряжением 2500 В измеряют активное сопротивление $R_{изм}$ этого фрагмента при температуре окружающей среды $T = 25$ °C.

3 В соответствии со стандартом [8] пересчитывают измеренное значение $R_{изм} = 23800$ МОм на унифицированные размеры фрагмента (длину 1 км) и нормированную температуру (20 °C):

$$R_{t_3} = k_T R_{изм} l = 2,1 \cdot 23800 \cdot 0,01 = 500 \text{ МОм} \cdot \text{км},$$

где $k_T = 2,1$ – коэффициент приведения электрического сопротивления изоляции к температуре 20 °C [8].

4 Устанавливают соответствие технического состояния контролируемого изоляционного фрагмента нормативным требованиям посредством сравнения значения R_{t_3} с критериальным значением \bar{R} . При $R_{t_3} < \bar{R}$ изоляция полностью изношена и непригодна к дальнейшей эксплуатации; при $R_{t_3} > \bar{R}$ изоляция находится в работоспособном состоянии. Так как $500 \text{ МОм} \cdot \text{км} > 50 \text{ МОм} \cdot \text{км}$, делают вывод о нахождении изоляции в работоспособном состоянии и проводят дальнейший расчет ее ресурсных характеристик.

5 Определяют значение фактического срока службы электрической изоляции кабеля по формуле (7):

$$t_f = 3 \frac{\ln(50/700)}{\ln(500/700)} \approx 23,53 \text{ года}.$$

6 Находят остаточный ресурс электрической изоляции кабеля по формуле (8):

$$\Delta t_f = 23,53 - 3 = 20,53 \text{ года.}$$

7 По формуле (9) определяют относительную скорость износа электрической изоляции кабеля на временном интервале $[0; t_3]$:

$$v = \frac{30}{23,53} \approx 1,275.$$

8 Определяют степень износа, характеризующую относительное сокращение срока службы электрической изоляции за время эксплуатации t_3 :

$$w = \frac{t_3}{t_f} 100 \% = \frac{3}{23,53} 100 \% \approx 12,75 \%.$$

Результаты расчета позволяют сделать следующие выводы. Диагностируемый кабель эксплуатируется в неблагоприятных условиях и подвержен ускоренному износу ($v \approx 1,275 > 1$). Для обеспечения безопасной и надежной эксплуатации данного кабеля необходимо предусмотреть мероприятия, направленные на нормализацию («смягчение») условий эксплуатации, например, минимизировать деструктивное воздействие окружающей среды, снизить уровень перенапряжений и т. д.

Заключение

Предложена методика оценки технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса электрической изоляции кабелей и проводов. Методика предусматривает выбор подлежащего контролю изоляционного фрагмента, измерение значения активного сопротивления выбранного изоляционного фрагмента, пересчет полученного при измерении значения сопротивления на унифицированные размеры изоляционного фрагмента и нормированную температуру, установление соответствия диагностируемого изоляционного фрагмента нормативным требованиям посредством сравнения значения его пересчитанного сопротивления с критериальным значением и последующий расчет остаточного ресурса изоляции. Предложенная методика позволяет осуществлять своевременное предупреждение чрезвычайных ситуаций техногенного характера, обусловленных износом изоляции кабелей и проводов.

Литература

- 1 Смелков, Г. И. Пожарная безопасность электропроводок / Г. И. Смелков. – М. : КАБЕЛЬ, 2009. – С. 21–94.
- 2 Черкасов, В. Н. Пожарная безопасность электроустановок / В. Н. Черкасов, Н. П. Костарев. – М. : Акад. ГПС МЧС России, 2002. – 377 с.
- 3 Шабловский, Я. О. Обнаружение подземных пожаров при помощи термокабеля / Я. О. Шабловский // Чрезвычайн. ситуации. Образование и наука. – 2012. – Т. 7, № 2. – С. 50–55.
- 4 Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения : ГОСТ 27.002–89. – Введ. 01.07.90. – М. : Гос. ком. СССР по стандартам ; Стандартинформ, 2002. – 24 с.
- 5 Ушаков, В. Я. Электрическое старение и ресурс монолитной полимерной изоляции / В. Я. Ушаков. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – С. 21–24.
- 6 Электрические свойства полимеров / Б. И. Сажин [и др.] ; под общ. ред. Б. И. Сажина. – 3-е изд. – Л. : Химия, 1986. – С. 12.

- 7 Кабели силовые с пластмассовой изоляцией. Технические условия : ГОСТ 16442–80. – Переизд. 01.02.07 с изм. 1–5. – Взамен ГОСТ 16442–70 ; введ. 01.01.82. – М. : Гос. ком. СССР по стандартам ; Стандартиформ, 2007. – 22 с.
- 8 Кабели, провода и шнуры. Метод определения электрического сопротивления изоляции : ГОСТ 3345–76. – Переизд. 01.07.03 с изм. 1, 2. – Взамен ГОСТ 3345–67 ; введ. 01.01.78. – М. : Гос. ком. стандартов Совета Министров СССР ; Стандартиформ, 2003. – 4 с.

Поступила в редакцию 20.11.2013

Ya. O. Shablovsky, V. V. Kiselevich

THE PREVENTION OF EMERGENCY SITUATIONS CAUSED BY THE AGING OF ELECTRICAL INSULATION OF CABLES AND WIRES

The technique for evaluation of technical condition and for residual life prediction is proposed for electrical insulation of cables and wires. The technique includes measuring active resistance of electrical insulation, recalculating measured value to standard sizes of insulating fragment and to specified temperature, comparing obtained data with criterial resistance and subsequent calculating residual life of insulation. Application of the technique enables to prevent emergencies caused by insulation wear of cables and wires.