

УДК 621.315.2.016.2

С. А. Драничников, В. Г. Басманов

МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ С ПОЛИЭТИЛЕНОВОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

В статье рассмотрен метод прогнозирования остаточного ресурса кабелей с полиэтиленовой изоляцией по температуре холодостойкости изоляции, которая является количественной характеристикой определяющей ее стойкость к растрескиванию в результате термомеханического старения. Приводятся выражения для определения остаточного ресурса кабелей с полиэтиленовой изоляцией. Рассмотренный метод описан с теоретической точки зрения, но из-за отсутствия экспериментальной базы и незавершенных вследствие этого исследований по данному вопросу его пока что невозможно применять на практике. Из-за недостатка опыта проводимых испытаний также возникают проблемы достоверности полученных результатов и правильной трактовки этих полученных результатов. Поэтому основные усилия следует направить на развитие неразрушающих методов диагностирования кабельных линий, благодаря которым можно получить данные, которые позволят прогнозировать остаточных ресурс кабельных линий на практике. Применение неразрушающих методов совместно с использованием современного оборудования позволит повысить надежность электроснабжения потребителей и эффективность планирования ремонта и замены силовых кабельных линий.

Ключевые слова: кабели, полиэтиленовая изоляция, температура холодостойкости, остаточный ресурс.

В условиях эксплуатации происходит старение кабелей, и в первую очередь их электрической изоляции. Ресурс электрической изоляции определяет фактическую наработку кабеля, а срок службы характеризует календарное время с момента ввода кабеля в эксплуатацию независимо от наработки и коэффициента нагрузки. У многих кабельных линий (КЛ) истек срок службы, но они продолжают работать, так как не выработали своего

ресурса. Поэтому на практике необходимо знать наработку кабеля и, что особенно важно, его остаточный ресурс [1, 2, 3].

При эксплуатации кабельные линии подвергаются различным воздействиям, зависящим от нагрузки, режима и условий работы. Данные эксплуатационные факторы можно разделить на две основные группы:

1. Ток и напряжение, род тока, характер нагрузки, частота срабатывания, продолжительность включения и др.;

2. Окружающая температура, влажность воздуха, давление и запыленность воздуха, агрессивные газы, особенности монтажа, внешние вибрации, действия обслуживающего персонала и др.

Суммарное воздействие той или иной комбинации выше перечисленных факторов вызывает отказы в работе силовых кабелей [4, 5]. В данном случае снижается надежность электроснабжения потребителей – основное и важное требование, предъявляемое к системам электроснабжения.

В процессе эксплуатации кабельных линий в материалах, из которых они изготовлены, накапливаются необратимые изменения из-за термических, механических воздействий, воздействий электромагнитных полей, агрессивных сред, снижения качества электрической энергии. Эти изменения снижают прочность изоляции и в случайный момент времени могут привести к отказу кабеля.

Данный метод основан на определении корреляционной зависимости между характеристиками изоляции кабеля и характеристиками, прямо связанными с ресурсом кабелей [1, 2].

Основной причиной выхода из строя кабелей с полиэтиленовой (ПЭ) изоляцией, находящихся под длительным воздействием повышенных температур и механических нагрузок (термомеханическое старение) при рабочих напряжениях, является растрескивание оболочек и изоляции кабелей. Стойкость к растрескиванию количественно определяется температурой холодостойкости T_x [1, 2]. Разными исследователями было установлено, что уменьшение ресурса кабелей с ПЭ изоляцией в условиях эксплуатации

обусловлено структурными изменениями в процессе термического старения, при этом температура T_x ПЭ изоляции повышается. Тепловое движение структурных элементов в полимерах и их подвижность обуславливает релаксационные переходы, которые изучаются методами релаксационной спектроскопии. В первую очередь структурная необходимость проявляется при изучении температурно-частотных спектров диэлектрических и механических потерь. Это подтверждено экспериментально. Спектры механических потерь отражают те же процессы молекулярного движения, что и диэлектрические.

Для диэлектрических спектров различимы три основных перехода [1]: низкотемпературный γ -максимум диэлектрических потерь определяется подвижностью отдельных групп макромолекулы; β -максимум связан с сегментальной подвижностью, он находится выше температуры стеклования полимера. Экспериментально доказано, что γ - и β - максимумы находятся при отрицательных температурах по Цельсию и являются малоинформативными; α -максимум связан с сегментальной подвижностью полярных групп по поверхности кристаллитов, находится при повышенных температурах и является информативным. По мере старения в области α - релаксации происходит увеличение тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta_m$) в максимуме температурной и частотной зависимости и, что самое главное, происходит смещение местоположения максимума $\text{tg}\delta_m$ на температурных зависимостях в область более высоких температур ΔT_m примерно на 35 °С от исходного состояния до полного расходования ресурса, а на частотных зависимостях – в область низких частот Δf_m примерно на 750 Гц (рис. 1). Эта закономерность подтверждается на пластинах ПЭ, срезах с изоляции кабелей и на отрезках кабелей (в эксперименте исследовались образцы с изоляцией марок 153-01 К, 107-01 К, РК 75-24-17 и т.д.). Отклонение местоположения $\text{tg}\delta_m$ от исходного состояния ΔT_m или Δf_m является количественной мерой оценки процесса старения [1,2].

Экспериментально установлено, что между выбранными параметрами –

критериями ΔT_m или Δf_m и общепринятым критерием – температурой холодостойкости T_x – имеется прямая корреляционная зависимость (рис. 2). Эти зависимости можно представить линейными функциями:

- от температуры

$$T_x = 189 - 1,7\Delta T_m, \quad (1)$$

- от частоты приложенного напряжения

$$T_x = 154 - 0,13\Delta f_m, \quad (2)$$

где T_x – температура холодостойкости по Кельвину.

При этом для определения T_x необходимо от кабеля отрезать образец и экспериментально определить ее величину, т.е. этот метод неприемлем в эксплуатации.

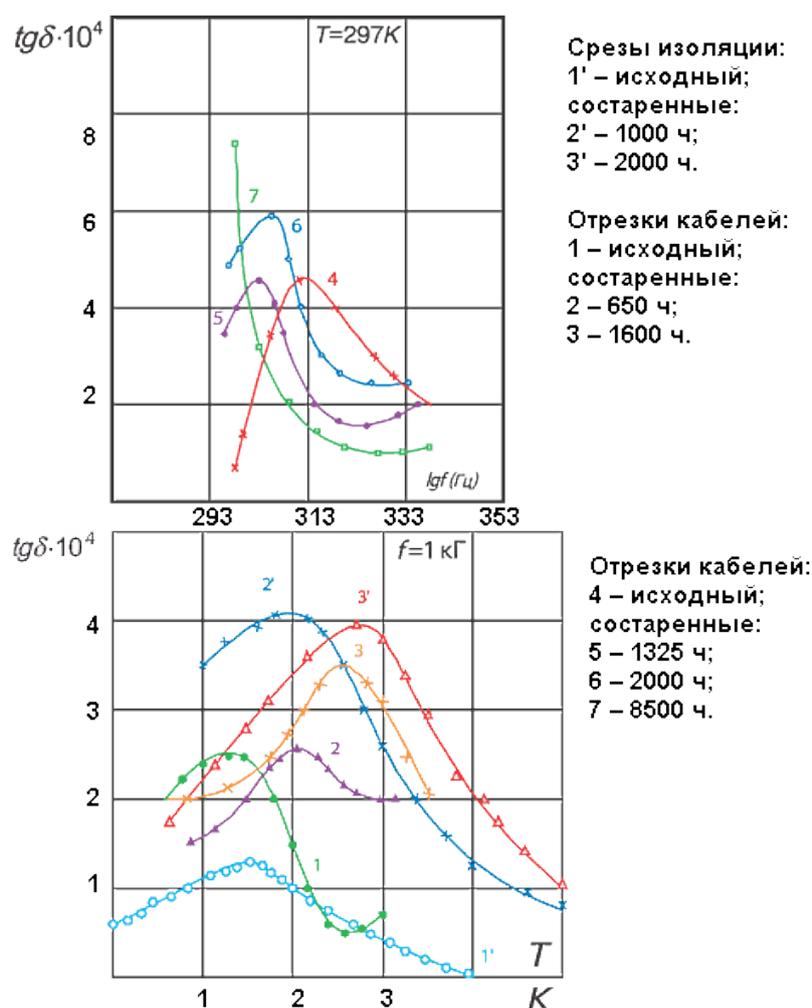


Рис. 1. Температурно-частотные зависимости $\text{tg} \delta$ для α -релаксации (срезы изоляции и отрезки кабелей типа РК 75-24-17)

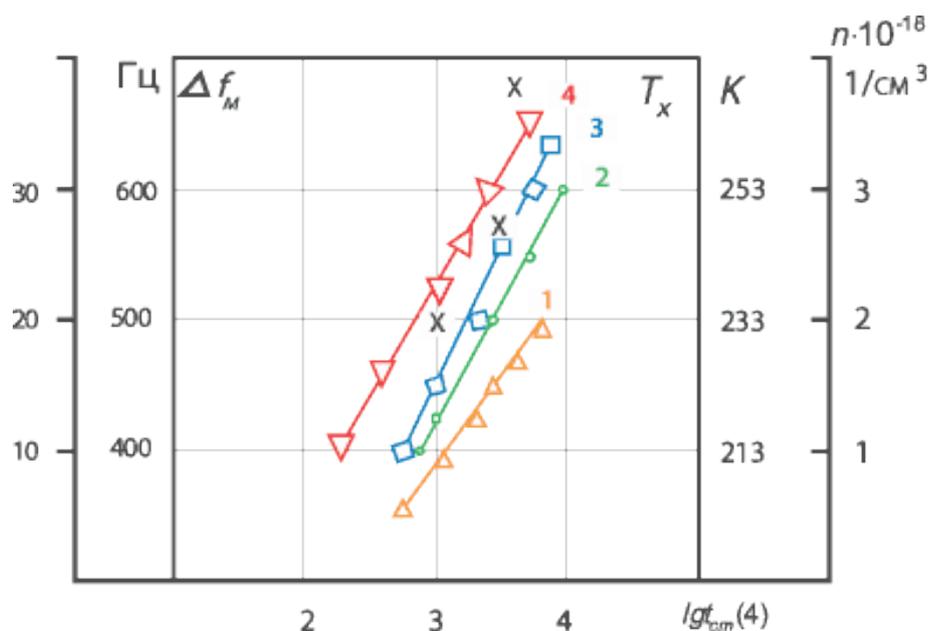


Рис. 2. Корреляционные зависимости параметров старения:

– для отрезков кабеля: 1 - T_x ; 2 - ΔT_M ; 3 - Δf_M ;

– для срезов с изоляции кабеля: 4 - n - расчет; x - эксперимент по ИКС

При изучении температурно-частотных спектров диэлектрических потерь эксперименты проводятся на отрезках кабелей или КЛ без изъятия образцов, т.е. метод является неразрушающим (испытательное напряжение составляет 30–50 В, диапазон частот – до 15 кГц, что не может повлиять на изоляцию в момент испытаний). Вводится понятие коэффициента изменения параметра [1, 2] – работоспособности от времени старения:

$$K_n = \frac{\Pi_{пр} - \Pi_n}{\ln \tau_{пр} - \ln \tau_n} \quad (3)$$

где $\Pi_{пр}$, Π_n – соответственно значения параметра: предельное (выработанный ресурс) и наработанное в процессе эксперимента;

$\tau_{пр}$ – предельное значение наработки, соответствующее $\Pi_{пр}$;

τ_n – наработанный ресурс в момент измерения параметра Π_n .

В соответствии с (3) можно определить наработанный ресурс:

$$\tau_n = \tau_{пр} \exp(\Pi_n - \Pi_{пр}) / K_n \quad (4)$$

При определении наработанного ресурса при температурах, отличных от температуры старения в форсированном режиме, при котором определен коэффициент K_n , полученная зависимость (4) преобразуется к виду:

$$\tau_n = \tau_{\text{пр}\phi} \cdot \exp \left[\frac{P_n - P_{\text{пр}}}{K_n} + \frac{W}{R} \left(\frac{1}{T_p} - \frac{1}{T_\phi} \right) \right], \quad (5)$$

где $\tau_{\text{пр}\phi}$ – предельное значение ресурса в форсированном режиме испытаний;

T_ϕ – температура старения в форсированном режиме;

T_p – рабочая температура кабеля;

$W = 54$ кДж/моль – условная энергия активации процесса разрушения ПЭ.

Для использования формулы (5) необходимо предварительно определить параметры-критерии работоспособности – ΔT_m и Δf_m . Измерение параметра ΔT_m необходимо проводить при равномерном нагреве кабеля, что практически невозможно. Более удобным параметром является Δf_m . Был разработан экспресс-метод позволяющий определить параметр Δf_m , проводя измерения лишь на двух частотах. Получена формула для определения f_m [2]:

$$f_m = \sqrt{f_1 \cdot f_2 \left(\frac{f_1^\lambda \text{tg} \delta_1 - f_2^\lambda \text{tg} \delta_2}{f_1^\lambda \text{tg} \delta_2 - f_2^\lambda \text{tg} \delta_1} \right)^{\frac{1}{2\lambda}}}, \quad (6)$$

где $\lambda = 0,4 - 0,8$ – параметр распределения времен релаксации.

После определения f_m вычисляется параметр Δf_m . Разработанный метод неразрушающего определения ресурса можно применить и для других видов изоляции (эксперименты проводились с изоляцией из ПВХП, ПТФЭ, с резиновой и бумажно-масляной изоляцией), но для этого необходимы дополнительные исследования [1–3]. Рассмотренный выше метод хорошо описан с теоретической точки зрения, но из-за отсутствия экспериментальной базы и незавершенных вследствие этого исследований по данному вопросу его пока что невозможно применять на практике. Из-за недостатка опыта

проводимых испытаний также возникают проблемы достоверности полученных результатов и правильной трактовки этих полученных результатов. Разрабатываются специальные приборы и стенды, с помощью которых можно проводить испытания и получать необходимые данные, но они также пока что не находят широкого практического применения. Поэтому основные усилия следует направить на развитие неразрушающих методов диагностирования кабельных линий, благодаря которым мы получим данные, которые позволят прогнозировать остаточных ресурс кабельных линий на практике. Стоит отметить, что применение неразрушающих методов совместно с использованием современного оборудования будет способствовать повышению надежности электроснабжения потребителей, а также позволит эффективнее планировать ремонт и замену силовых кабельных линий по их фактическому техническому состоянию.

Список литературы

1. *Канискин В. А., Таджибаев А. И.* Определение остаточного ресурса силовых кабелей неразрушающая диагностика. URL: <http://www.news.elteh.ru/arh/2003/20/10.php> (дата обращения: 28.01.2017).
2. *Боев М. А., Канискин В. А.* и др. Эксплуатация силовых электрических кабелей. Ч. 2. Диагностика силовых кабелей и определение остаточного ресурса в условиях эксплуатации: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Петерб. энергет. ин-та повышения квалификации руководящих работников и специалистов Министерства энергетики РФ, 2001. 75 с.
3. *Басманов В. Г., Драничников С. А.* Методы прогнозирования остаточного ресурса силовых кабелей // Общество, наука, инновации (НПК-2016): всерос. ежегод. науч.-практ. конф.: сб. ст., 18–29 апреля 2016 г. / Вят. гос. ун-т. Киров, 2016. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). С. 1989–1996.
4. *Холманских В. М.* Надежность электроснабжения: учеб. пособие. Киров: ФГБОУ ВО «ВятГУ», 2013. 187 с.
5. *Басманов В. Г., Закалата А. А., Холманских В. М.* Математическая модель надежности элементов электроснабжения в период приработки // Фундаментальные исследования. 2015. № 5–2. С. 247–251.

БАСМАНОВ Владислав Геннадьевич – кандидат технических наук, заведующий кафедры «Электроснабжение», Вятский государственный университет. 610000, г. Киров, ул. Московская, 36.

E-mail: basmanov@vyatsu.ru

ДРАНИЧНИКОВ Сергей Анатольевич – студент группы ЭиЭм-2801-01-00, Вятский государственный университет. 610000, г. Киров, ул. Московская, 36.

E-mail: talviaamu@mail.ru