

НЕОДНОРОДНЫЕ КАБЕЛЬНЫЕ ТРАССЫ: АНАЛИЗ СВОЙСТВ УЧАСТКОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЙ ВОССТАНАВЛИВАЮЩЕГОСЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Запропоновано метод визначення характеристик окремо кожної з ділянок неоднорідної кабельної траси. Для цього криві відновлюваної напруги всієї траси представляють сумою експоненціальних доданків, кожен з яких пов'язаний з певною ділянкою неоднорідної траси.

Предложено метод определения характеристик по отдельности каждого участка неоднородной кабельной трассы. Для этого кривые восстанавливающегося напряжения трассы представляются суммой экспоненциальных составляющих, каждая из которых связана с соответствующим участком неоднородной трассы.

ВВЕДЕНИЕ

Трассы, состоящие из кабелей разных типов, чаще всего встречаются на энергоблоках АЭС. Повышенные требования к нагревостойкости и пожаробезопасности кабелей гермозоны приводят к тому, что там используют кабели со сшитым полиэтиленом (СПЭ), а вне гермозоны – традиционные кабели с бумажно-масляной изоляцией (БМИ). При обследовании технического состояния кабелей неоднородность кабельной линии либо игнорируется (при испытаниях высоким напряжением или напряжением сверх низкой частоты), либо подразумевается раздельное обследование кабелей разных типов, для чего необходимо выполнить отсоединение кабелей гермозоны от кабельных проходок [1 – 5]. Отсоединение кабелей – трудоемкая процедура, связанная с риском нарушения герметичности концевых муфт. Идеальными были бы такие технические решения, которые позволили бы обойтись без физического разделения составной кабельной трассы на отдельные участки.

Цель работы – разработка метода определения характеристик каждого из участков по отдельности, используя в качестве исходной информации результаты совокупных измерений составной трассы целиком.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА

Представим неоднородную трассу схемой замещения рис. 1. Каждый из участков трассы содержит емкости быстрых видов поляризации (C_1 , C_2), RC-цепочки замедленных видов поляризации (R_{11} , C_{11} ; R_{21} , C_{21}) и сопротивления утечек (R_1 , R_2). Пусть два участка трассы обследованы по отдельности (ключ на рис. 1 – не замкнут).

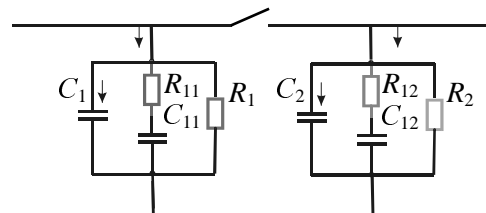


Рис. 1

На рис. 2 приведены кривые восстанавливающегося напряжения отдельно для кабеля с БМИ – верхняя кривая (обозначено POI – Paper Oil Impregnated) и для кабеля со СПЭ – нижняя кривая (обозначено PE – Poly Ethylene). Каждая кривая характеризуется тремя параметрами: амплитуда U_m , момент достиже-

ния максимума t_m , постоянная времени участка само-разряда θ . Кабели с БМИ и со СПЭ сильно отличаются по этим параметрам. Это важная предпосылка для возможностей выделения характеристик участков по отдельности.

Какими будут характеристики трассы после замыкания ключа? Напряжения участков – выравниваются, а заряды распределяются пропорционально емкостям C_1 , C_2 .

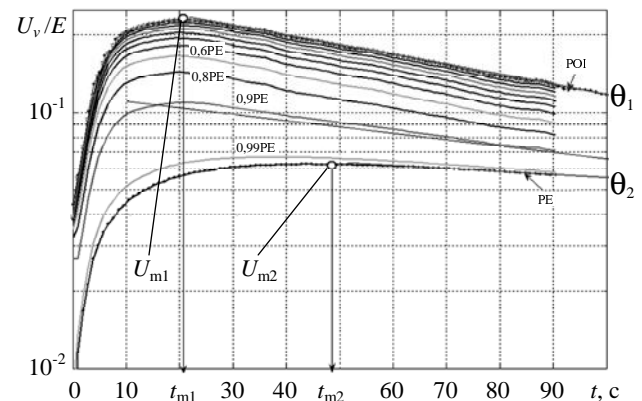


Рис. 2

Пусть до замыкания ключа напряжения участков в какой-то момент времени были равны U_1 и U_2 соответственно. Тогда заряды, накопленные на участках, были равны:

$$Q_1 = U_1 \cdot C_1, \quad Q_2 = U_2 \cdot C_2.$$

Суммарный заряд трассы: $Q = Q_1 + Q_2$.

После замыкания ключа напряжение на составной трассе кабелей станет равным средневзвешенному значению, причем весовые коэффициенты равны долевым содержаниям емкостей участков в суммарной емкости трассы:

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{Q_1 + Q_2}{C_1 + C_2} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} U_1 + \frac{C_2}{C_1 + C_2} U_2.$$

Другими словами, кривая восстанавливающегося напряжения составной трассы занимает промежуточное положение между кривыми каждого из участков по отдельности. На рис. 2 показан ряд таких кривых для случаев, когда долевое содержание участка с СПЭ составляет от 0,99 до 0,1. В первом случае характеристика трассы практически полностью совпадает со СПЭ, а во втором – с БМИ. Очевидно, крайние случаи – вырожденные, когда по результирующей кривой найти параметры участков не удастся.

Если же емкости участков сопоставимы, то на результирующей кривой отражаются свойства каждой из них (средняя часть области между верхней и нижней кривыми рис. 2). Тогда участок саморазряда в полулогарифмическом масштабе имеет *вогнутый* характер. Это означает, что он может быть представлен суммой экспоненциальных составляющих, каждая из которых связана с определенным кабелем.

ВЫДЕЛЕНИЕ ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ УЧАСТКА САМОРАЗРЯДА

На рис. 3 показана кривая восстанавливающегося напряжения составной трассы, состоящей из кабеля с БМИ (типа ААШВ-3х185-6 кВ) и со СПЭ (Gammalion 240 – 6 кВ). Участок саморазряда кривой имеет вогнутый характер, поэтому может быть представлен суммой двух экспоненциальных составляющих:

$$\frac{U_v}{E} = a_1 \cdot e^{-t/\theta_1} + a_2 \cdot e^{-t/\theta_2},$$

где θ_1, θ_2 – постоянные времени экспоненциальных составляющих; a_1, a_2 – начальные значения экспоненциальных составляющих.

Выделим "медленную" составляющую – кривая 2, рис. 3. Ее постоянная времени $\theta_2 = R_2 \cdot C_2 = 2200$ с. Очевидно, она относится к кабелю со СПЭ.

Удаляя "медленную" составляющую из кривой восстанавливающегося напряжения, получим кривую 3, содержащую "быструю" экспоненту 4. Ее постоянная времени – $\theta_1 = R_1 \cdot C_1 = 200$ с. Она относится к кабелю с БМИ.

Таким образом, найдены два важных параметра θ_1, θ_2 изоляции участков трассы, не зависящие от длин участков и толщины изоляции.

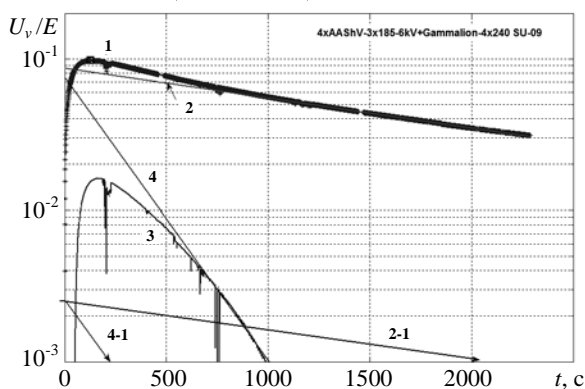


Рис. 3

НАХОЖДЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЛАКСАЦИОННЫХ ЦЕПОЧЕК УЧАСТКОВ ТРАССЫ И КРИВЫХ ВОССТАНАВЛИВАЮЩЕГОСЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Длины участков трассы и погонные емкости кабелей считаем известными. Тогда емкости участков C_1 и C_2 также известны, а значит известны и сопротивления утечек R_1 и R_2 (по найденным выше постоянным времени θ_1 и θ_2). Для нахождения кривых восстанавливающегося напряжения участков требуется найти еще 4 параметра релаксационных цепочек $R_{11}, C_{11}; R_{21}, C_{21}$ (рис. 1). Представим их в виде постоянных времени $\theta_{11} = R_{11} \cdot C_{11}; \theta_{21} = R_{21} \cdot C_{21}$ и долевых со-

держаний $\eta_{11} = C_{11}/C_1; \eta_{21} = C_{21}/C_2$ релаксационных емкостей. Обычно долевые содержания релаксационных емкостей не превышают 5 – 20% от емкостей быстрых видов поляризации. Это следует из того, что именно на столько возрастают емкости при уменьшении частоты до нуля. Постоянные времени релаксационных цепочек того же порядка, что и моменты максимумов кривых восстанавливающегося напряжения: 20 – 100 с – для БМИ; 100 – 1000 с – для СПЭ.

Используя в качестве ориентира указанные диапазоны изменения переменных, выполним ряд последовательных приближений, сравнивая расчетные кривые восстанавливающегося напряжения с экспериментальной. Результаты приближений приведены в таблице и на рис. 4 (построенном в двойном логарифмическом масштабе для более удобного сравнения расчетных кривых с экспериментальной).

Первое приближение (кривая 1, рис. 4) оказалась, как видим, весьма далекой от экспериментальной кривой как по амплитуде U_m/E , так и по моменту максимума t_m . Поэтому выполняем приближения 2 и 3, увеличивая долю η_{11} "медленного" релаксатора. Наблюдаем рост амплитуды восстанавливающегося напряжения и незначительное уменьшение t_m .

На четвертом шаге приближения уменьшили постоянную времени θ_{11} в 2 раза. Получили существенный рост U_m/E и уменьшение t_m . Дальнейшее уменьшение θ_{11} в 2 раза (на 5-м шаге) привело к завышенному значению U_m/E по сравнению с экспериментальной кривой, и момент максимума t_m все равно остался завышенным.

Таблица

Параметры схемы замещения составной линии, соответствующие кривым восстанавливающегося напряжения рис. 4.

Номер приближения	$\eta_{11} = C_{11}/C_1$	$\theta_{11} = R_{11} \cdot C_{11}$	$\eta_{21} = C_{21}/C_2$	$\theta_{21} = R_{21} \cdot C_{21}$	U_m/E	t_m, c
1	≈0,07	≈200	0,09	2000	0,0131	478,8
2	0,07*2	200	"-	"-	0,0246	458,4
3	0,07*2*2	200	"-	"-	0,0448	433,4
4	0,07*2*2	100	"-	"-	0,0842	263,8
5	0,07*2*2	50	"-	"-	0,1352	156,9
6	0,07*2	50	"-	"-	0,0750	167,3
7	0,07*2	25	"-	"-	0,0975	98

Поэтому на 6-м шаге уменьшили параметр η_{11} в 2 раза, получили снижение ниже экспериментального уровня параметра U_m/E при некотором увеличении t_m .

Наконец, на 7-м шаге уменьшили в 2 раза параметр θ_{11} . Получили результат, удовлетворительно совпадающий с экспериментом.

Как видим, варьировать пришлось два параметра "быстрой" экспоненты. Начальные приближения для остальных параметров модели оказались удовлетворительными.

Надо заметить, что задача восстановления параметров модели по экспериментальным данным является *плохо обусловленной*. Близкие кривые восстанавливающегося напряжения можно получить при существенно различных параметрах модели. Из представленного примера можно предположить, что параметры "медленных" экспонент должны восстанавливаться точнее, чем "быстрых".

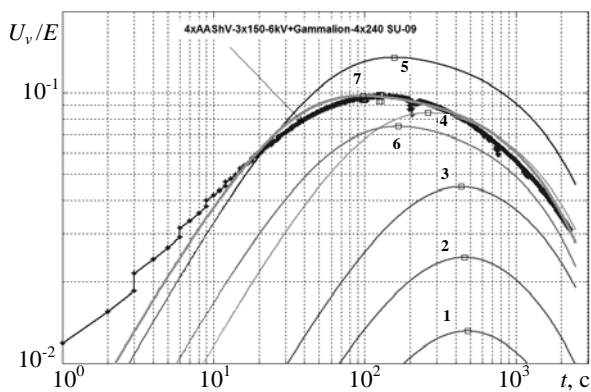


Рис. 4

После нахождения параметров схемы замещения строим кривые восстанавливающегося напряжения для каждого из участков трассы по отдельности – рис. 5: 1 – исходная кривая; 2 – результат приближения к ней с помощью построения схемы замещения; 3 – кривая восстанавливающегося напряжения участка с БМИ; 4 – то же для участка со СПЭ.

Параметры кривых восстанавливающегося напряжения:

а) для кабеля ААШВ: $U_m/E = 0,085$; $t_m = 55$ с;

б) для кабеля Gammalion: $U_m/E = 0,0048$; $t_m = 950$ с.

По параметрам восстанавливающегося напряжения оба участка трассы кабеля находятся в удовлетворительном техническом состоянии.

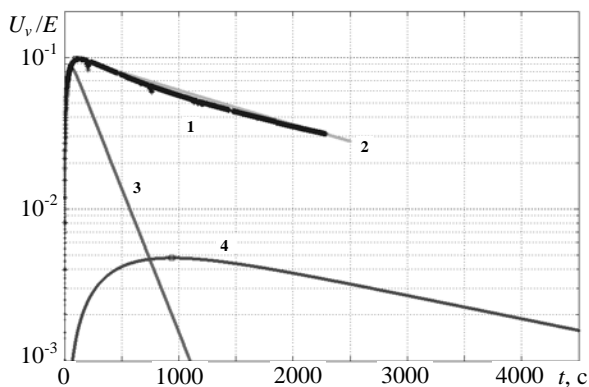


Рис. 5

ВЫВОДЫ

1. Выделение из кривой восстанавливающегося напряжения составной трассы характеристик отдельных участков возможно, если участок саморазряда кривой имеет вогнутый характер в полулогарифмическом масштабе, подобный рис.3.

2. На первом этапе находят экспоненциальные составляющие участка саморазряда.

3. На втором этапе находят 4 параметра релаксационных цепочек, ориентируясь на приведенные выше ограничения.

4. На третьем этапе, когда все параметры схемы замещения рис. 1 найдены, рассчитываются кривые восстанавливающегося напряжения каждого из участков по отдельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Положение по определению технического состояния и управлению старением кабелей АС. – М.: РОСЭНЕРГОАТОМ. – 2002. – 102 с.
2. Мониторинг технического состояния и оценка остаточного срока службы силовых кабелей среднего и низкого напряжения с полиэтиленовой изоляцией. – М.: РОСЭНЕРГОАТОМ. – 2000. – 24 с.
3. Методические указания по определению технического состояния и остаточного срока службы кабелей систем безопасности, контроля и измерений на атомных станциях. – Лыткарино: НИИП МинатомРФ. – 1998 г. – 35 с.
4. Беспрозванных А.В., Набока Б.Г. Методика оценки технического состояния кабелей по параметрам межфазного пространства // Электрическая изоляция – 2006: четвертая междунар. науч. – техн. конф. , 16-19 мая 2006 г.: Труды конференции. – СПб., 2006. – С. 190 - 192.
5. Беспрозванных А.В. Диэлектрическое сканирование поперечной структуры многожильных кабелей методом совокупных измерений // Технічна електродинаміка. – № 3. – 2008. – С. 30 – 37.
6. Система диагностики CD-31. Инструкция по эксплуатации: Hagenuk KMT. Kabelmesstechnik GmbH, 2000. – 87 pp.

Поступила 24.09.2009

Набока Борис Григорьевич, д.т.н., проф.,
Беспрозванных Анна Викторовна, к.т.н., доц.,
Москвитин Евгений Сергеевич
Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт"
Украина, 61002, Харьков, ул.Фрунзе,21,
кафедра "Электроизоляционная и кабельная техника"
тел. (057) 70-10-60, e-mail: naboka@kpi.kharkov.ua,
bezprozvannych@kpi.kharkov.ua

B.G. Naboka, A.V. Bezprozvannych, E.S. Moscvitin

Non-uniform cable lines: section properties analysis through recovery voltage measurement results

A method of characteristics determination separately of each section of a non-uniform cable line is introduced. For this purpose, the line recovery voltage curves are represented by a sum of exponential components each of which is determined by a certain site of the non-uniform line.

Key words – non-uniform cable line, paper oil impregnated insulation, polyethylene, equivalent circuit, recovery voltage, exponential components