

А.В. Беспрозванных, А.Г. Кессаев

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ФАКТОРЫ ЛОКАЛЬНОГО УСИЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В СИЛОВОМ КАБЕЛЕ КОАКСИАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ

На основі чисельного моделювання виконано аналіз впливу ексцентриситету між струмопровідною жилою та ізоляцією, еліптичності ізоляції та включень сферичної форми на розподіл напруженості електростатичного поля в силовому кабелі коаксіальної конструкції зі шитою поліетиленовою ізоляцією. Показано, що активний характер та високі значення ефективної провідності напівпровідних екранів не впливають на розподіл поля між жилою та ізоляцією. Наявність в товщі ізоляції водяних включень сферичної форми призводить до посилення електричного поля в 5 і більше разів в залежності від діелектричної проникності. Водяні трійинги, як локальні зосереджені неоднорідності в структурі шитої поліетиленової ізоляції, призводять до змінення форми прямокутного сигналу, який розповсюджується в силовій кабельній лінії, що дає можливість в експлуатації діагностувати їх за допомогою імпульсної рефлектометрії. Бібл.10, рис.12.

Ключові слова: ексцентриситет, еліптичність ізоляції, водяні трійинги, напруженість електричного поля, хвильовий опір, зондуєчий сигнал.

На основе численного моделирования выполнен анализ влияния эксцентриситета между токопроводящей жилой и изоляцией, эллиптичности изоляции и включений сферической формы на распределение напряженности электростатического поля в силовом кабеле коаксиальной конструкции со шитой полиэтиленовой изоляцией. Показано, что активный характер и высокие значения эффективной проводимости полупроводящих экранов не влияют на распределение поля между жилой и изоляцией. Наличие в толще изоляции водных включений сферической формы приводит к усилению электрического поля в 5 и более раз в зависимости от диэлектрической проницаемости. Водные трининги, как локальные сосредоточенные неоднородности в структуре полиэтиленовой изоляции, приводят к изменению формы зондирующего прямоугольного сигнала, распространяющегося в силовой кабельной линии, что дает возможность в эксплуатации диагностировать их с помощью импульсной рефлектометрии. Библ.10, рис.12.

Ключевые слова: эксцентриситет, эллиптичность изоляции, водные трининги, напряженность электрического поля, волновое сопротивление, зондирующий импульс.

Введение. Надежность высоковольтных силовых кабелей в процессе длительной эксплуатации во многом связана с интенсивностью старения полимерной изоляции. В высоковольтных силовых кабелях в условиях воздействия электрического поля старение полиэтилена определяется, прежде всего, наличием неоднородностей, возникающих как в процессе производства кабелей, так и в процессе эксплуатации. В кабеле всегда присутствуют отклонения от идеальной конструкции, которые проявляются в отклонении диаметров проводников от номинальных значений; в расположении токопроводящей жилы и изоляции не строго коаксиально, а с эксцентриситетом; в эллиптичности (овальности) жилы и изоляции; в изменении относительной диэлектрической проницаемости по толщине изоляции и по длине кабеля в силу образования низкомолекулярных продуктов (в том числе и воды) на технологической стадии изготовления при сшивке полиэтиленовой изоляции и увлажнении в процессе эксплуатации. Такие дефекты являются конструктивными, технологическими и эксплуатационными неоднородностями, которые приводят к локальному изменению напряженности электрического поля [1-3].

Цель статьи – анализ влияния эксцентриситета, эллиптичности и сферических включений на распределение электрического поля на основе численного моделирования.

Влияние полупроводящих экранов на распределение напряженности поля. Особенностью конструкции высоковольтных кабелей с изоляцией из сши-

того полиэтилена является наличие полупроводящих экранов по поверхности жилы и поверхности изоляции. Три слоя – полупроводящее покрытие по жиле, изоляция и полупроводящее покрытие по изоляции – наносятся одновременно на жилу с помощью строенных экструдеров. В результате воздушные зазоры между этими слоями не образуются. Кроме того, высокая проводимость полупроводящих слоев обеспечивает шунтирование электрического поля воздушных зазоров между жилой и полупроводящим покрытием по жиле, между полупроводящим покрытием по изоляции и металлическим экраном кабеля. Частичные разряды в этих зазорах не возникают.

В [4] показано, что эффективная проводимость RC цепочки, заменяющей полупроводящий слой, оказывается не емкостной, а активной. При этом она в 40 – 40000 раз выше емкостной проводимости слоя с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon=10$. Эффективная диэлектрическая проницаемость полупроводящих слоев составляет около 400 – 400000, что дает возможность пренебречь их влиянием на распределение поля в промежутке «токопроводящая жила – металлический экран» (рис. 1). На рис. 2 приведены линии распределения напряженности по границам раздела сред 1 – 4 (рис. 2). При переходе из первого слоя (полупроводящего покрытия жилы) во второй (изоляцию жилы) напряженность поля скачкообразно увеличивается в ϵ_1/ϵ_2 раз. При переходе от второго слоя в третий (полупроводящий экран по изоляции) напряженность поля скачком уменьшается

© А.В. Беспрозванных, А.Г. Кессаев

в $\varepsilon_3/\varepsilon_2$ раз [5]. Напряженность в начале третьего слоя и в конце его (на металлическом экране кабеля) одинакова по модулю, но разная по знаку: напряженность на поверхности экрана принимается отрицательной, в отличие от напряженности на поверхности полупроводящего экрана по жиле, которая принимается положительной.

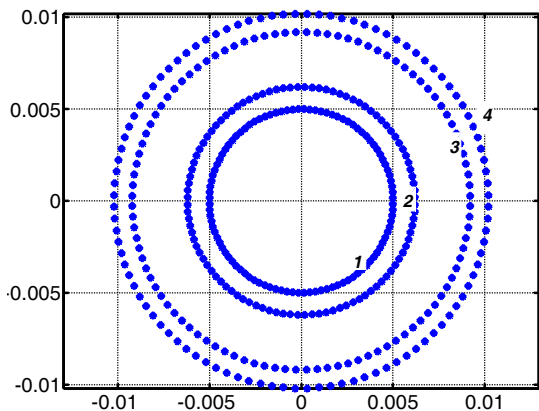


Рис. 1. Схема расположения узлов на поверхности жилы (1), полупроводящего экрана по жиле (2), поверхности изоляции (3) и полупроводящего экрана по изоляции (4)

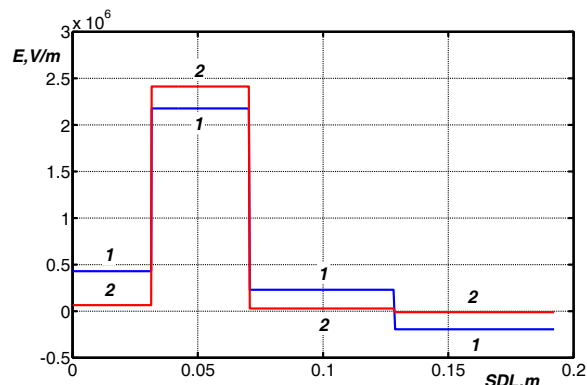


Рис. 2. Распределение напряженности поля по границам раздела сред 1 – 4 (рис. 1) при разных параметрах полупроводящих слоев: 1) $\varepsilon_1=\varepsilon_3=15$; 2) $\varepsilon_1=\varepsilon_3=150$. Относительная диэлектрическая проницаемость изоляции $\varepsilon_2=2,3$

Влияние эксцентриситета и эллиптичности.

В случае однородной изоляции электрическое поле в силовом кабеле коаксиальной конструкции (рис. 3) неоднородно по толщине изоляции: максимально на жиле и минимально на поверхности изоляции кабеля.

Наличие эксцентриситета ΔZ между токопроводящей жилой и изоляцией приводит к утолщению (ΔI) и утонению (Δ_2) изоляции (рис. 4), в результате происходит искажение электрического поля (рис. 5, кривая 2) как на поверхности токопроводящей жилы (I), так и изоляции (II). Напряженность электрического поля локально возрастает в местах утонения изоляции и уменьшается в местах утолщения, т.е. появляется также неоднородность распределения на поверхности жилы и изоляции (кривые 2). При эксцентриситете $\Delta Z = 10\%$ от радиуса токопроводящей жилы напряженность на жиле возрастает на 20 %, на поверхности изоляции – на 25 %. При эксцентриситете 100 % от диаметра токопроводящей жилы коэффициент неравномерности распределения напряженности электрического поля, равный отношению напряженности

поля с эксцентриситетом E_e , к напряженности поля без эксцентриситета E , возрастает в 1,5 и 3 раза на поверхности жилы ($K1$) и изоляции ($K2$) соответственно (рис. 6) [2].

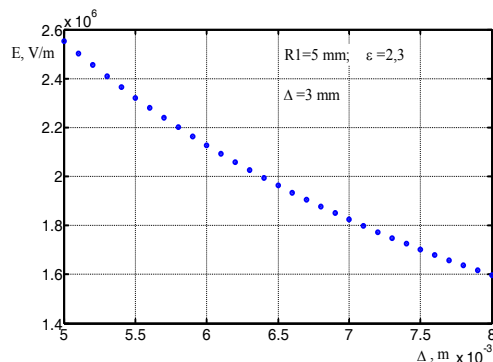


Рис. 3. Распределение напряженности электрического поля по толщине однородной сшитой полиэтиленовой изоляции в одножильном высоковольтном силовом кабеле идеальной коаксиальной конструкции

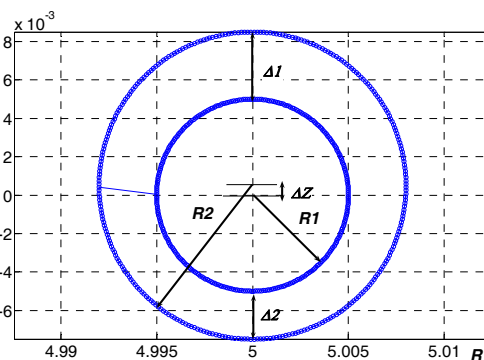


Рис. 4. Схема расположения узлов при расчете напряженности поля в силовом кабеле коаксиальной конструкции с эксцентриситетом ΔZ между жилой и изоляцией

Эллиптичность (овальность) изоляции (рис. 7) также приводит к искажению электрического поля на поверхности токопроводящей жилы (I) и изоляции (II): при эллиптичности 5 % (кривая 1) напряженность поля на жиле возрастает на 10%, на поверхности изоляции – на 20 %; при эллиптичности 11 % (кривая 2) на 30 % и 45 %; при эллиптичности 18 % (кривая 3) на 53 % и 87 % соответственно относительно напряженности поля в идеально круглой конструкции кабеля.

Наличие эксцентриситета и эллиптичности приводит к изменению и волнового сопротивления одножильного силового кабеля коаксиальной конструкции [1, 2]

$$\dot{Z}_w = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}, \quad (1)$$

где R – полное активное сопротивление токопроводящей жилы и металлического экрана, Ом/м; L – общая индуктивность, складываемая из внутренней индуктивности токопроводящей жилы и экрана, и взаимной индуктивности (внешней), Гн/м; G – активная проводимость изоляции, См/м; C – емкость кабеля, Ф/м; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота, рад/с.

В высокочастотном диапазоне для одножильных силовых кабелей коаксиальной конструкции можно считать, что $R \leq \omega L$ и $G \leq \omega C$. Тогда волновое сопротивление носит активный характер и определяется по упрощенной формуле

$$Z_w = \sqrt{L/C} \quad (2)$$

Индуктивность кабеля в этом диапазоне определяется только внешней индуктивностью [1]

$$L \cong L_{out} = \frac{\mu_0 \mu}{\pi} \ln \frac{R_2}{R_1}, \quad C = 2\pi \epsilon_0 \epsilon / \ln \frac{R_2}{R_1},$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная, ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость материала изоляции, μ – магнитная проницаемость материала проводников (для диамагнетиков – меди и парамагнетиков – алюминия $\mu \approx 1$).

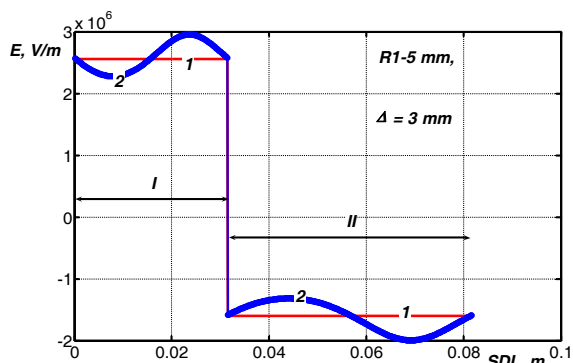


Рис. 5. Распределение напряженности электрического поля на поверхности токопроводящей жилы и изоляции при отсутствии (кривая 1) и наличии эксцентриситета $\Delta Z=0,1R_1$ (кривая 2) между жилой и изоляцией

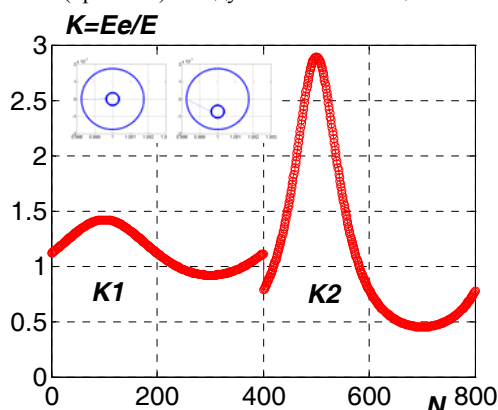


Рис. 6. Коэффициент неравномерности распределения напряженности электрического поля на поверхности жилы (K1) и изоляции (K2) при 100 % эксцентриситете $\Delta Z=R_1$

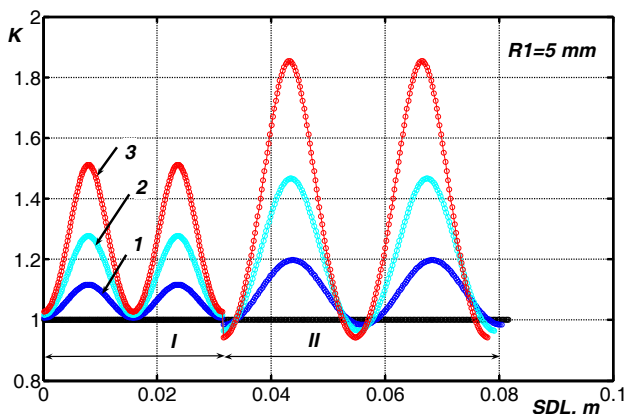


Рис. 7. Коэффициент неравномерности распределения напряженности электрического поля на поверхности токопроводящей жилы (I) и изоляции (II) при наличии эллиптичности изоляции

На рис. 8 показано изменение индуктивности, емкости и волнового сопротивления кабеля коаксиальной конструкции при увеличении эксцентриситета между токопроводящей жилой и изоляцией.

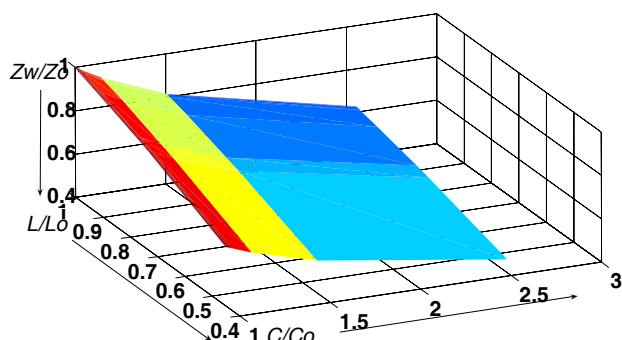


Рис. 8. Влияние эксцентриситета на индуктивность, емкость и волновое сопротивление силового кабеля коаксиальной конструкции (индексами «0» показаны параметры без эксцентриситета)

Наличие в толще сшитой полиэтиленовой изоляции силовых кабелей среднего напряжения двух водных триингов сферической формы, заполненных полностью (рис. 9, кривая 1, $\epsilon_2 = \epsilon_3 = 80$) [6] либо частично (рис. 9, кривая 2, $\epsilon_2 = \epsilon_3 = 6,9$) водой, приводит к повышению напряженности в 5 – 10 и более раз. В основе численного метода расчета напряженности поля лежат интегральные уравнения Фредгольма первого и второго рода (метод вторичных источников) для осесимметричного поля [6].

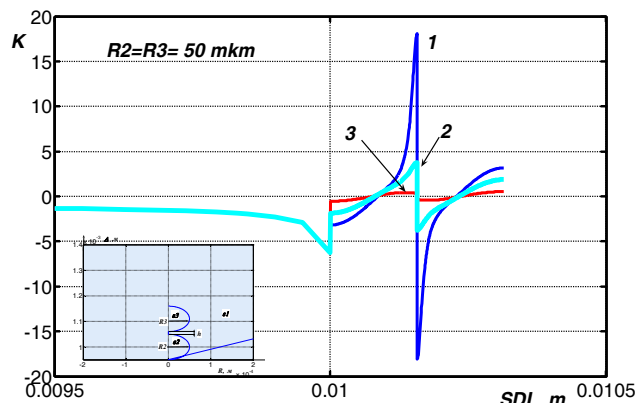


Рис. 9. Влияние относительной диэлектрической проницаемости двух сферических включений диаметром 100 мкм, расположенных на расстоянии 2,5 мкм друг от друга, на коэффициент неоднородности электрического поля. Диэлектрическая проницаемость полиэтилена $\epsilon_1 = 2,3$

При наличии в толще сшитой полиэтиленовой изоляции двух сферических включений, заполненных воздухом (рис. 9, кривая 3, $\epsilon_2 = \epsilon_3 = 1$), напряженность на поверхности включений не превышает среднее значение (2 кВ/мм для силовых кабелей среднего напряжения).

Влияние электрофизических характеристик водных триингов на форму зондирующих сигналов. Деграция силовых высоковольтных кабелей со сшитой полиэтиленовой изоляцией, прокладываемых в грунте, по причине образования водных триингов является растущей проблемой. Такие древовидные структуры – кластеры [7-9], представляющие ряд

заполненных водой микропустот с соединительными каналами, уменьшают электрическую прочность полимерной изоляции.

Водные триинги (ВТ) приводят к локальным концентрациям электрического поля в сшитой полиэтиленовой изоляции (см. рис. 9), росту емкости, уменьшению сопротивления изоляции, увеличению тангенса угла диэлектрических потерь. Так, результаты численного моделирования роста ВТ в силовых кабелях показывают [10], что увеличение емкости не превышает 1,5 % в случае одиночного эллипсоидного водного триинга при полном (100 %) прорастании сквозь толщу изоляции (от металлического экрана до токопроводящей жилы) вне зависимости от конструктивного исполнения экрана. Сопротивление изоляции при этом значительно изменяется: более чем на порядок. Результатом такого изменения сопротивления изоляции является увеличение тангенса угла диэлектрических потерь, активной проводимости изоляции и, в конечном итоге, уменьшение волнового сопротивления кабеля. Водные триинги представляют собой локальные сосредоточенные неоднородности в структуре полиэтиленовой изоляции с волновым сопротивлением, отличающимся от волнового сопротивления основной части кабеля. При распространении по кабелю высокочастотной электромагнитной волны (зондирующего сигнала – напряжения определенной формы и частоты) будет наблюдаться отражение ее части от неоднородности, что приведет к искажению формы (рефлектометрия во временной области). Для анализа влияния водного триинга в виде сосредоточенного дефекта с соответствующими электрофизическими характеристиками на форму зондирующего импульсного напряжения силовой кабель представляется в виде Т-образной схемы замещения (рис. 10) [4]: R, L – активное сопротивление и индуктивность проводников кабеля; C_0, R_0 – геометрическая емкость (емкость, обусловленная быстрыми видами поляризации) и сопротивление утечки изоляции; R_1, C_1 – параметры, обусловленные поляризационными процессами в изоляции. Число таких звеньев схемы замещения на 1 погонный метр для корректного представления кабеля должно быть достаточно большим в зависимости от рабочей частоты [4]. Так, на частоте 1 МГц – не менее 10-ти. Кабель подключается к источнику импульсной ЭДС $E(t)$ с внутренним сопротивлением R_e . Сопротивления R_s и R_n – сопротивления источника и нагрузки соответственно.

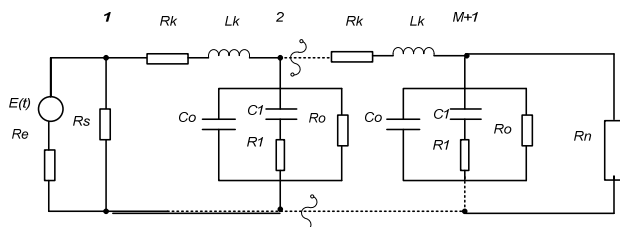


Рис. 10. Т-образная схема замещения силового высоковольтного кабеля коаксиальной конструкции [4]

Для обеспечения согласованного режима работы, исключая появление дополнительных отраженных волн, влияющих на форму зондирующего им-

пульса, необходимо выполнение равенства сопротивлений нагрузки, источника и волнового сопротивления кабеля. С этой целью на частоте 1 МГц выполнены измерения параметров образца одножильного силового кабеля длиной 25 см АПВГ-1×95/16 напряжением 35 кВ с алюминиевой жилой сечением 95 мм² и медным экраном сечением 16 мм²: $R=0,3262$ Ом; $L=112$ нГн; $C=36,3$ пФ/м; $G = 0,7$ мкСм; $\text{tg}\delta=2\cdot 10^{-3}$; $R_{ins}=10^{12}$ Ом·м.

Комплексное волновое сопротивление кабеля, определенное по (1), носит, практически, активный характер: $7.1906e+002 - 5.7684e+000j$. Действительная часть в 125 раз превышает мнимую составляющую. Модуль волнового сопротивления равен 719 Ом, что значительно превышает типичные значения для кабелей коаксиальной конструкции: 93 Ом, 75 и 50 Ом. Комплексное продольное погонное сопротивление составляет $(1.4480 + 0.0001j)$, Ом/м: определяющим является действительная составляющая, обусловленная вкладом сопротивления металлического экрана (более чем в 10000 раз превышает индуктивную составляющую). Комплексная поперечная погонная проводимость равна $(2.8000e-006 + 4.5216e-008j)$ См/м: действительная часть более чем в 60 раз превышает мнимую (емкостную) составляющую. Высокие значения активной проводимости отображают процессы в полупроводящем экране по изоляции и водонабухающей ленте, а не в самой сшитой полиэтиленовой изоляции. Значение волнового сопротивления, определенное по упрощенной формуле (2) с учетом индуктивности и емкости кабеля, равно 57,5 Ом (близко к значению 50 Ом)! Для корректного моделирования процесса распространения зондирующего сигнала в изоляции силового кабеля волновое сопротивление принято равным 57,5 Ом.

Данные измерений параметров кабеля используются для определения параметров Т-звена при заданном числе M и длине l кабеля. Следующим шагом является составление схемы замещения кабельной линии методом дискретных резистивных схем замещения индуктивности и емкости с учетом начальных условий. На следующем шаге составляется система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) метода узловых потенциалов [4]

$$\bar{G} \cdot \bar{\varphi} = \bar{J},$$

где \bar{G} – трехдиагональная матрица коэффициентов – собственных ($G_{11}, G_{22}, \dots, G_{M+1, M+1}$) и взаимных ($G_{12}, G_{21}, \dots, G_{M, M+1}$) проводимостей ветвей

$$\begin{pmatrix} G_{11} & G_{12} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ G_{21} & G_{22} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & G_{32} & G_{33} & \dots & 0 \\ \dots & & & & & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & & & G_{M+1, M+1} \end{pmatrix},$$

где $\bar{\varphi}$ – искомая матрица-столбец узловых потенциалов, \bar{J} – матрица-столбец узловых токов.

СЛАУ решается методом прогонки. На каждом шаге дискретизации определяются токи, протекающие через индуктивность, и падения напряжений на емкостях.

Численный расчет выполнен при подключении к импульсному источнику ЭДС ($E=100$ В) силовой кабельной линии длиной 1 м на частоте 1 МГц. Длительность зондирующего прямоугольного импульса равна 4,0 нс. Сопротивления источника и нагрузки приняты равными 57,5 Ом.

На рис. 11 показан характер изменения формы и длительности зондирующего сигнала при распространении по кабельной линии: кривая 1 – кабель с волновым сопротивлением 57,5 Ом (измеренные параметры); кривая 2 – кабель с волновым сопротивлением 48 Ом (эксцентриситет между жилой и изоляцией); кривая 3 – кабель с волновым сопротивлением 60 Ом и параметрами изоляции: $R_{ins}=10^{11}$ Ом·м, $tg\delta=2\cdot 10^{-2}$ (водные триинги). Область I – начало линии, область II – середина линии. Влияние потерь в диэлектрике (имитация ВТ) на форму зондирующего импульса приведено на рис. 12: кривая 1 соответствует $tg\delta=2\cdot 10^{-4}$; кривая 2 – $tg\delta=2\cdot 10^{-3}$; кривая 3 – $tg\delta=2\cdot 10^{-1}$.

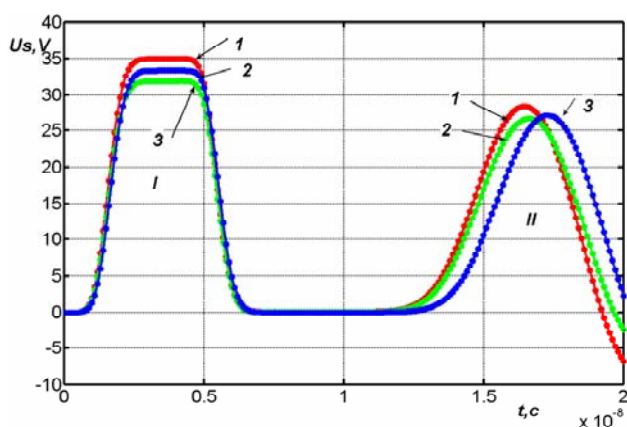


Рис. 11. Характер изменения формы и длительности зондирующего сигнала при распространении по кабельной линии при наличии дефектов, расположенных на расстоянии $\frac{1}{2}$ от начала линии

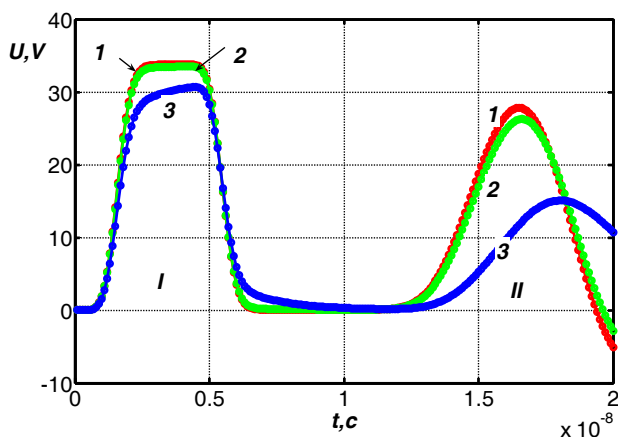


Рис. 12. Влияние потерь в диэлектрике, обусловленных наличием водных триингов, на форму зондирующего сигнала

Выводы. Наличие эксцентриситета и эллиптичности в конструкции кабеля по-разному влияют на распределение напряженности поля по жиле и изоляции. При эксцентриситете между жилой и изоляцией 10 % от радиуса жилы напряженность поля возрастает в 1,5 раза на жиле и в 1,17 раза – на поверхности изоляции. Напряженность на поверхности изоляции воз-

растает в два раза относительно напряженности на жиле при овальности изоляции.

Наличие в толще сшитой полиэтиленовой изоляции водных включений сферической формы приводит к повышению напряженности в 5-10 раз относительно среднего значения 2 кВ/мм в силовых высоковольтных кабелях. При таких напряженностях электрического поля в полиэтиленовой сшитой изоляции проявляются пороговые эффекты, в частности, нелинейный характер зависимости плотности тока от напряженности поля, зависимость диэлектрической проницаемости от приложенного высокого напряжения.

Результаты моделирования показывают, что наличие водных триингов в виде сосредоточенной неоднородности с индивидуальным волновым сопротивлением приводит к изменению формы и длительности зондирующего прямоугольного сигнала.

Рефлектометрию во временной области можно рассматривать как один из перспективных методов диагностики эксплуатационных неоднородностей (эллиптичности, эксцентриситета, водных триингов) в высоковольтных силовых кабелях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безпрозванных Г.В., Бойко А.М., Кессаев О.Г. Вплив конструктивних та технологічних неоднорідностей на хвильовий опір коаксіальних радіочастотних кабелів // Електротехніка і електромеханіка. – 2013. – №2. – С. 57-61. doi: 10.20998/2074-272X.2013.2.11.
2. Кессаев О.Г. Вплив на параметри передачі ексцентриситету та еліптичності коаксіальних радіочастотних кабелів // Вісник НТУ «ХПІ». – 2013. – №59. – С. 62-69.
3. Щерба А.А., Щерба М.А. Моделирование и анализ электрического поля в диэлектрической среде, возмущенного проводящими микровключениями разных размеров и конфигураций // Технічна електродинаміка. – 2010. – №6. – С. 3-9.
4. Безпрозванных А.В., Набока Б.Г. Математические модели и методы расчета электроизоляционных конструкций. – Х.: НТУ «ХПИ», 2011. – 92 с.
5. Безпрозванных А.В., Набока Б.Г., Москвитин Е.С. Обоснование электрофизических характеристик полупроводящих экранов силовых кабелей высокого напряжения со сшитой изоляцией // Електротехніка і електромеханіка. – 2010. – №3. – С. 44-47. doi: 10.20998/2074-272X.2010.3.10.
6. Безпрозванных А.В., Кессаев А.Г. Вычислительные эксперименты для расчета напряженности осесимметричного электростатического поля в кусочно-однородной изоляции со сферическими включениями // Електротехніка і електромеханіка. – 2014. – № 5. – С. 67-72. doi: 10.20998/2074-272X.2014.5.13.
7. Dissado L.A., Hill, R.M. The fractal nature of the cluster model dielectric response functions // Journal of Applied Physics. – 1989. – vol.66. – no.6. – pp. 2511-2524. doi: 10.1063/1.344264.
8. Chen Q., Burkes K., Makram E., Hadidi R., Xu X. Capacitance of Water Tree Modeling in Underground Cables // Journal of Power and Energy Engineering. – 2014. – vol.02. – no.11. – pp. 9-18. doi:10.4236/jpee.2014.211002.
9. Безпрозванных А.В., Кессаев А.Г., Щерба М.А. Частотная зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от степени увлажнения полиэтиленовой изоляции кабелей // Технічна електродинаміка. – 2016. – №3. – С. 18-24.
10. Burkes K., Makram E., Hadidi R. Modeling the effect of a water tree inside tape shield and concentric neutral cables // COMSOL Conference, Boston, September 25, 2014. – 8 p.

REFERENCES

1. Bezprozvannykh G.V., Boyko A.N., Kyessayev A.G. Influence of constructive and technological defects on coaxial radio-frequency cable impedance. *Electrical engineering & electromechanics*, 2013, no.2, pp. 57-61. (Ukr). doi: 10.20998/2074-272X.2013.2.11.
2. Kyessayev A.G. Impact on the transmission parameters eccentricity and ellipticity RF coaxial cables. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2013, no.59, pp. 62-69. (Ukr).
3. Shcherba A.A., Shcherba M.A. Modeling and analysis of the electric field in a dielectric medium, perturbed conductive microscopic inclusions of various sizes and configurations. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2010, no.6, pp. 3-9. (Rus).
4. Bezprozvannykh A.V., Naboka B.G. *Matematicheskie modeli i metody rascheta elektroizoljacionnykh konstrukcij* [Mathematical models and methods of calculation electrical insulation constructions]. Kharkov, NTU «KhPI» Publ., 2011. 92 p. (Rus).
5. Bezprozvannykh G.V., Naboka B.G., Moskvitin E.S. Substantiation of electrophysical characteristics of high-voltage power cable semiconducting screens with stitched insulation. *Electrical engineering & electromechanics*, 2010, no.3, pp. 44-47. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2010.3.10.
6. Bezprozvannykh A.V., Kyessayev A.G. Computing experiments for calculation of electrostatic axisymmetric field in piecewise-homogeneous insulation with spherical inclusions. *Electrical engineering & electromechanics*, 2014, no.5, pp. 67-72. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2014.5.13.
7. Dissado L.A., Hill, R.M. The fractal nature of the cluster model dielectric response functions. *Journal of Applied Physics*, 1989, vol.66, no.6, pp. 2511-2524. doi: 10.1063/1.344264.
8. Chen Q., Burkes K., Makram E., Hadidi R., Xu X. Capacitance of Water Tree Modeling in Underground Cables. *Journal of Power and Energy Engineering*, 2014, vol.02, no.11, pp. 9-18. doi:10.4236/jpee.2014.211002.
9. Bezprozvannykh A.V., Kessaev A.G., Shcherba M.A. Frequency Dependence of Dielectric Loss Tangent on the Degree of Humidification of Polyethylene Cable Insulation *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2016, no.3, pp. 18-24. (Rus).
10. Burkes K., Makram E., Hadidi R. Modeling the effect of a water tree inside tape shield and concentric neutral cables. *COMSOL Conference*, Boston, September 25, 2014. 8 p.

Поступила (received) 19.09.2016

Безпрозванных Анна Викторовна¹, д.т.н., проф.,
 Кессаев Александр Геннадиевич¹, аспирант,
¹Национальный технический университет
 «Харьковский политехнический институт»,
 61002, Харьков, ул. Кирпичева, 21,
 тел/phone +38 057 7076010,
 e-mail: bezprozvannykh@kpi.kharkov.ua

G.V. Bezprozvannykh¹, A.G. Kyessayev¹

¹National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
 21, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

The technological and exploitative factors of local increase of electric field strength in the power cable of coaxial design.

Introduction. Reliability of high voltage power cables in the process of long-term operation is largely due to the intensity of polymeric insulation aging. It is now established that the aging of polyethylene, which is the main material for the insulation of high voltage power cables, under the action of the electric field is determined primarily by the presence of structural heterogeneity arising both during cable production and during use. The cable is always there deviations from the ideal structure, which manifest in a deviation of diameters of conductors from nominal values; in the arrangement of the conductor and the insulation is not strictly coaxially and eccentrically; in elliptic (oval) core and insulation; change in relative dielectric constant and thickness of insulation on cable length force the formation of low molecular weight products (including water) in the flow at the manufacturing stage crosslinked polyethylene insulation and moisture during operation. Such defects are structural, technological and operational irregularities, which lead to a local change in the electric field. **Purpose.** Analysis of the influence of the eccentricity, elliptic and spherical inclusions in the electric field distribution in the power cable of a coaxial design with cross-linked polyethylene insulation, based on numerical simulation. **Methodology.** The bases of the numerical method of calculation of the electrical field strength are Fredholm integral equations of the first and second kind (method of secondary sources) for an axially symmetric field. Analysis of the influence of irregularities, including water treeing, the shape of the sounding signal is made using the method of discrete resistive circuit inductance and capacitance of substitution with the initial conditions. Solving systems of linear algebraic equations nodal analysis performed by the sweep method. **Results.** The presence of the eccentricity and ellipticity in the construction of cable has different effects on the distribution of the electrical field strength at the conductor and the insulation. The electrical field strength is increased by 50 % in the core and 17 % - on the surface of the insulation at 10 % eccentricity between conductor and insulation. Availability elliptic insulation leads to a redistribution of the electric field: field strength at the surface of the insulation is 2 times higher electric field strength on the surface of the conductor. Water treeing spherical shape filled with water with a dielectric constant of 6.9, lead to a local increase of electric field intensity is 5 - 10 times. **Originality.** Simulation results show that the presence of water treeing concentrated with individual heterogeneity characteristic impedance causes a change in shape and duration of the probe signal rectangular. **Practical value.** Time domain reflectometer can be considered as one of the promising methods for diagnosing operational irregularities (ellipticity, eccentricity, water treeing) in power cables. References 10, figures 12.
Key words: eccentricity, ellipticity of insulation, water treeing, electric field strength, the wave impedance, the probe pulse.