

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ, ПРОНИКАЮЩЕГО В ИЗОЛЯЦИЮ ЗАКОРОЧЕННОЙ ЖИЛЫ СЕТЕВОГО КАБЕЛЯ

к.т.н. С.В. Рудаков
(представил д.т.н., проф. А.М. Крюков)

Предлагается методика расчета электростатического поля, которое проникает в изоляцию отдельных жил сетевых кабелей, путем закорачивания некоторых электродов с дальнейшим решением системы алгебраических уравнений.

Постановка проблемы. В сетевых кабелях контроль характеристик (частичной емкости, угла диэлектрических потерь) каждой из компонент (полиэтилен, ПВХ-пластикат) изоляции по отдельности невозможен.

Рассмотрим поле экранированной витой пары сетевого кабеля. Она содержит три электрода: две жилы и экран (рис. 1). Это дает возможность создавать в ней разные структуры электрического поля, концентрируя его, в основном, в изоляции одной жилы, или в изоляции другой, или в промежутке между ними. Электроды из участка изоляции, который необходимо исключить из контроля, закорачиваются. Часть силовых линий при этом, все-таки проникнет в закороченную часть изоляции, вызывая потери в ней (диэлектрические потери и потери на сквозную проводимость).

Анализ литературы. Существует несколько методов нахождения характеристик одного (искомого) компонента на фоне совокупных измерений: частотный, временной, пространственный [1 – 3]. При использовании этих методов не учитывается частичное проникновение электромагнитного поля в изоляцию отдельных элементов кабеля (полупроводящее покрытие, защитная внутренняя и внешняя оболочка). Необходимо учесть погрешность измерения, возникающую при таком влиянии полей.

Цель статьи. Разработать методику расчета электростатического поля, проникающего в изоляцию закороченной жилы сетевого кабеля.

Расчетная модель и методика расчета. Для оценки степени проникновения зондирующего поля в закороченную часть изоляции выполним расчет электростатического поля. Рассмотрим два вида испытательных схем (рис. 2): а) “две жилы – экран”; б) “жила – против второй жилы и экрана совместно”. В расчетной модели учтем различие диэлектрических проницаемостей межфазного заполнения (ϵ_1) и изоляции жил (ϵ_2). Расчет выполним методом вто-

ричных зарядов, т.е. от расчетов поля в исходной задаче перейдем к расчету поля в вакууме. Расчетные модели содержат поверхности, совпадающие с границами раздела сред исходной задачи.

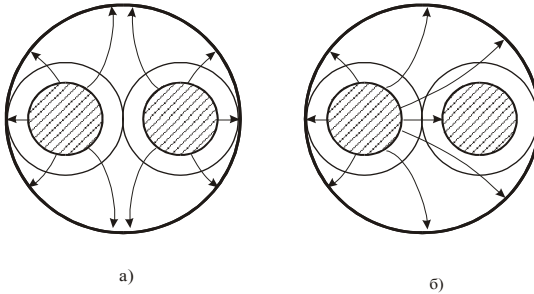


Рис. 2. Характер силовых линий поля при разных схемах испытаний.

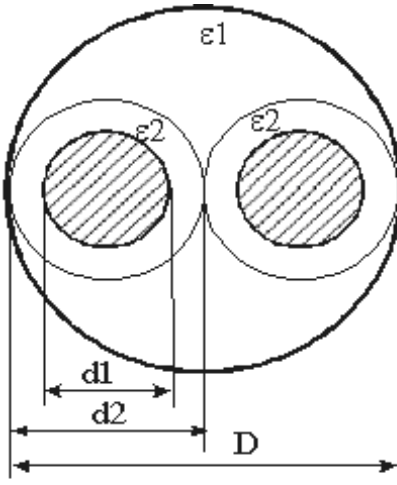


Рис. 1. Сетевой кабель

На поверхностях следует расположить заряды (так называемые вторичные заряды) и подобрать их плотности σ , Кл/м² так, чтобы достигались заданные потенциалы и выполнялись граничные условия равенства нормальных составляющих вектора электрического смещения. Тогда поле модели будет идентично полю исходной задачи. Испытуемый отрезок кабеля изогнут по форме окружности радиуса R_0 . Именно в таком виде он и помещается в испытательную камеру. Поэтому его поле – осесимметричное.

Система интегральных уравнений может быть представлена в виде:

а) для узлов, расположенных на поверхностях электродов, записываются интегральные уравнения Фредгольма первого рода:

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \sigma(M) \cdot 4R_M \cdot K(k) \cdot dl_M / \sqrt{(Z_Q - Z_M)^2 + (R_Q + R_M)^2} = \varphi(Q), \quad (1)$$

где $K(k)$ – полный эллиптический интеграл первого рода;

$$k = \sqrt{4R_Q R_M / ((Z_Q - Z_M)^2 + (R_Q + R_M)^2)},$$

где R_Q, Z_Q – цилиндрические координаты точки Q , в которой ищется потенциал; R_M, Z_M – цилиндрические координаты точки M , в которой расположен заряд; dl_M – длина участка образующей с центром в точке M ; $\sigma(M)$ – плот-

ность вторичного заряда на этом участке ($\text{Кл}/\text{м}^2$); ε_0 – электрическая постоянная; $\varphi(Q)$ – заданный потенциал точки Q;

б) для узлов, расположенных на границе раздела диэлектрических сред, записываются интегральные уравнения Фредгольма второго рода, отражающие условие неизменности нормальной составляющей вектора электрического смещения при переходе через эту границу:

$$\frac{\sigma(Q)}{2\varepsilon_0} - \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 + \varepsilon_1} \int (\mathbf{n}_R \cdot d\mathbf{E}_R + \mathbf{n}_Z \cdot d\mathbf{E}_Z) = 0, \quad (2)$$

где \mathbf{n}_R , \mathbf{n}_Z – единичные векторы нормали к границе раздела диэлектрических сред ε_2 и ε_1 ; ε_2 и ε_1 – относительные диэлектрические проницаемости сред, граничащих в точке Q со стороны отрицательного (ε_2) и положительного (ε_1) направления нормали; $d\mathbf{E}_R$, $d\mathbf{E}_Z$ – радиальная и осевая компоненты вектора напряженности поля, создаваемого в точке Q кольцевым зарядом из точки M.

$$d\mathbf{E}_R = \frac{\sigma(M) \cdot dl_M}{4\pi\varepsilon_0 R_Q} \sqrt{\frac{R_M}{R_Q}} k^2 \left\{ \frac{k}{2} K(k) \left(\frac{R_Q}{R_M} + 1 \right) - K'(k) \left[1 - \frac{k^2}{2} \left(\frac{R_Q}{R_M} + 1 \right) \right] \right\};$$

$$d\mathbf{E}_Z = \frac{\sigma(M) \cdot dl_M}{4\pi\varepsilon_0 R_Q} \cdot \frac{k^3 (Z_Q - Z_M)}{2\sqrt{R_Q R_M}} [K(k) + k \cdot K'(k)],$$

где $K'(k)$ – производная полного эллиптического интеграла по параметру k .

Интегрирование в (1) и (2) осуществляется по всем образующим кольцевых поверхностей осесимметричной модели. Выполним дискретизацию образующих и проведем нумерацию узлов сначала тех, которые относятся к электродам (узлы с номерами от 1 до N_e), а затем и остальных N_d узлов, расположенных на границах раздела диэлектрических сред. Их номера будут от $N_e + 1$ до $N = N_e + N_d$. Тогда (1) и (2) приведут к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) вида

$$\bar{A} \cdot \bar{\sigma} = \bar{U}, \quad (3)$$

где \bar{A} – квадратная матрица коэффициентов, элементы которой a_{ij} находятся по формулам [4]:

$$a_{ij} = \begin{cases} \left. \begin{aligned} &1/4\pi\varepsilon_0 \cdot (4R_j \cdot K(k_{ij}) \cdot \Delta l_j) / \sqrt{(Z_i - Z_j)^2 + (R_i + R_j)^2}, \quad \forall i \neq j; \\ &1/2\pi\varepsilon_0 \cdot \text{Ln}(16R_j \varepsilon / \Delta l_j) \cdot \Delta l_j, \quad \forall i = j; \end{aligned} \right\} i = 1 \div N_e; \\ \left. \begin{aligned} &1/2\varepsilon_0, \quad \forall i = j; \\ &-(\mathbf{n}_R \cdot d\mathbf{E}'_R + \mathbf{n}_Z \cdot d\mathbf{E}'_Z)(\varepsilon_2 - \varepsilon_1) / (\varepsilon_2 + \varepsilon_1), \quad \forall i \neq j; \end{aligned} \right\} i = N_e + 1 \div N,$$

где dE'_R , dE'_Z – компоненты вектора напряженности, создаваемые единичным зарядом (плотностью 1 Кл/м^2); i, j – индексы точек, где ищутся характеристики поля (i) и расположены заряды (j); $\bar{\sigma}$ – матрица-столбец неизвестных плотностей вторичных зарядов; \bar{U} – матрица-столбец, первые N_c членов которой отражают заданные потенциалы узлов, лежащих на электродах, а остальные – равны нулю.

Численно решая СЛАУ (3), найдем плотности искомого вторичных зарядов. Тогда напряженности электростатического поля найдутся по формулам:

а) для поверхностей электродов

$$E_i = \frac{\sigma_i}{\varepsilon_0}, \quad (4)$$

б) для границ раздела диэлектрических сред (нормальная составляющая напряженности)

$$E_i = \frac{\sigma_i}{2\varepsilon_0} \left(1 \pm \frac{1}{\alpha} \right), \quad (5)$$

где $\alpha = (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) / (\varepsilon_2 + \varepsilon_1)$.

Формула (4) следует из теоремы Гаусса-Остроградского для элементарного цилиндра, охватывающего узел, расположенный на поверхности электрода. Образующая этого цилиндра является нормалью к поверхности электрода, а оба основания – параллельны.

Формула (5) получается аналогично для узла, расположенного на границе раздела диэлектрических сред. В этом случае собственное поле элементарного заряда $\Delta\sigma$, попавшего в цилиндр, существует по обе стороны заряда, в результате чего напряженность поля уменьшается в 2 раза (см. первое слагаемое в (2) и соответственно число 2 в знаменателе (5)). Действие же всех остальных зарядов, не попавших в цилиндр, отражается вторым слагаемым в (2) и численно равно собственному полю заряда $\Delta\sigma$, разделенному на безразмерный коэффициент α .

В (5) знак “+” выбирается при нахождении поля со стороны положительного направления нормали к границе раздела сред, а “-” – со стороны отрицательного направления. В дальнейшем находилась напряженность поля в воздушных прослойках, а поскольку векторы нормалей всех круговых границ раздела сред были ориентированы нами единообразно – наружу, то и потребовалось введение двух знаков в (5): первый знак выбирался, когда воздушная прослойка оказывалась снаружи круговой границы, второй – когда внутри.

Результаты расчетов поля. Рассчитывалась напряженность поля в заданных точках внутри изоляции каждой из жил (1 и 2). Затем рассчи-

ывались энергии электростатического поля в изоляции незакороченной жилы – W_1 и закороченной жилы – W_2 . Отношение W_2/W_1 – коэффициент степени проникновения поля в изоляцию электродов и, по сути, является методической погрешностью измерений, возникающей при влиянии полей. Оно приведено в таблице для ряда значений толщины изоляции и соотношений диэлектрических проницаемостей сред.

Таблица 1

Коэффициент степени проникновения поля в изоляцию электродов

δ/R	ϵ_2 / ϵ_1	
	1	2,1
0,5	0,134	0,157
1,0	0,0906	0,117
2	0,0616	0,086

Как видно из таблицы, энергия электростатического поля в изоляции закороченной жилы может составлять $0,0616 \div 0,157$ от энергии поля в изоляции незакороченной жилы. Для кабеля с полиэтиленовой изоляцией и типовым соотношением $\delta/R = 1$ величина $W_2/W_1 = 0,117 \approx 12\%$.

Выводы. 1. Предложена расчетная модель влияния зондирующего электростатического поля на погрешность результата измерения изоляции отдельных компонент сетевых кабелей.

2. Проведена оценка числового значения относительной погрешности измерения напряженности поля в изоляции кабелей, которое позволило учесть влияние зондирующего электромагнитного поля при контроле параметров изоляции сетевых кабелей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шалыг Г.М. *Определение мест повреждения в электрических сетях.* – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 312 с.
2. Койков С.Н. *Перспективы развития неразрушающих методов диагностики электрической изоляции // Труды НТК «Изоляции-99».* – СПб. – 1999. – С. 12 – 13.
3. Боев М.А. *Техническая диагностика низковольтной полимерной изоляции // Труды НТК «Изоляции-99».* – СПб. – 1999. – С. 19 – 20.
4. Набока Б.Г. *Расчеты электростатических полей в электроизоляционной технике.* – К.: ИСИО, 1995. – 120 с.

Поступила 16.01.2004

РУДАКОВ Сергей Валерьевич, канд. техн. наук, преподаватель кафедры ХВУ. В 1996 году окончил ХВУ. Область научных интересов – методы исследования параметров изоляции электрических кабелей.