

Математическое моделирование электрического поля

в муфтах силовых кабелей

Проектирование и производство конкурентоспособной кабельной арматуры требует решения вопроса о снижении неравномерности распределения электрического поля в муфтах силовых кабелей. Это решение должно соответствовать современному уровню развития технологической базы в части разработки и производства различных полупроводящих компаундов. Для выбора определенных физических характеристик материалов необходимо математическое моделирование электрического поля с применением специализированных пакетов прикладных программ. Оптимальным вариантом является использование комплекса инструментов для моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач ELCUT.

Георгий Грешняков, к. т. н.

geogresh@rambler.ru

Семен Дубицкий

Основные уравнения

В основу математической модели положена задача анализа электрического поля в присутствии токов утечки в полупроводящих слоях. В условиях низкой электрической проводимости ток оказывается малым и не возбуждает магнитного поля. Точнее,

магнитное поле токов проводимости (утечки) столь мало, что ЭДС электромагнитной индукции $E = \partial A / \partial t$ неотличима от нуля. Таким образом, уравнения, описывающие поле, в этом случае имеют вид:

$$\text{теорема Гаусса} \quad \text{div } \vec{D} = \rho; \quad (1)$$

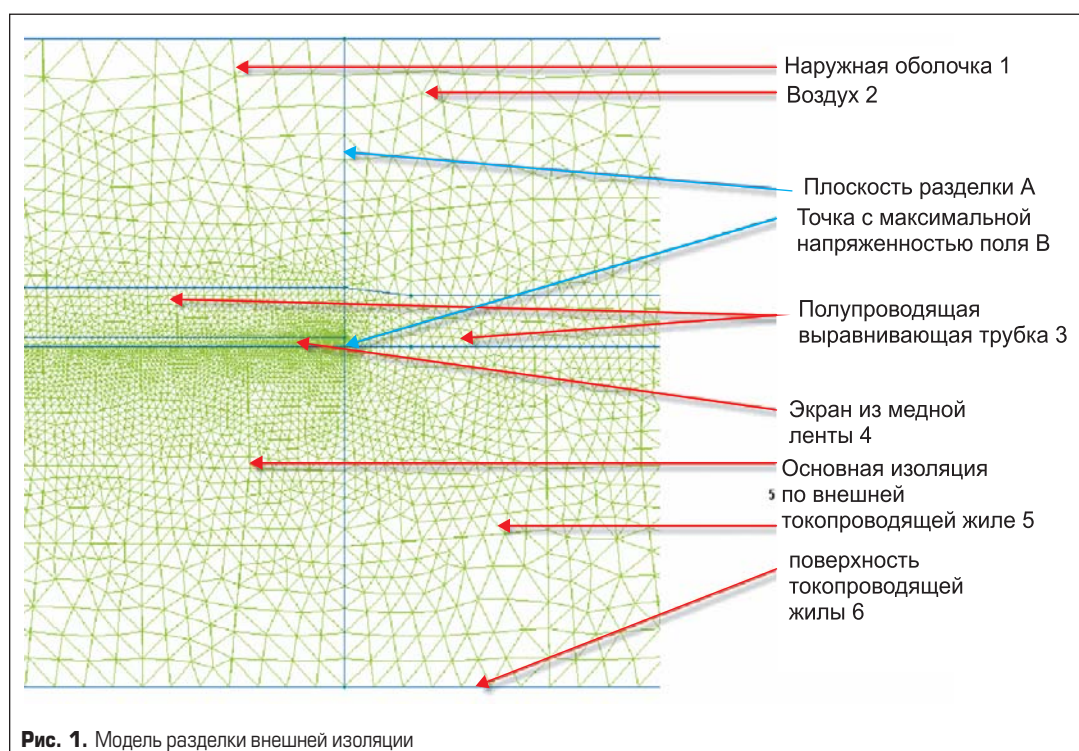


Рис. 1. Модель разделки внешней изоляции

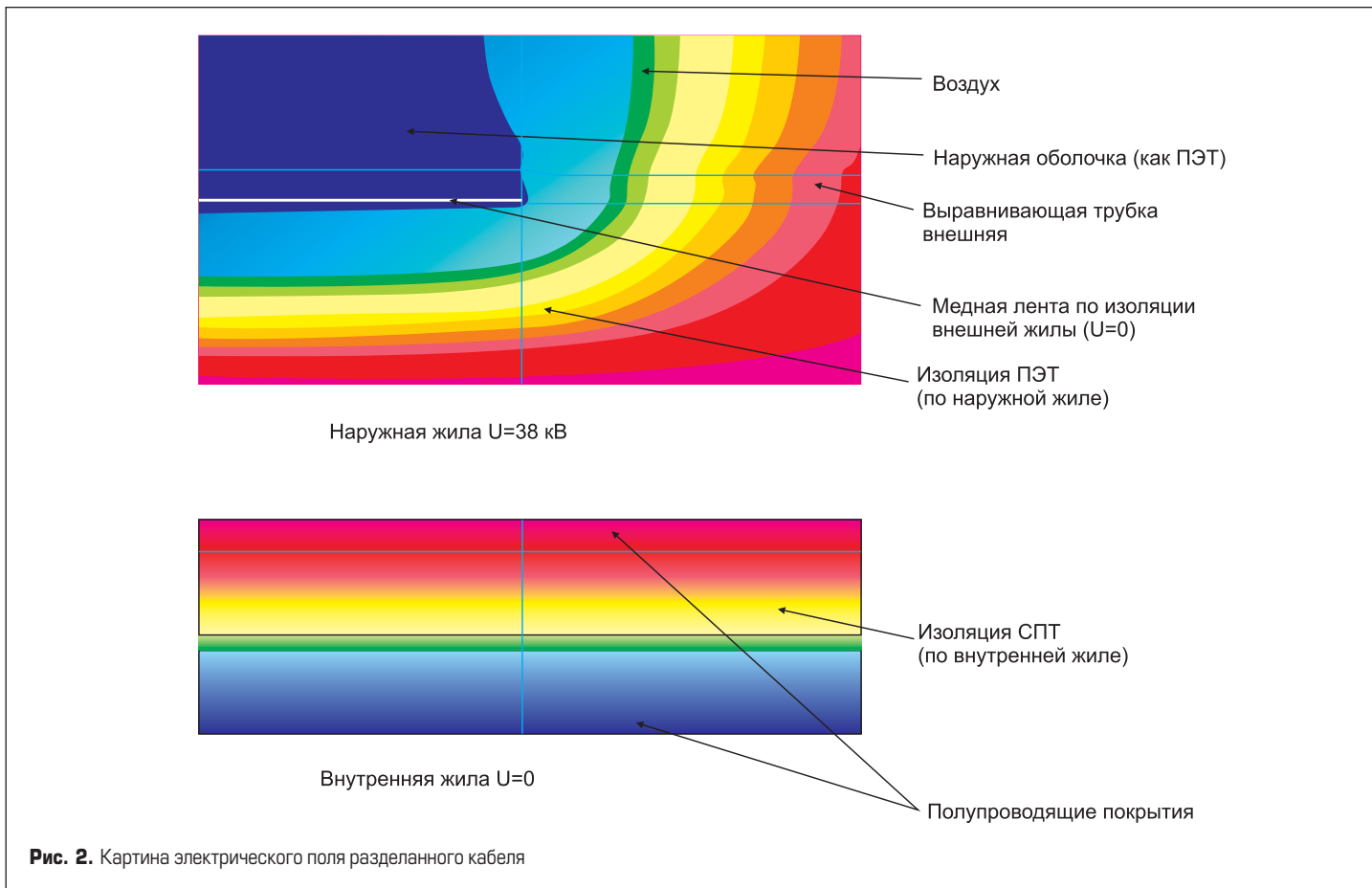


Рис. 2. Картина электрического поля разделанного кабеля

закон непрерывности тока — $div \vec{I} = \sigma \times \vec{E}$; (2)

закон Ома — $\vec{I} = \sigma \times \vec{E}$; (3)

свойство диэлектрика — $\vec{D} = \epsilon \times \vec{E}$; (4)

электрический потенциал — $\vec{E} = -gradU$; (5)

нелинейности — $\epsilon = \epsilon(E)$ и $\sigma = \sigma(E)$. (6)

Преобразование (2) путем подстановки туда (3) и (1) приводит к соотношению:

$$div(\sigma \vec{E}) + \frac{\partial (div \vec{D})}{\partial t} = 0. \quad (7)$$

Относительно потенциала U уравнение выглядит следующим образом:

$$div(-\sigma \cdot gradU) + \frac{\partial}{\partial t} div(-\epsilon \cdot gradU) = 0. \quad (8)$$

Формулировка задачи основана на уравнении Пуассона, описывающего электростатическое поле,

$$\nabla \cdot \epsilon E = \rho, \quad (9)$$

и уравнении растекания токов в проводящей среде

$$\nabla \cdot j = -i\omega\rho, \quad (10)$$

при учете закона Ома,

$$j = gE. \quad (11)$$

Тогда уравнение для потенциала U приобретает окончательный вид:

$$\nabla \cdot \left(\left[\epsilon - \frac{ig}{\omega} \right] \nabla U \right) = 0 \quad (12)$$

где электропроводность g и компоненты тензора диэлектрической проницаемости ϵ_z и ϵ_y (ϵ_z и ϵ_y) постоянны внутри каждого блока модели.

Моделирование поля в концевой разделке

Изложенный подход применен для решения практической задачи по выбору характеристик материала регулирующего (выравнивающего) слоя концевой муфты силового коаксиального кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена. Изоляция кабеля является двухслойной: первый слой расположен между внутренним и внешним проводниками, второй — между внешним проводником и металлическим экраном. Для моделирования влияния параметров выравнивающей трубки в месте разделки кабеля выбрана упрощенная геометрическая модель (рис. 1).

Здесь представлено продольное сечение кабеля в месте разделки наружной оболоч-

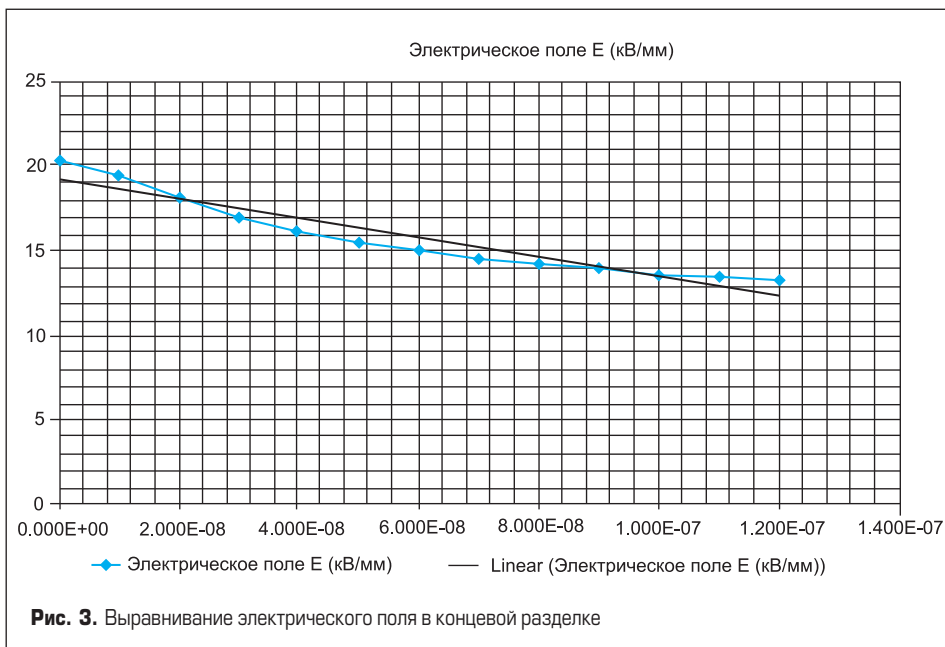


Рис. 3. Выравнивание электрического поля в концевой разделке

ки. Вертикальная линия (на рис. 1 она синего цвета) представляет собой след плоскости разделки А. Она прерывает наружную оболочку кабеля (1) и экран из медной ленты (4), нанесенный поверх изоляции токопроводящей жилы (6). Основная изоляция (5) и жила (6) в плоскости разделки не прерываются.

Для выравнивания электрического поля поверх основной изоляции и медного экрана натягивается выравнивающая трубка (3) из полупроводящего материала с нелинейными электрическими свойствами. Слева от плоскости разделки она охватывает изоляцию вместе с медным экраном; справа — только слой изоляции. Моделирование электрического поля показывает, что максимальное значение напряженности E принимает в месте пересечения плоскости разделки с внешней поверхностью изоляции (точка В). Задачей расчета является анализ зависимости максимальной напряженности поля от параметров выравнивающей трубки.

Картина электрического поля при потенциале внешнего проводника $U = 38$ кВ частоты 50 Гц представлена на рис. 2, причем цветной заливкой показано распределение электрического потенциала.

Результаты моделирования при разной проводимости материала

Проведена серия расчетов при фиксированных размерах изоляционной конструкции с варьированием электропроводности материала выравнивающего слоя (трубки-регулятора). Результаты моделирования представлены на графике (рис. 3).

В таблице приведены результаты расчетов в виде картин электрического поля при разных значениях электропроводности выравнивающего слоя.

Все расчеты производились с помощью специализированного пакета прикладных программ ELCUT-5.6 — профессиональная версия.

Заключение

Изложены ключевые этапы анализа электрического поля в муфте с целью снижения его неравномерной напряженности. Сформулирована задача и приведены основные уравнения, лежащие в основе математической модели. Представлена геометрическая модель концевой разделки силового кабеля. Приведены результаты расчета поля при различных значениях удельной проводимости материала регулирующего слоя.

Литература

1. Грешняков Г. В., Нарышкин Е. В. Импульсный низкоиндуктивный высоковольтный кабель // Силовая электроника. 2009. № 4.
2. Дубицкий С. Д. Elcut 5.1 — платформа разработки приложений анализа полей // Exponenta Pro. 2004. № 1.

Таблица. Картина поля в муфте при разных значениях проводимости регулирующего слоя

Проводимость, См/м	Электрическое поле E, кВ/мм	Картина поля
0,000E+00	20,24714743	
1,000E-08	19,40508165	
2,000E-08	18,07956036	
3,000E-08	16,98768991	
4,000E-08	16,15279372	
5,000E-08	15,50528949	
6,000E-08	14,98959164	
7,000E-08	14,56851324	
8,000E-08	14,21734703	
9,000E-08	13,91929396	
1,000E-07	13,66256808	
1,100E-07	13,43867759	
1,200E-07	13,24135445	