

# Комбинированный способ снижения неравномерности

## 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 программ для моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач ELCUT.**

Георгий Грешняков, к. т. н.  
Семен Дубицкий

geogresh@rambler.ru

### Введение

Известен ряд способов выравнивания электрического поля в кабельных муфтах: геометрический, импедансный, нелинейный импедансный, рефракционный. Современный уровень технологий позволяет реализовывать перечисленные методы с помощью термоусаживаемых кабельных муфт и муфт холодной усадки. Лидером на мировом рынке термоусаживаемой кабельной арматуры является немецкая фирма RAUSCHEM и ее многочисленные филиалы. Продукция компании пользуется неизменным спросом благодаря высокой надежности и хорошим эксплуатационным характеристикам. В России крупнейшими разработчиками и производителями различных видов термоусаживаемых кабельных муфт на напряжение до 35 кВ являются ЗАО «Термофит» (г. Санкт-Петербург) и «Мемотерм-ММ» (г. Москва). Технология холодной усадки была впервые предложена компанией Minnesota Mining Manufacturing (с 2002 г. — 3M) в 1968 г.

### Термоусаживаемые муфты и муфты холодной усадки

В обоих случаях — термоусадки и холодной усадки — для достижения требуемого эффекта используются материалы сетчатой кристаллической структуры, которая позволяет им растягиваться и сжиматься, возвращаясь к первоначальной форме. В технологии холодной усадки это EPDM-резина или силикон, а в технологии термоусадки — термопластичные полимеры EVA. Муфта холодной усадки на протяжении всего срока службы создает постоянное радиальное прижимное давление на кабель, а термоусаживаемая муфта — нет.

При термоусадке после того как источник нагрева убирают, кристаллические области материала затвердевают и становятся жесткими. В дальнейшем это состояние сохраняется: кабель расширяется/сжи-

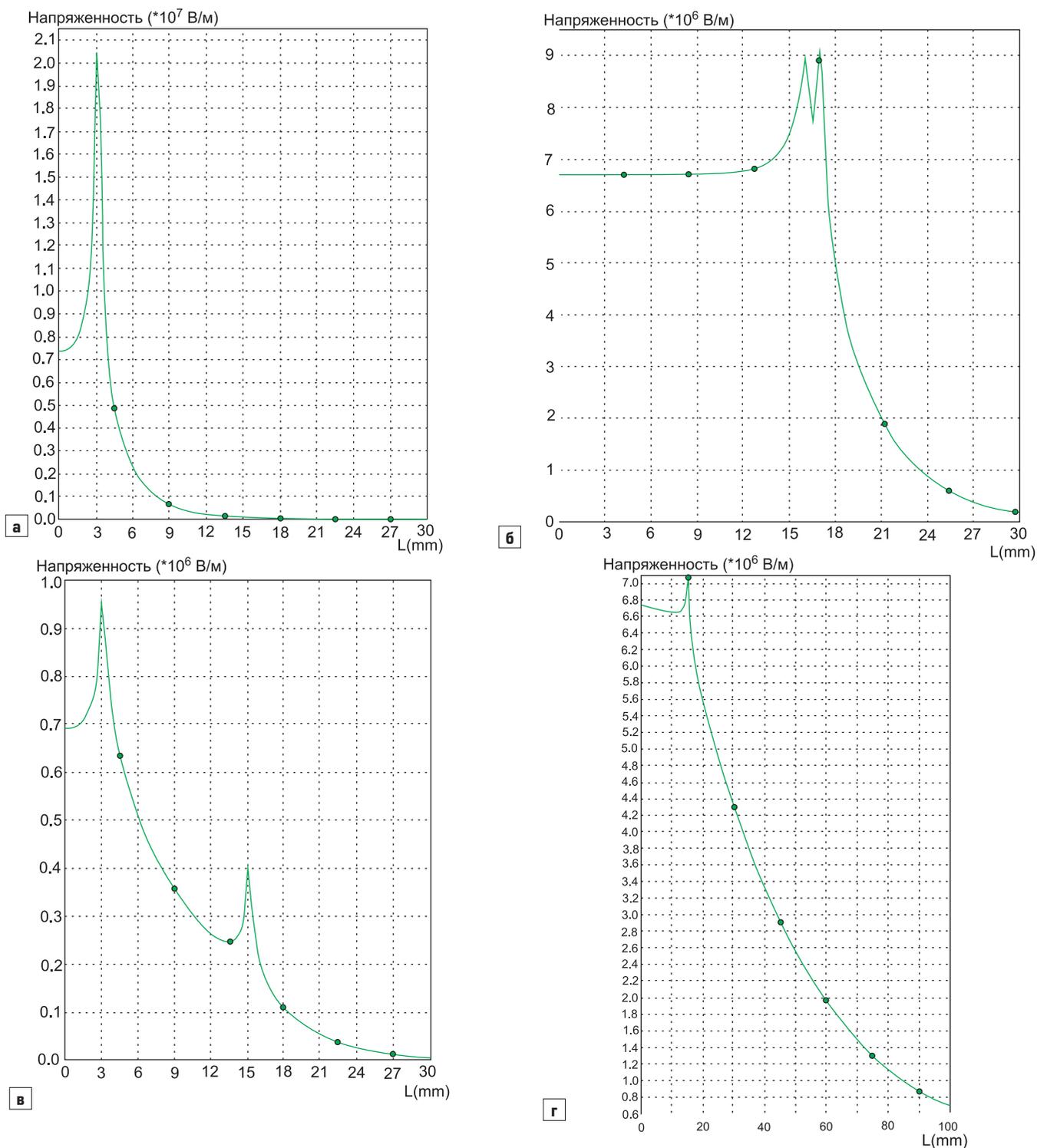
мается при повышенных нагрузках или колебаниях температуры, но форма муфты остается неизменной. В связи с этим в большинстве изделий, работающих по технологии термоусадки, для обеспечения герметичности соединения муфты используют термопластичные клеи и мастики.

Муфта холодной усадки повторяет движения кабеля, что особенно ценно в ситуациях с большими скачками нагрузки или значительными перепадами температуры. По мере того как кабель под воздействием перепадов температуры расширяется и сжимается, вместе с ним расширяется и сжимается муфта, сохраняя герметичное уплотнение.

Геометрический метод выравнивания электрического поля основан на постепенном расширении экрана путем наложения на место среза оболочки кабеля конуса из проводящего материала. Рефракционный метод выравнивания электрического поля основан на наложении на место среза оболочки кабеля материала с высокой относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ , на порядок превышающей диэлектрическую проницаемость основной изоляции.

### Комбинированный метод снижения напряженности

Сочетание описанных методов приводит к снижению тангенциальной составляющей напряженности электрического поля в местах обрыва оболочек и экранов (нарушения заводской изоляции кабельных изделий). Например, муфта может представлять собой двуслойную трубку: внешняя изготавливается из этиленпропиленовой резины EPDM с изоляционными свойствами, а внутренняя выполняет функцию выравнивания электрического поля в разделке кабеля, то есть является трубкой-регулятором. При математическом моделировании муфты была решена серия задач с целью оптимизации геометрии и физических свойств трубки-регулятора.

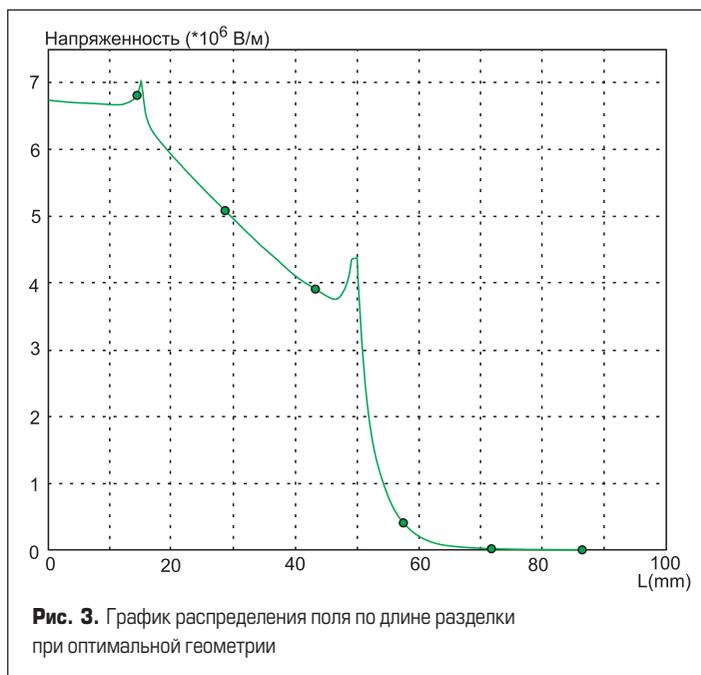
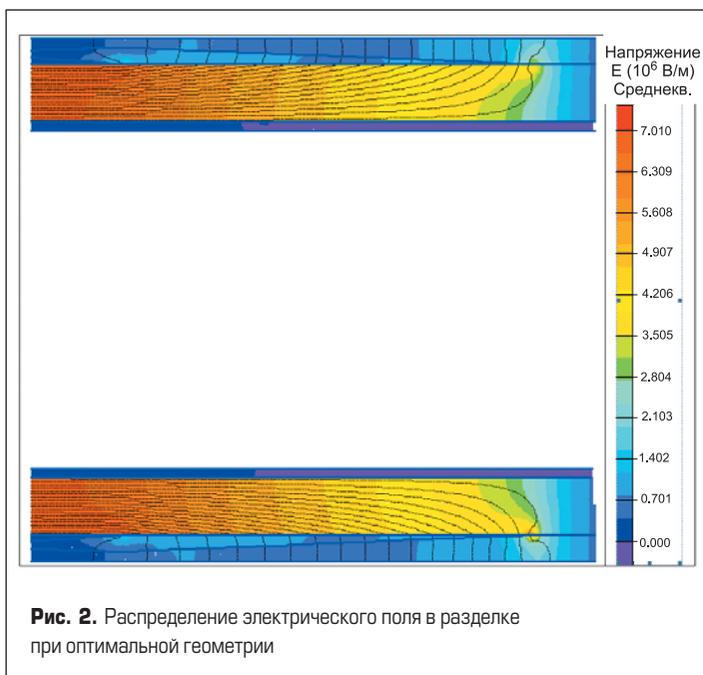


**Рис. 1.** Распределение поля по длине разделки: а) трубка-регулятор из полиэтилена; б) без муфты; в) этиленпропиленовая резина, срез под 90°; г) конус из этиленпропиленовой резины на всю длину разделки

Проведены расчеты распределения электрического поля в концевой разделке кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена при поперечном сечении токоведущей медной жилы 400 кв. мм. Между жилой и экраном приложено испытательное напряжение 38 кВ промышленной частоты 50 Гц. На рис. 1 приведены графики зависимости напряженности  $E$  поля от линейной координаты  $x$  при различных конфигурациях трубки-регулятора и фиксированных значениях относительной диэлектрической проницаемости при определенном

соотношении между составляющими тензора электрической проводимости композиционного материала трубки-регулятора на основе EPDM-резины. Характер анизотропии, то есть соотношение между составляющими тензора проводимости (задача двухмерная)  $x$  и  $y$ , рассчитывался по результатам предварительного анализа влияния проводящих свойств на характер поля. В результате выявлен оптимальный случай, когда отношение продольной ( $x$ ) к поперечной ( $y$ ) составляющей проводимости находится в пределах 10–12.

Критерием оптимальности варианта является минимум действующего значения напряженности электрического поля  $E_{min}$  в критических точках разделки. Результаты расчета в оптимальном случае дают значение  $E_{min} = 6,9$  кВ/мм. Относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  композита выбиралась в пределах 22–24. Рассмотрены варианты конусного, спрямленного, срезанного края границы полупроводящего экрана по заводской изоляции кабеля и сопряженного края трубки-регулятора. Исследовано



влияние длины трубки-регулятора на величину  $E_{min}$ . Из результатов расчета следует, что трубка-регулятор должна иметь форму полого цилиндра с противоположными концами в виде полых усеченных конусов, имеющих определенную длину и фиксированный угол между образующими и продольной осью кабеля. Оптимальный вариант продемонстрирован на рис. 2, 3. В общем случае для трубки-регулятора может быть использована смесь эластичного полимерного материала (например, этиленпропиленовая или силиконовая резины) с мелкодисперсным токопроводящим наполнителем (сажа или металлическая пыль). Проведенные расчеты подтверждают преимущества применения в качестве ма-

териала трубки-регулятора EPDM-резины с наполнением сажей.

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

### Заключение

Предложен комбинированный способ снижения неоднородности электрического поля в муфтах холодной усадки силовых кабелей, основанный на сочетании геометрического и импедансного методов выравнивания. Такой подход позволит упростить технологию производства регулирующего слоя и повысить надежность кабельной арматуры.

### Литература

1. Грешняков Г. В., Нарышкин Е. В. Импульсный низкоиндуктивный высоковольтный кабель // Силовая электроника. 2009. № 4.
2. Грешняков Г. В., Коровкин Н. В., Куликов А. В. Импульсный низкоиндуктивный высоковольтный силовоточный кабель / Сб. Тезисы докладов международного симпозиума по электромагнитной совместимости и экологии. СПб. 2009.
3. Дубицкий С. Д. ELCUT 5.1 — платформа разработки приложений анализа полей // Exponenta Pro. 2004. № 1.
4. Котов Р. В. Распределение электрического поля в кабельных муфтах холодной усадки // Электро. 2006. № 5.