

К вопросу о конструировании кабельных муфт высокого напряжения

Основной проблемой при разработке и конструировании высоковольтной кабельной арматуры является обеспечение снижения неравномерности распределения электрического поля в усиливающей изоляции кабельной муфты. В работе описаны современные способы выравнивания поля и предложен комбинированный метод, сочетающий достоинства геометрического регулирования и эффекта преломления линий поля на границе раздела сред с различными электрическими свойствами. Выполнен численный анализ распределения поля, на основе которого определены проблемные зоны и предложена конфигурация активных элементов и свойства материалов стресс-конуса.

Георгий Грешняков

g.greshnyakov@gmail.com

Семен Дубицкий

simon.dubitsky@quickfield.com

Николай Коровкин

nikolay.korovkin@gmail.com

Причиной отклонения распределения электрического поля от равномерного является разность емкостных токов через усиливающую изоляцию муфты на землю и через изоляцию кабеля на жилу [1, 2]. Поскольку изменять величину емкости на жилу не представляется возможным, то вариантами изменения характера распределения поля по длине разделки являются:

- Изменение продольной комплексной проводимости кабельной разделки, как реактивной (конденсаторные элементы) составляющей, так и омической — продольной активной проводимости, в чем и состоит сущность импедансного метода. Известная [1] схема замещения кабельной разделки представляет собой цепочку из продольных и поперечных параллельных RC -элементов по два поперечных элемента в каждой ячейке. Один из элементов моделирует комплексное сопротивление току смещения через изоляцию кабеля на жилу, а второй — комплексное сопротивление току смещения через усиливающую изоляцию кабельной муфты на землю. Выравнивание поля изменением активной составляющей продольной проводимости реализуется путем нанесения, тем или иным способом, на изоляцию кабеля специальных проводящих покрытий (слоев) — полимерных экранов. Регулирование поля путем изменения реактивной (емкостной) составляющей продольной проводимости в данной работе не рассматривается, так как подобный подход применяется только в технологиях кабелей с бумажно-пропитанной и масляно-бумажной изоляцией с применением соответствующих материалов для усиливающей изоляции кабельных муфт (так называемая подмотка конденсаторного типа).

- Геометрический и рефракционный способы связаны с изменением конфигурации поля за счет увеличения емкости C_0 усиливающей изоляции на землю. Нейтрализующее действие этой емко-

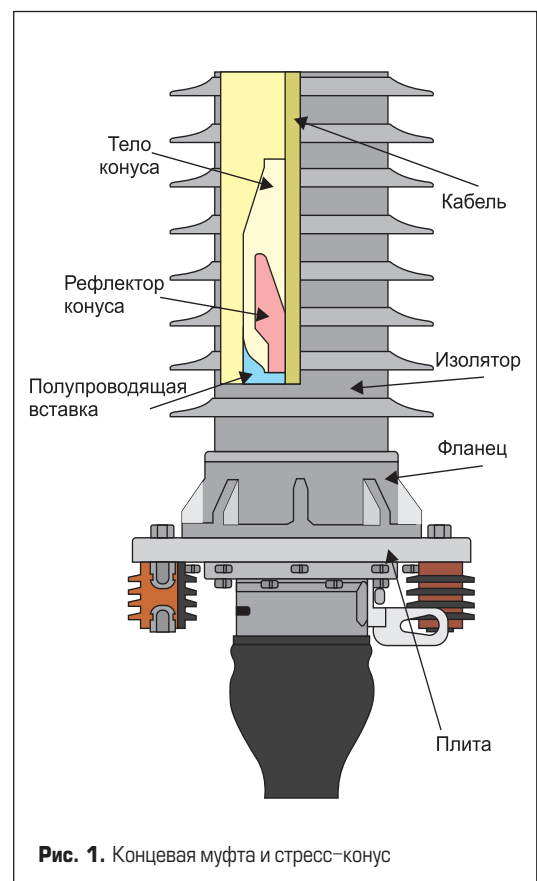


Рис. 1. Концевая муфта и стресс-конус

сти используется при применении проводящих экранов, в том числе рефлектора стресс-конуса. Кривизна рефлектора должна обеспечивать компенсацию емкостного тока на жилу током смещения через усиливающую изоляцию на землю. В этом суть геометрического способа. Рефракционный способ предполагает увеличение емкости C_0 за счет применения в качестве материала основного изоляционного тела стресс-конуса силиконовой резины со специальным наполнителем, обеспечивающим значение величины диэлектрической проницаемости, на порядок превышающее соответствующий параметр XLPE-изоляции кабеля. Однако эффект от выравнивания продольной составляющей электрического поля рефракционным методом весьма зависит от гармонического состава кривой питающего напряжения.

Сочетание геометрического и рефракционного методов [2, 3] позволяет уменьшить тангенциальную составляющую напряженности электрического поля в местах обрыва оболочек и экранов (нарушения заводской изоляции кабельных изделий), не прибегая к сложным технологическим процедурам формирования особых свойств материалов. Например, основной модуль — стресс-конус концевой муфты — может представлять собой конусообразное двухслойное тело (рис. 1). Его внешняя часть, занимающая основной объем, изготавливается из резины с изоляционными свойствами (основное изоляционное тело конуса), а внутренняя часть — рефлектор — формируется из резины с простыми проводящими наполнителями (мелкодисперсная сажа, металлический порошок) и выполняет функцию выравнивания электрического поля в усиливающей изоляции. В случае концевой муфты наружной установки пространство между стресс-конусом и внешним изолятором муфты заполнено жидким диэлектриком, оптимальная диэлектрическая проницаемость которого также является предметом анализа.

Опыт конструирования и эксплуатации высоковольтных кабельных муфт показывает, что проблемными с точки зрения концентрации электрического поля могут быть следующие зоны (рис. 2):

- место обрыва полимерного экрана по изоляции кабеля (зона А);
- зона окончания рефлектора стресс-конуса (зона Б);
- заполненное жидким диэлектриком пространство между стресс-конусом и наружным изолятором (зона В);
- зона окончания конуса вблизи основной изоляции кабеля (зона Г).

Зависимость максимального поля в проблемных зонах Б, В и Г от диэлектрической проницаемости жидкого диэлектрика показана на рис. 3.

Как показывает график, напряженность поля в проблемных зонах Г и Б выше соответствующих значений для зоны В. При этом максимальная напряженность (имеет место в зоне Г) сопоставима либо больше, чем соответствующий параметр для зоны А, только

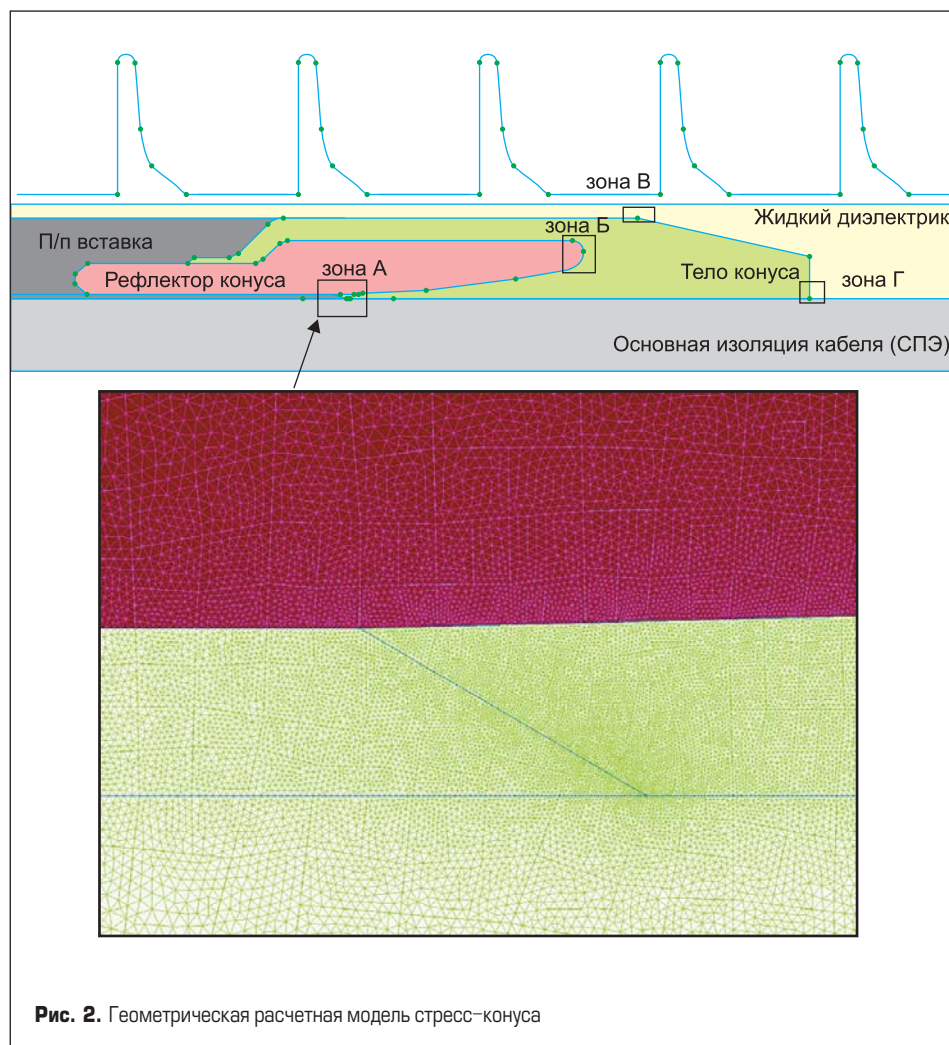


Рис. 2. Геометрическая расчетная модель стресс-конуса

в тех случаях, когда относительная диэлектрическая проницаемость жидкого диэлектрика меньше 3.

Анализ причин отказов позволяет сделать вывод [2], что в большинстве случаев выход из строя муфты происходит из-за дефектов в критической зоне А — на границе раздела «изоляция кабеля — полупроводящий полимерный экран по изоляции кабеля». Поэтому

в качестве критерия оптимальности выбран минимум модуля напряженности электрического поля $E_{из,пл}$ в указанной зоне. При численном моделировании [2, 4] методом конечных элементов электрического поля в муфте была решена серия задач с целью оптимизации геометрии и проводящих свойств [3]. На рис. 4 показано распределение поля вдоль горизонтального отрезка ОХ поверхности полимерного экрана

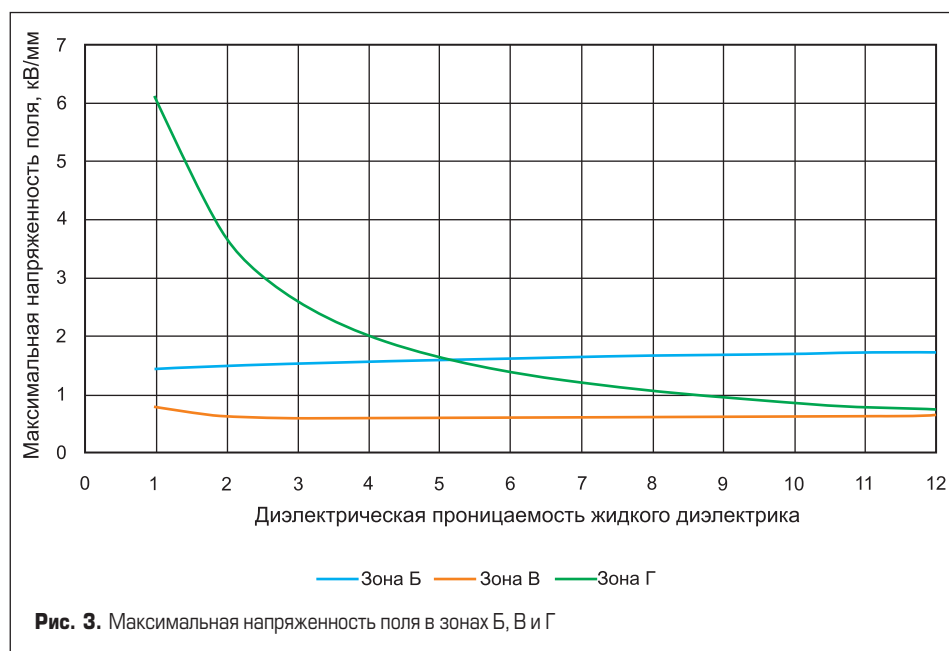


Рис. 3. Максимальная напряженность поля в зонах Б, В и Г

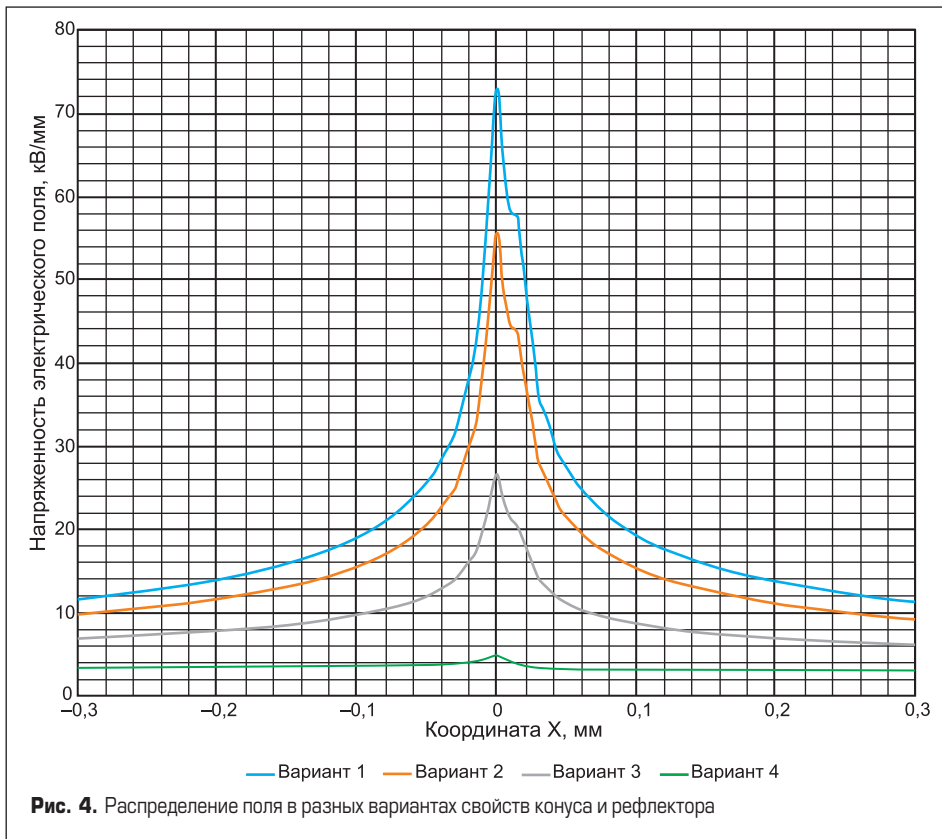


Рис. 4. Распределение поля в разных вариантах свойств конуса и рефлектора

Таблица. Параметры распределения поля

Варианты	Тело конуса		Рефлектор	
	Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ	Электропроводность σ , См/м	Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ	Электропроводность σ , См/м
1	1	0	1	0
2	2,5		2,5	
3	22			0,0002
4	22			

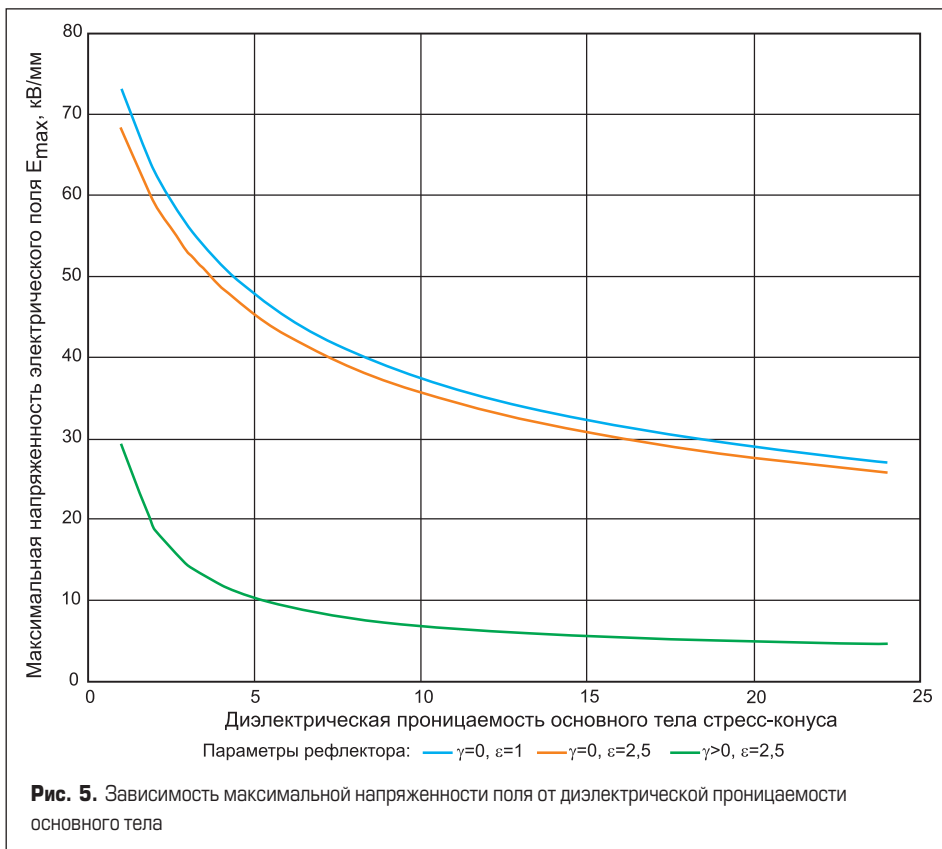


Рис. 5. Зависимость максимальной напряженности поля от диэлектрической проницаемости основного тела

по изоляции. Стресс-конус муфты выполнен из силиконовой резины и состоит из проводящего рефлектора и основного изоляционного тела. На рис. 4 варианты — согласно таблице.

Расчеты производились по следующему алгоритму:

1. При фиксированном значении диэлектрической проницаемости основного изоляционного тела стресс-конуса изменялись значения омической проводимости рефлектора. Целью расчета была фиксация оптимального значения проводимости, при котором модуль $E_{из_плл}$ минимален.
2. При выбранном в п. 1 соотношении между компонентами активной проводимости варьировалась длина рефлектора (длина проекции рефлектора на ось). Целью расчета была фиксация длины рефлектора, при которой модуль напряженности поля $E_{из_плл}$ достигает минимума.
3. При фиксированных значениях соотношения компонентов проводимости и длины рефлектора по п.п. 1 и 2 изменялся угол наклона касательной к начальному участку рефлектора (считая от кабеля) по отношению к оси кабеля. Целью расчета была фиксация величины угла, при которой модуль напряженности поля $E_{из_плл}$ достигает минимума.
4. При фиксированных значениях по п.п. 1, 2 и 3 варьировалась величина относительной диэлектрической проницаемости ϵ основного изоляционного тела стресс-конуса. Целью расчета была фиксация величины ϵ , соответствующей минимуму напряженности поля $E_{из_плл}$.

Потенциал жилы задавался равным амплитудному значению фазного напряжения, потенциал экрана принимался равным нулю. Рефлектор стресс-конуса по его назначению должен быть электрически соединен с заземленным экраном кабеля, выполняя функцию восстановления «обрезанного» экрана кабеля (имитация первоначальной конструкции до разделки). По предложенному алгоритму решалась задача расчета электрического поля переменного тока.

На рис. 5 приведена зависимость максимальной напряженности электрического поля в зависимости от диэлектрической проницаемости основного изоляционного тела конуса в широком диапазоне: $1 < \epsilon_{тела} < 24$.

На этом графике синяя и оранжевая кривые соответствуют рефлектору с нулевой проводимостью, а зеленая кривая — полупроводящему рефлектору с удельной электропроводностью $\gamma = 0,0002$ См/м. Из графика следует, что снижения напряженности поля до требуемого уровня практически невозможно добиться без использования полупроводящего рефлектора.

Отметим также, что выбор конструкции стресс-конуса и свойств диэлектрических материалов оказывает влияние на электрическую емкость муфты. Емкость между жилой и землей легко может быть оценена через полную энергию электрического поля в расчетной области W_3 , и известное фазное напряжение U_ϕ :

$$W_3 = \int_V \frac{D \times E}{2} dv, C = \frac{2W_3}{U_\phi^2}.$$

Зависимость емкости от диэлектрической проницаемости основного изоляционного тела стресс-конуса приведена на рис. 6.

Графики на рис. 6 показывают, что емкость конструкции муфты и, соответственно, запасенная в ней энергия электрического поля, осциллирующая с двойной частотой, увеличивается почти на треть по мере приближения степени ослабления максимального электрического поля к оптимальному значению. Этот факт может быть учтен при моделировании режимов работы муфты в составе электрической цепи. Численные расчеты проводились с использованием специализированного вычислительного комплекса на базе модуля ELCUT версии 5.9 [5].

Выводы

В работе описан способ снижения неравномерности электрического поля в месте обрыва экранов и проводящих оболочек, основанный на сочетании свойств материалов стресс-конуса кабельной муфты и специального подбора геометрической конфигурации элементов стресс-конуса.

Установлено, что для муфт класса напряжений 64/110 кВ:

- Оптимальное отношение продольной (σ_x) к поперечной (σ_y) составляющей активной проводимости рефлектора находится в пределах $\sigma_x/\sigma_y = 10 \dots 12$. Результаты расчета в оптимальном случае дают значение $E_{min} = 2,85$ кВ/мм.
- Оптимальное значение длины проекции рефлектора на ось кабеля находится в пределах $L = 85 \dots 120$ мм.
- Оптимальное значение угла наклона касательной к начальному участку рефлектора стресс-конуса $\varphi = 8 \dots 14^\circ$.
- Оптимальное значение относительной диэлектрической проницаемости ϵ материала основного изоляционного тела принимает значения из промежутка $\epsilon = 22 \dots 24$.

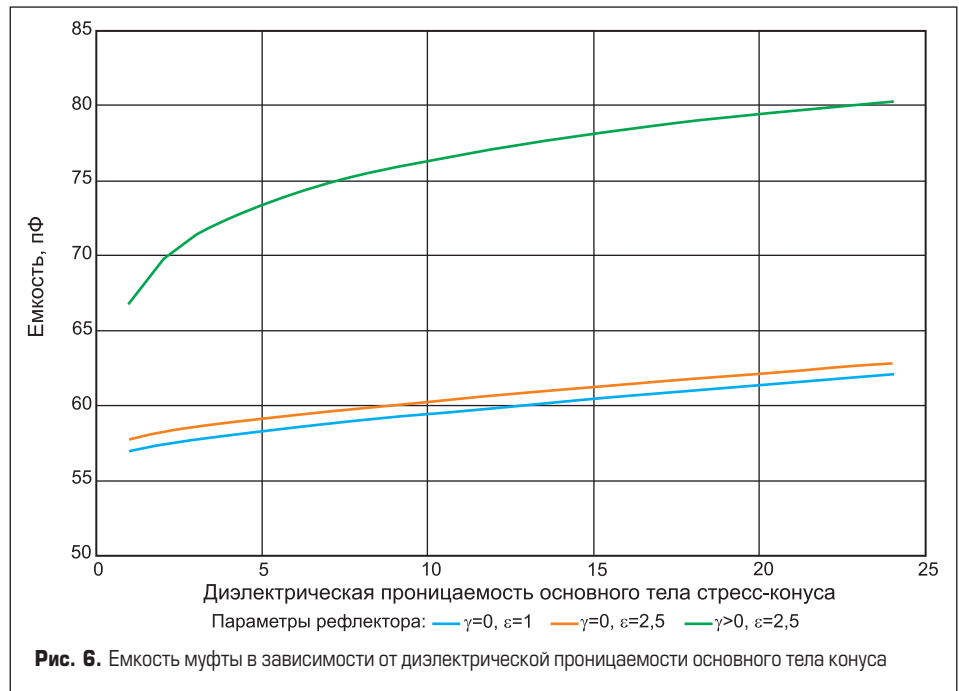


Рис. 6. Емкость муфты в зависимости от диэлектрической проницаемости основного тела конуса

Для более точной оценки оптимальных значений $\sigma_x/\sigma_y, L, \varphi$ и ϵ следует выполнить оптимизационные расчеты электромагнитного поля в соответствии с приведенным в настоящей работе алгоритмом. В общем случае для изготовления рефлектора может быть использована смесь эластичного полимерного материала с мелкодисперсным токопроводящим наполнителем. В качестве эластичного полимерного материала применимы этиленпропиленовая или силиконовая резины, а в качестве мелкодисперсного токопроводящего наполнителя — сажа или металлический порошок.

Литература

1. Шварцман Л. Г. Регулирование электрического поля в концевых муфтах кабелей

высокого напряжения. М.: Энергия. Труды ВНИИ КП. 1969. Вып. 13.

2. Грешняков Г. В., Дубицкий С. Д. Комбинированный способ снижения неравномерности электрического поля в муфтах силовых кабелей. // Силовая электроника. 2010. № 2.

3. Пат. на полезную модель № 97013 (РФ) Соединительная муфта для силового кабеля / Г. В. Грешняков, И. В. Журавлев, А. В. Матвеев // Рег. 20.08.2010.

4. Грешняков Г. В., Дубицкий С. Д. Математическое моделирование электрического поля в муфтах силовых кабелей // Силовая электроника. 2010. № 3.

5. Дубицкий С. Д. Elcut 5.1 — платформа разработки приложений анализа полей // Exponenta Pro. 2004. № 1.