

УДК 621.315.2.016.2:537.529:519.63

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В КАБЕЛЯХ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

ЗАКИРОВ Д.Ф., БОХОЛДИН А.А., КГЭУ, г. Казань  
Науч. рук. д-р физ.-мат. наук, проф. УСАЧЕВ А.Е.

*Аннотация В данной работе с помощью программного комплекса Comsol Multiphysics было произведено моделирование дефектов изоляции кабеля, выполненной из сшитого полиэтилена, и расчет напряжённости электрического поля внутри дефекта и в изоляции вокруг него.*

*Ключевые слова: частичные разряды, изоляция, сшитый полипропилен, напряженность, дефекты, кабель.*

## PARTIAL DISCHARGE MODELING IN CABLES FROM CROSS-LINKED POLYETHYLENE

ZAKIROV D.F., BOHOLDIN A.A., KGEU, Kazan  
Academic adviser, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. USACHEV A.E.

*Annotation In this paper, using Comsol Multiphysics software, we simulated cable insulation defects made of cross-linked polyethylene and calculated the electric field strength inside the defect and in the insulation around it.*

*Keywords: partial discharges, insulation, cross-linked polyethylene, electric field strength, defects, cable.*

Seoul

В настоящий момент особенное внимание уделяется проблемам, связанным с надежностью работы современных систем производства и распределения электроэнергии. Это обусловлено тем, что аварийные повреждения приводят к нарушениям электроснабжения и большому экономическому ущербу энергосистеме и потребителям. Одним из таких основных элементов систем электроснабжения являются силовые кабельные линии, надежность которых требуется контролировать и поддерживать на достаточном уровне.

Техническое состояние кабельных линий контролируется в основном по состоянию изоляции. Для предупреждения аварий на КЛ и замене силовых кабелей с выработанным ресурсом изоляции необходимо иметь достоверную информацию о текущем состоянии изоляции кабелей. Это позволит принять своевременные меры по устранению дефектов, а значит, и избежать аварийных ситуаций и тем самым повысить надёжность работы сетей. С этой целью применяются различные методы испытаний и диагностики, в том числе и новые современные методы.

Одним из таких методов является метод контроля изоляции по характеристикам частичных разрядов (ЧР). Анализ дефектов изоляции кабелей, выявленных в период с 2009 г. по 2016 г. показывает, что 52% дефектов из их общего количества, напрямую связаны с частичными разрядами [2].

Необходимо отметить, что в России характерным является эксплуатация силовых КЛ до их предельного состояния. При этом уровень ЧР в эксплуатируемой КЛ может достигать 10000 пКл и более. Для сравнения, в Германии предельным уровнем ЧР в кабельных линиях

считается 1000 пКл. Количество КЛ в России, имеющих дефекты с уровнем ЧР около 5000 пКл, составляет более 65 %. На отдельных предприятиях количество КЛ с неудовлетворительным техническим состоянием более 80 %. [4]

Измерение частичных разрядов и определение их источника позволяет выявить места и участки с выраженной дефектностью изоляции и тем самым повысить достоверность диагноза изоляции кабелей. Метод измерения ЧР, в свою очередь, обеспечивает получение информации об изменениях электрических свойств какого-либо участка изоляции кабеля, которые еще не привели к пробою.[4] Принцип метода заключается в следующем. В момент появления частичного разряда в кабельной линии возникает два коротких импульсных сигнала, длительности которых десятки-сотни наносекунд. Эти импульсы распространяются к разным концам кабельной линии. Измеряя импульсы, достигшие начала кабеля, можно определить расстояние до места их возникновения и уровень.

Важной проблемой, возникающей при применении метода измерения характеристик частичных разрядов на практике, остается калибровка измерительных приборов. Аппаратура должна настраиваться каждый раз при диагностике нового оборудования. Калибровка измерительных устройств отстраивается от:

- а) емкости кабеля;
- б) параметров градуировочного генератора;
- в) изменения броска напряжения.

Наличие в изоляции частичных разрядов (ЧР) критической (разрушающей) интенсивности, как правило, свидетельствует о нахождении

в ней дефектов. Однако зачастую невозможно инструментально определить все дефектные участки в условиях эксплуатации. Скоротечность данных процессов предопределила использование разных моделей, как математических, так и компьютерных (физико-математических), которые позволяют изучить отдельные параметры ЧР, от которых зависят процессы возникновения и развития ЧР в высоковольтной изоляции.[3]

На основе всего вышеперечисленного в данной работе были поставлены следующие задачи:

При помощи программного комплекса Comsol Multiphysics

- а) Произвести моделирование дефектов изоляции кабеля, выполненной из сшитого полиэтилена;
- б) Рассчитать напряжённости электрического поля внутри дефекта и в изоляции вокруг него.

В качестве объекта исследования был использован одножильный коаксиальный кабель на напряжение 110 кВ марки ПвП2г - 1x185/95–110. Моделирование и все расчеты производились для указанного кабеля.

Для определения условия возникновения пробоя изоляции необходимо задать мгновенное значение напряжения, при котором наиболее вероятно произойдет пробой. Учитывая быстротечность процесса пробоя изоляции при возникновении лавины электронов в области пробоя, напряжение в момент пробоя можно считать неизменным. [5]

Следующим шагом при определении условия возникновения пробоя изоляции является расчет распределения электрического поля в диэлектрике с дефектом. Для задачи расчета электрического поля с дефектом нет аналитического решения. В данном случае расчет электрического поля

сводится к численным методам, одним из которых является метод конечных элементов, реализованный в Comsol Multiphysics.

В качестве условия возникновения пробоя используется условие возникновения в изоляции напряженности электрического поля выше пробивной.

Исходя из зависимости  $U_{пр}$  и  $E_{пр}$  от размера разрядного промежутка вдоль поля, представленной на рисунке 1, пробивная напряженность для дефекта размером 0,5 мм составит 5 кВ/мм.

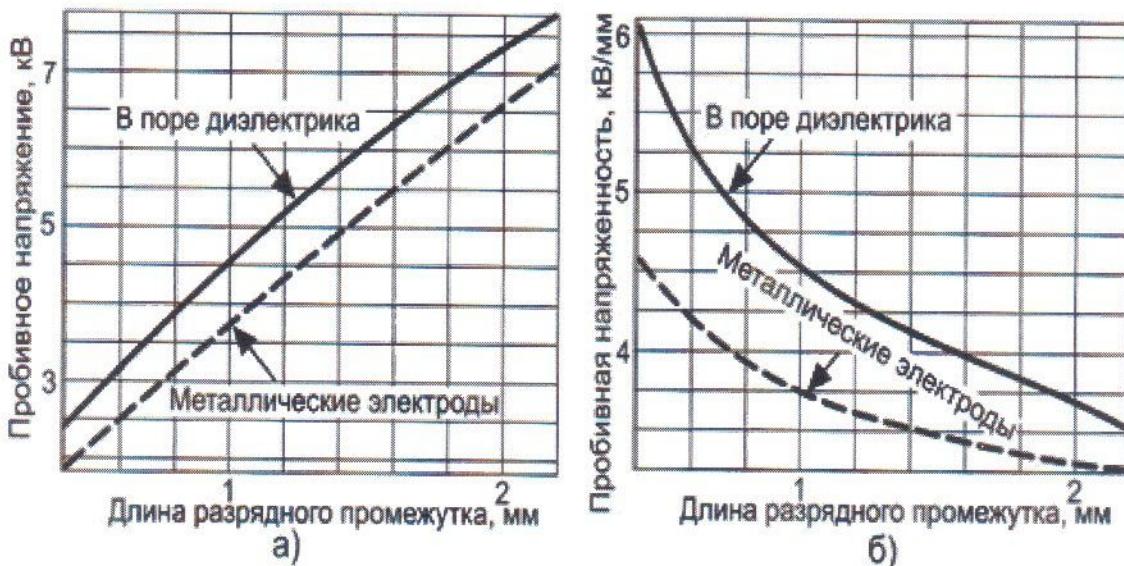


Рис.1. Зависимости  $U_{пр}$  и  $E_{пр}$  от размера разрядного промежутка вдоль поля.

Задача расчета рассматривалась в трехмерной постановке, в системе координат  $xyz$  с началом координат в центре анализируемой области. Для исследований выбрана область диэлектрической среды вблизи токопроводящей жилы. Был проведен расчет напряженности электрического поля в полиэтиленовой изоляции с одним сферическим газовым включением радиусом  $r = 500$  мкм.

При моделировании принимались следующие граничные условия:

- на нижней и верхней границе плотность поверхностного заряда

$$\rho_s = 0 \text{ C/m}^2;$$

- по периметру жилы электрический потенциал  $\phi = U$ ;
- по периметру изоляции выполнено условие  $\phi = 0$ .

На рисунке 2 представлено распределение напряженности электрического поля в изоляции со сферическим газовым включением.

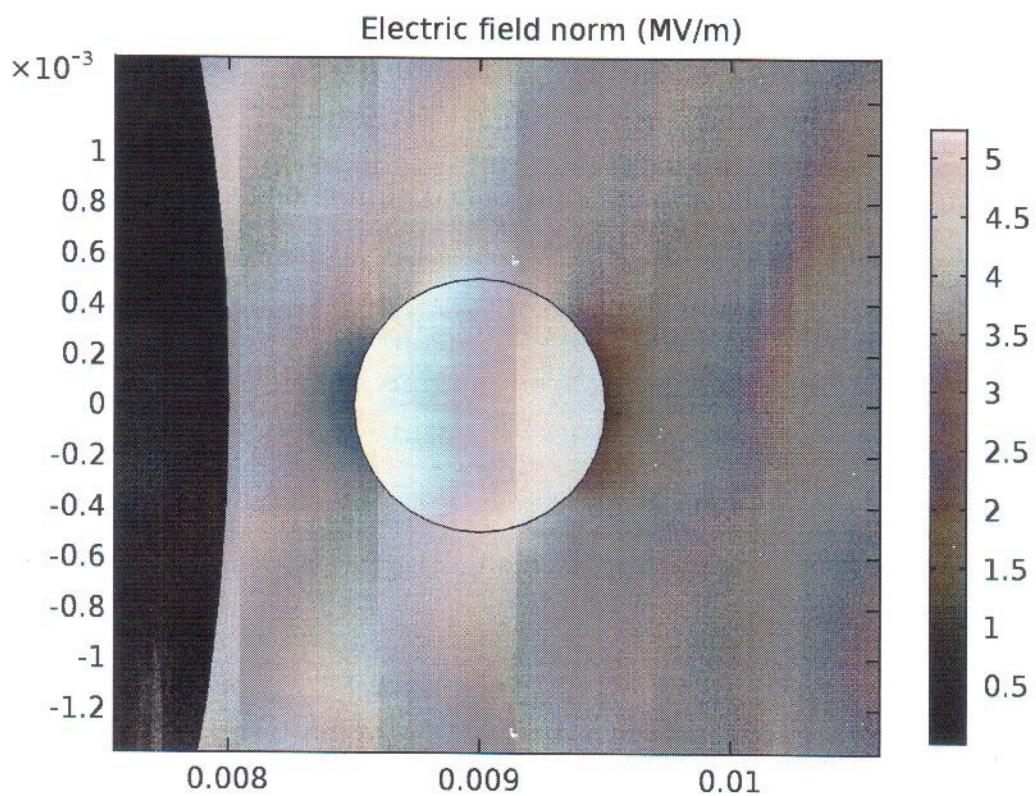


Рис 2. Распределение напряженности электрического поля в изоляции с одиночным сферическим газовым включением.

Внутри сферического газового включения наблюдается повышение напряженности электрического поля приблизительно в 1,2 раза.

На рисунках 3, 4 и 5 представлены графики напряженности электрического поля по осям X, Y, Z. По осям Y и Z поле однородно и графики напряженности практически одинаковы, поэтому в дальнейшем в

рассмотрение принимаем только оси X и Y. Максимальная напряженность электрического поля внутри дефекта составляет 5,2 кВ/мм, что выше пробивной напряженности дефекта подобного размера.

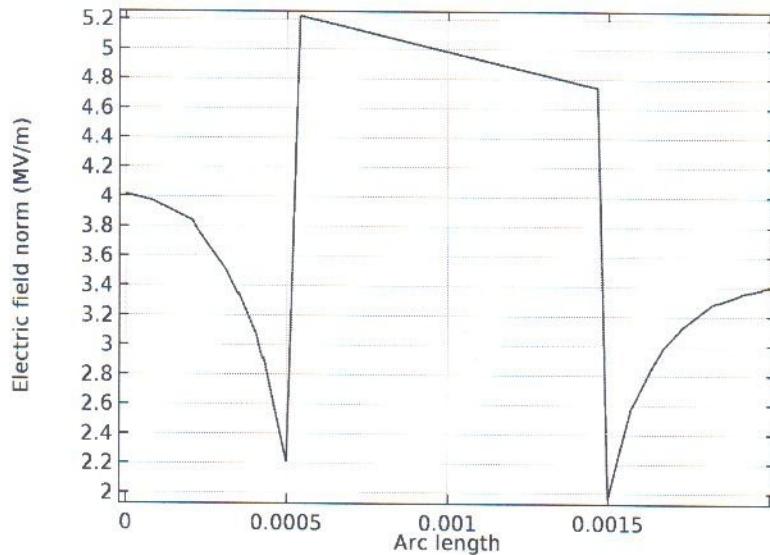


Рис 3. График распределения напряженности электрического поля по оси X.

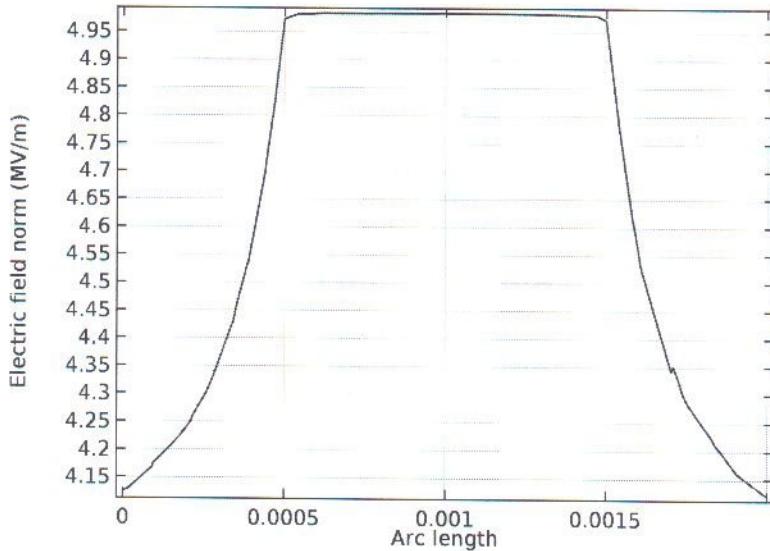


Рис 4. График распределения напряженности электрического поля по оси Y.

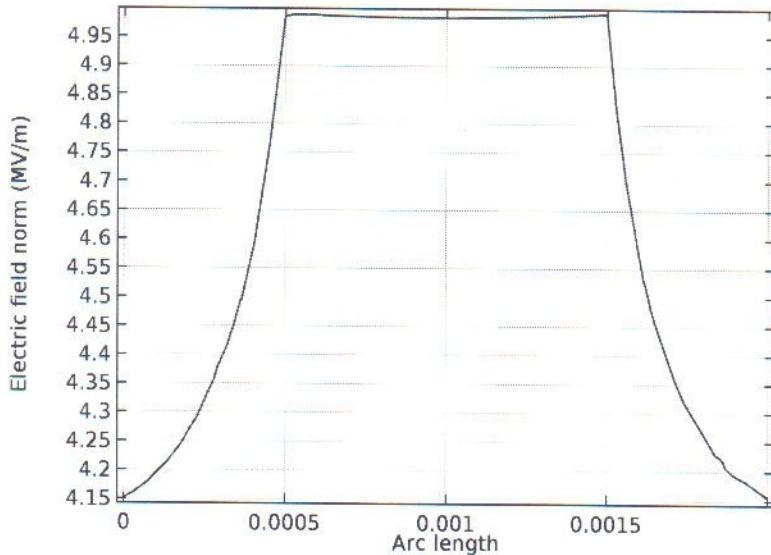


Рис 5. График распределения напряженности электрического поля по оси Z.

### Литература

1. Ба Бораик А. М., Усачев А.Е., Кубарев А. Ю. Моделирование процесса возникновения частичного разряда в компьютерной среде Multisim // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2016. - № 9-10.
2. Ба Бораик А.М. Контроль состояния изоляции обмоток статоров турбогенераторов методом частичных разрядов // Диссертация кандидата Технических наук:, 2018
3. ГОСТ 20074-83. Электрооборудование и электроустановки. Метод измерения характеристик частичных разрядов // М.: Изд-во стандартов 2008
4. Екимуков С. С., Цивилёв И. Ю. Особенности эксплуатации кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена (защита от перенапряжений, диагностика и испытания). // Наука и Техника. – 2011. – №2 (327).

5. Красников Г.Е., Нагорнов О.В., Старостин Н.В. Моделирование физических процессов с использованием пакета Comsol Multiphysics. М.: НИЯУ МИФИ, 2012.

6. Лопухова Т.В., Усачев А.Е., Чернов К.П. Техника высоких напряжений: Изоляция и перенапряжения. Учеб. пособие. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2012.