

Ю.Г. ГОНТАРЬ, аспирант, НТУ «ХПИ»

### ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГРОВОГО ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ПРОХОДНОГО ИЗОЛЯТОРА

В статті розглянуті питання виникнення пробоя по поверхні твердого діелектрика, електричні схеми заміщення ізоляційних конструкцій та наведені основні закономірності для напруги та напруженості поля при поверхневому розряді. Було показано, що розподіл поля визначається в основному ємнісними процесами.

В статье рассмотрены вопросы возникновения пробоя на поверхности твердого диэлектрика, электрические схемы замещения изоляционных конструкций и приведены основные закономерности для напряжения и напряженности поля при поверхностном разряде. Было показано, что распределение поля определяется в основном емкостными процессами.

The questions of a breakdown on the surface of a solid dielectric, the electrical equivalent circuit of insulating structures and the basic laws for the stress and field intensity at the surface discharge. It was shown that the field distribution is mainly determined by capacitive processes.

**Введение.** В условиях испытаний и эксплуатации изоляции трансформаторов, электрических машин, кабелей и конденсаторов часто наблюдается явление электрического разряда вдоль поверхности изоляционного материала.

**Цель, задачи исследования.** Основная задача при рассмотрении поверхностных разрядов заключается в установлении зависимости разрядного напряжения от параметров, определяющих распределение поля. Важнейшими из них являются: геометрические размеры и форма изоляционной конструкции; расположение токоведущих частей; электрические характеристики диэлектрика и окружающей его среды; система напряжения. При перенапряжениях и при испытаниях изоляции выпрямленным напряжением на поверхности диэлектрика происходит образование объемного заряда.

В данной статье рассматриваются факторы, от которых зависит величина напряжения поверхностного пробоя (в частности его объемные и поверхностные свойства) при помощи электрических схем замещения электроизоляционных конструкций.

**Физический механизм процесса поверхностного разряда.** При поверхностном разряде возникают электроны, которые быстро уходят из сферы разряда благодаря их малой массе и значительной скорости. Приповерхностный слой диэлектрика содержит ряд дефектов (ловушек), на которых могут задерживаться электроны. Ловушками зарядов

являются границы аморфной и кристаллической фазы, антиоксиданты и примеси, продукты химической сшивки полимеров, полярные группы, которые образовались вследствие окисления полимеров. Они есть по всей толщине диэлектрика, но в поверхностном слое их наибольшее количество. При напряженностях поля от 2 до 20 МВ/м (в зависимости от диэлектрика), электроны переходят из металла в приповерхностный слой диэлектрика и задерживаясь там в ловушках, образуют объемный заряд. Когда напряженность поля начинает уменьшаться (после перехода через максимум), происходит инжекция дырок в приповерхностный слой. Этому способствует уже собственное поле объемного заряда.

Дальнейшее перемещение заряда в глубину диэлектрика происходит при значительно высоких напряженностях поля, т.к. концентрация поверхностных дефектов уменьшается с глубиной.

Инжекция зарядов в диэлектрик происходит, когда напряженность поля превышает некоторое критическое значение:  $E > E_{кр}$ . Так, для полиэтилена  $E_{кр} = 10-20$  МВ/м, что достаточно близко к типовым рабочим напряженностям поля  $E_p$  и является величиной одного порядка с испытательными напряженностями. Таким образом, образование объемного заряда происходит как при перенапряжениях на изоляции, так и при обычных ее испытаниях выпрямленным напряжением.

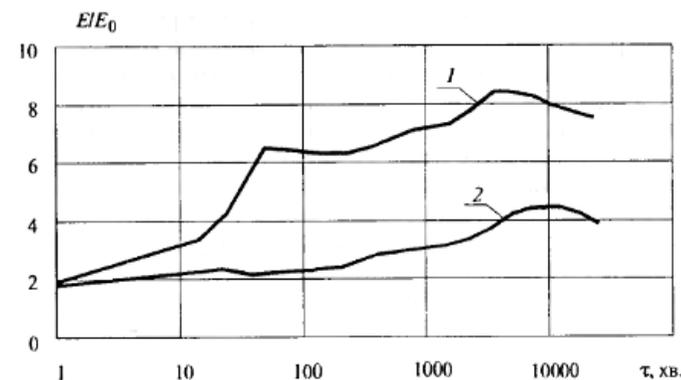


Рис. 1 – Кинетика накопления объемного заряда в образце кабельной изоляции на протяжении нескольких сотен часов (1 – возле внутреннего электрода; 2 – возле внешнего электрода;  $E/E_0$  – кратность перенапряжения вследствие накопления объемного заряда)

Уже через 1 минуту с момента подачи напряжения уровень внутреннего поля в два раза превысил номинальный. В конце интервала наблюдения имеется  $4 \times 8$ -разовое увеличение напряженности.

### Электрические разряды на поверхности твердых диэлектриков.

На начальных этапах своего развития поверхностный разряд представляет собой совокупность микрозарядов, которые возникают у края тонкого электрода, расположенного на поверхности диэлектрической пластины (барьера), и в каждый полупериод воздействующего переменного напряжения имеют форму отдельных каналов, длина и число которых зависят от конфигурации электродов и от значения приложенного напряжения. Теорию разрядов можно рассматривать с помощью электрических схем замещения изоляционных конструкций. В процессе изучения явления, по мере раскрытия его механизма, схема замещения может уточняться или заменяться.

Для проведения эксперимента использовался проходной изолятор П10 (рис. 3), который подвергался воздействию грозового перенапряжения (рис. 2).

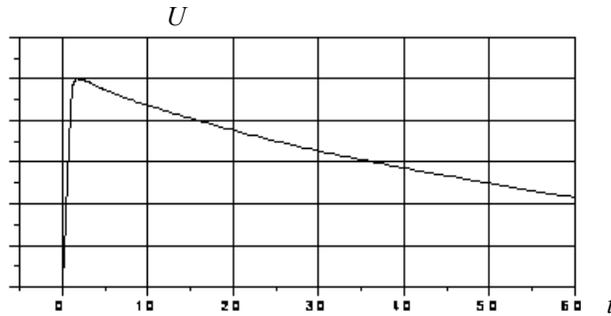


Рис. 2 – Форма грозового импульса

Была составлена расчетная модель (рис. 3 б) и рассчитана схема экспериментальной установки с помощью правил Кирхгофа:

$$-\frac{\partial i_s}{\partial x} = \sigma_v(u_0 - u_s) + C_v \frac{\partial(u_0 - u_s)}{\partial t},$$

$$\frac{\partial u_s}{\partial x} = i_s Z_s, \quad (1)$$

где  $i_s$  – ток вдоль поверхности изоляции;  $u_0$  – напряжение на стержне  $T$  относительно заземленного электрода  $F$ ;  $u_s$  – напряжение на поверхности изоляции на расстоянии  $x$  от электрода  $F$ ;  $\sigma_v$  – объемная проводимость единицы длины изоляции при постоянном токе;  $C_s$  – поверхностная емкость и  $C_v$  – объемная емкость.

После ряда преобразований напряженность поля вдоль поверхности изоляции будет выражена

$$E_s = -\frac{dU_s}{dx} = -\gamma U_0 \frac{ch\gamma(l-x)}{sh\gamma l}, \quad (2)$$

а у края электрода, при  $x = 0$ ,

$$E_0 = -U_0 \gamma \cdot cth\gamma l, \quad (3)$$

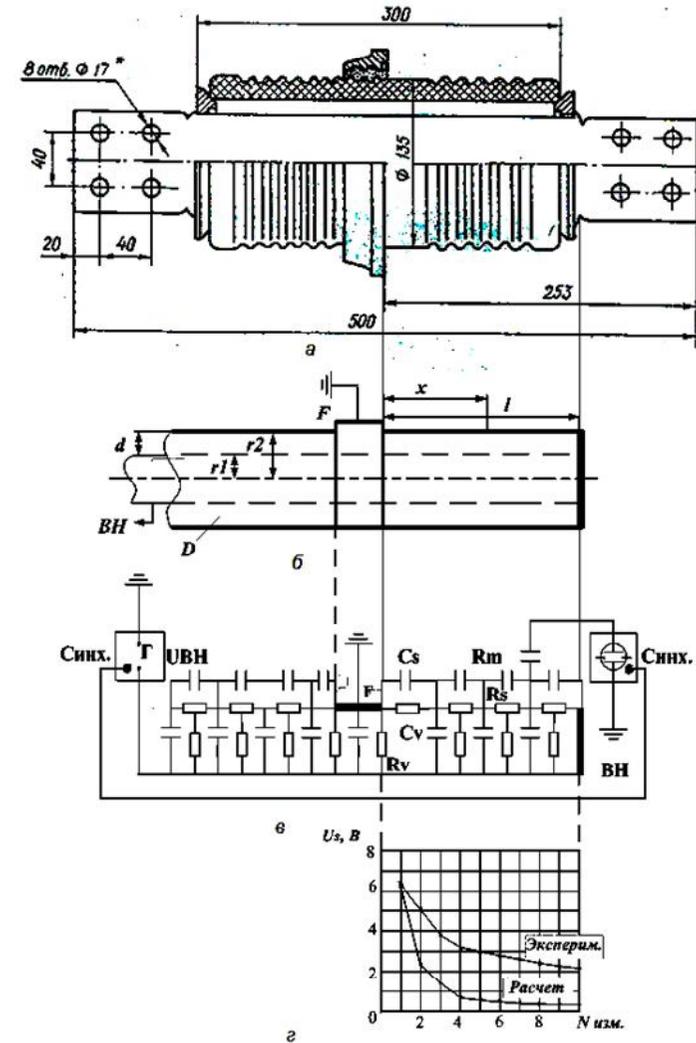


Рис. 3 – Расчетная и экспериментальная схема для определения распределения напряжения по поверхности изолятора П10

Таким образом, для напряжения на электроде  $F$  получается

$$U_0 = -\frac{\dot{E}_0}{\gamma} th \gamma l. \quad (4)$$

При этом вектор напряженности поля направлен в сторону убывающего потенциала.

В высоковольтных электроизоляционных конструкциях, работающих на переменном токе, распределение поля определяется в основном емкостными процессами, поэтому напряжение и среднее значение напряженности поля при поверхностном пробое (перекрытии) будут записаны в виде:

$$U_n = E_n \sqrt{\frac{k\epsilon_m d_s}{\epsilon_v}} th \sqrt{\frac{\epsilon_v l^2}{k\epsilon_m d_s}}, \quad (5)$$

$$E_{n \text{ ср}} = E_n \frac{th \sqrt{\frac{\epsilon_v l^2}{k\epsilon_m d_s}}}{\sqrt{\frac{\epsilon_v l^2}{k\epsilon_m d_s}}}. \quad (6)$$

где  $\epsilon_v$  – диэлектрическая проницаемость изоляции;  $\epsilon_m$  – диэлектрическая проницаемость окружающей среды.

Формулы (5) и (6) выражают закономерности в области электрических разрядов на поверхности твердых диэлектриков и электроизоляционных конструкций при переменном токе.

Расчетная и экспериментально полученная зависимость распределения напряжения по поверхности твердого диэлектрика при переменном токе при нормальных условиях представлена на рис.3 г.

Использование данных схем замещения позволяет подробно рассматривать теорию электрических разрядов по поверхности твердых диэлектриков. Однако в модели, предложенной Мантровым, не учитываются примеси и структура диэлектрика, различные неоднородности в виде воздушных включений, прослоек между отдельными слоями, микротрещин, отслоения изоляции и др. Кроме этого, увлажнение слоя загрязнения на изоляторах морозящим дождем или росой приводит к уменьшению сопротивления слоя загрязнения, изменению распределения напряжения по поверхности и в результате – к снижению его разрядного напряжения наружной изоляции электроизоляционных конструкций за счет перераспределения напряжений по поверхности изоляторов, что облегчает развитие поверхностного разряда.

### Выводы:

1. На поверхности твердых диэлектриков могут возникать различные стадии разряда, причем для определения величины разрядного напряжения необходимо знать характер распределения электрического поля на поверхности изоляции.

2. Распределение поля в высоковольтных электроизоляционных конструкциях, работающих на переменном токе, определяется в основном емкостными процессами; зависит не только от диэлектрической проницаемости изоляции, но и от проницаемости окружающей среды.

3. Схемы замещения, а также полученные при помощи их уравнения позволяют описать процесс электрического разряда по поверхности диэлектрика. Они обладают самыми общими принципами обсуждаемого явления, не углубляясь при этом в его физический механизм. Модель Мантрова не учитывает примеси и структуру диэлектрика, различные неоднородности в виде воздушных включений, прослойки между отдельными слоями, микротрещины, отслоения изоляции и влияние различных атмосферных факторов, что облегчает развитие поверхностного разряда. Поэтому, в процессе изучения явления, по мере раскрытия его механизма, изображающая его схема замещения должна уточняться или заменяться.

**Список литературы:** 1. Техніка і електрофізика високих напруг / В.О. Бржезицький, В.М. Михайлов, А.В. Ісаков, В.В. Рудаков, А.Г. Гурин, Б.Г. Набока. – Х.:НТУ "ХП", ТОВ "Торнадо", К.:НТУУ "КП". – 2004 р. 2. Мантров М.И. Расчет разрядных напряжений высоковольтных изоляторов / М. И. Мантров. – М.:МЭИ. – 1966 г. 3. Григорьев А. Н. Электрический разряд по поверхности твердого диэлектрика // Известия Томского политехнического университета / А.Н. Григорьев, А.В. Павленко, А.П. Ильин, Е.И. Карнаухов. – 2006. – Т.309 – №1. 4. Кучинский Г.С. Техника высоких напряжений / Г. С. Кучинский, И.М. Богатенков, Ю.Н. Бочаров, Н.И. Гуменова. – СПб. : Энергоатомиздат. – 2003.

Поступила в редколлегию 30.09.2011