

**Ю.В.КРАВЧЕНКО**, аспирант, НТУ «ХПИ»;  
**В.В.РУДАКОВ**, д-р техн. наук, проф.; НТУ «ХПИ»

## **ХАРАКТЕРНЫЙ РАЗМЕР «НАПРЯЖЕННОГО ОБЪЕМА» ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ФОЛЬГОВЫХ ИМПУЛЬСНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ**

Наведена методика встановлення й значення характерного розміру «напруженого об'єму» конденсаторної ізоляції для ап'орної оцінки кращих питомих характеристик та ресурсу. Наведено приклад вибору конструкції секцій конденсатора на основі комбінованого діелектрику.

The method of determination and «tense volume» characteristic size value of capacitor insulation for a priori estimation of the best specific descriptions and resource are given. The example of capacitor sections construction choice on the basis of the combined dielectric is resulted.

В соответствии с концепцией, основанной на предположении об обратно пропорциональной зависимости ресурса импульсных конденсаторов от величины «напряженного объема» (объема изоляции, в котором напряженность электрического поля превышает некоторую критическую величину), можно производить сравнительные оценки возможного изменения ресурса при изменении толщины обкладки и диэлектрика, а также формы края обкладки [1]. Однако, в ряде случаев необходимо оценить ресурс только на основании результатов расчета электрического поля, не прибегая к проведению опорного эксперимента и к сравнительному анализу.

**Целью** настоящей работы является определение характерного размера «напряженного объема» на основании расчета электрического поля у края обкладки и анализа известных экспериментальных данных по ресурсу.

**Постановка задачи.** При ресурсе фольговых импульсных конденсаторов более  $10^3$  импульсов разрушение изоляции происходит у края обкладок [1]. Типовую форму края фольговой обкладки можно представить простейшей моделью (рис.1, а). Для случая загибания края обкладки, которое применяется с целью снижения краевого эффекта, простейшая расчетная модель будет иметь вид (рис.1, б). В качестве характерного размера «напряженного объема» примем расстояние  $r$  от некоторой точки на нижней горизонтальной поверхности обкладки, где напряженность электрического поля превышает некоторую критическую величину, до вершины угла края. С учетом того, что к торцу обкладки прилегает масляная прослойка (с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_1$ ), в качестве «напряженного объема» примем объем только твердого диэлектрика (с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_2$ ), прилегающего к горизонтальной площадке обкладки с характерным размером  $r$ . Это вы-

звано тем, что молекулы жидкого диэлектрика обладают большой степенью подвижности, поэтому разрушающее воздействие значительной напряженности поля, приводящее к разложению жидкого диэлектрика и газообразованию, может быть нивелировано за счет выноса продуктов разложения из области с повышенной напряженностью поля, то есть восстановления диэлектрических свойств изоляционной жидкости. В твердом же диэлектрике разрушения, вызванные повышенной напряженностью поля вблизи кромки обкладки, аккумулируются, приводя в конечном счете к пробое изоляции. Кроме того, известно [2], что скорость эрозии поверхности диэлектрика, находящегося в зоне действия разрядов при параллельном направлении электрического поля и распространении электрических разрядов вдоль поверхности диэлектрика, примерно в 30 раз меньше, чем при перпендикулярном расположении диэлектрика относительно направления разряда.

Таким образом, задача данной работы состоит в сравнительном анализе установленных в ходе расчета характеров распределения электрического поля на горизонтальном участке обкладки для 2-х типов конденсаторных конструкций, существенно отличающихся формой края обкладки (рис. 1, *a* и рис. 1, *б*). Результатом данного сравнительного анализа должно стать определение характерного размера  $r$  «напряженного объема» с учетом известных экспериментальных данных по ресурсу для рассматриваемых расчетных конденсаторных конструкций.

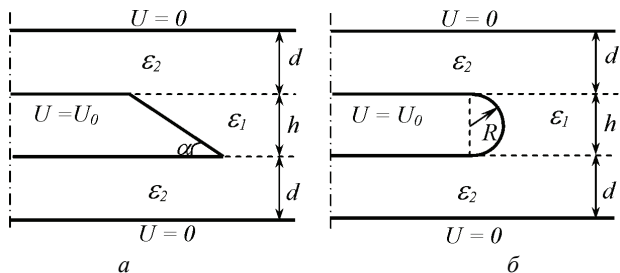


Рисунок 1 – Упрощенная расчетная модель края обкладки:  
*a* – со скошенным торцом; *б* – с закругленным торцом

**Методика решения.** Для определения напряженности электрического поля в электростатическом приближении использованы следующие граничные условия:  $U = U_0$  – потенциал конденсаторной обкладки,  $U = 0$  – потенциал двух бесконечных электродов, между которыми находится обкладка. Задача решена методом интегральных уравнений [3] с использованием уравнений Фредгольма первого рода (для потенциалов) и второго рода (для условия равенства нормальных составляющих вектора электростатической индукции на поверхностях раздела сред). Для реализации компьютерной программы использованы подпрограммы, приведенные в работе [3]. Результатами расчета являются значения напряженности электрического поля на поверхности

электродов и нормальные составляющие напряженности электрического поля на поверхности границ раздела диэлектрических сред.

**Результаты расчета.** На рис. 2 представлены зависимости  $E^* = E_i/E_0$  (где  $E_i$  – значение напряженности в данной точке, а  $E_0 = U_0/d$ ) от расстояния  $r/d$  вдоль горизонтальной поверхности обкладки для расчетных систем с идентичными значениями  $h/d$ ,  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ , но различной формой торца обкладки: полукруглой (кривая 1), скошенной с  $\alpha = 30^\circ$  (кривая 2), прямоугольной с  $\alpha = 90^\circ$  (кривая 3). Наличие скоса с преобладающим значением  $\alpha = 30^\circ - 90^\circ$  на краях обкладок подтверждается в работе [4].

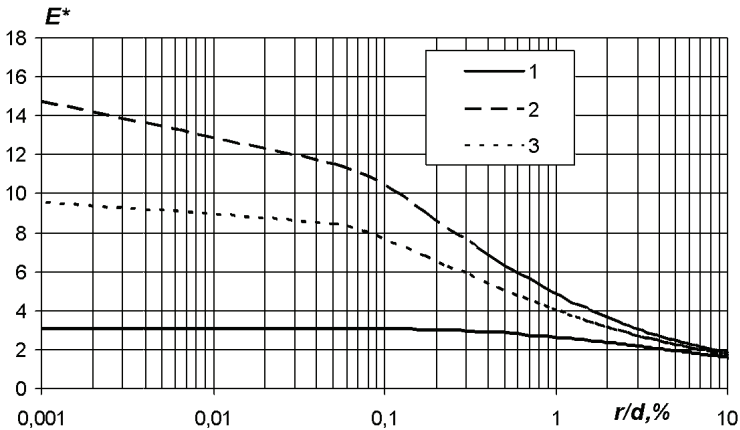


Рисунок 2 – Зависимость  $E^* = f(r/d)$  для расчетных систем с различной формой торца обкладки ( $h/d = 0,1$ ;  $\varepsilon_1 = 1$ ;  $\varepsilon_2 = 2$ )

Максимальная напряженность электрического поля для обкладки с закругленным торцом имеет конечное значение и наблюдается на торце. Для обкладки с прямоугольным торцом напряженность электрического поля неограниченно возрастает с приближением к точке примыкания торцевой и горизонтальной граней обкладки. С учетом того, что загибание края фольги приводит к увеличению напряженности появления частичных разрядов на 20 % по отношению к случаю с не загнутым краем [5], а следовательно росту ресурса конденсаторных секций в 2÷3 раза в соответствии с известной «формулой жизни» конденсаторной изоляции (обратно пропорциональная зависимость ресурса от напряженности электрического поля в степени 5÷6), сравнение результатов по расчету поля для закругленной и косоугольной формы торца дает возможность произвести оценку величины разрушаемого объема диэлектрика, определяющего ресурс. Так, анализируя данные рис. 2, можно сделать вывод, что характерный размер «напряженного объема» находится на уровне  $r = 0,05 \div 0,06 d$ . На данном расстоянии от края обкладки наблюда-

ется превышение напряженности поля на обкладке с косоугольным торцом в  $1,2 \div 1,15$  раза по отношению к конденсаторной конструкции с обкладкой, имеющей закругленный торец, что соответствует соотношению уровней напряженности появления частичных разрядов. Таким образом, подобная разница в уровнях напряженности поля при применении формулы жизни с показателем степени  $5 \div 6$  должна привести к разнице в ресурсах рассматриваемых конструкций в  $2 \div 3$  раза, как и указано в [6].

**Практическая реализация.** Найденное значение характерного размера «напряженного объема» позволяет произвести выбор лучшей конструкции конденсатора на этапе проектирования. Известно, что, например, применение комбинированной изоляции существенно влияет на распределение электрического поля у края обкладки в зависимости от процентного содержания компонентов и их порядка чередования в структуре изоляции [7].

Одним из возможных критериев для нахождения наилучшего соотношения толщин диэлектриков в составе комбинированной бумажно-пленочной изоляции является величина удельной запасаемой энергии. Поскольку удельная энергия пропорциональна  $W_{y0} = \varepsilon E_0^2 / 2$ , где  $E_0$  – рабочая напряженность электрического поля, то отношение удельных энергий двух любых сравниваемых конструкций с комбинированным диэлектриком можно представить в виде:

$$W_{y0,i} = W_{y0,j} \cdot \left( \frac{E_j}{E_i} \right)^2 \cdot \left( \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_j} \right), \quad (1)$$

где индексы  $i$  и  $j$  относятся к сравниваемым конструкциям;  $E$  – расчетная напряженность поля вблизи вершины острого угла края обкладки;  $\varepsilon$  – эквивалентная диэлектрическая проницаемость комбинированного диэлектрика.

В формуле (1) берется обратное отношение напряженностей поля ( $E_j/E_i$ ), вычисленных на расстоянии  $r = 0,05 \div 0,06 d$  для того, чтобы привести сравниваемые конструкции к одному значению ресурса, так как ресурс имеет степенную обратно пропорциональную зависимость от рабочей напряженности электрического поля. На рис. 3 приведена зависимость удельной энергии  $W_{y0}^* = W_{y0,i}/W_{y0,j}$  для конденсаторной конструкции с комбинированным бумажно-пленочным (полипропиленовым) диэлектриком от процентного содержания конденсаторной бумаги (бумага расположена у обкладки), рассчитанная по формуле (1).

В качестве базовой ( $W_{y0,j}$ ) взята удельная энергия, относящаяся к случаю полностью бумажной изоляции, пропитанной нефтяным маслом ( $\varepsilon_1 = 2,2$ ;  $\varepsilon_2 = 4,0$ ). При анализе кривых рис. 3 по причинам, изложенным выше, акцентируем внимание на кривой 2, относящейся к горизонтальной поверхности обкладки. Анализ графика показывает, что по результатам расчета поля, повышение удельной энергии на 20% конструкции с комбинированным диэлектриком структуры бумага-пленка-бумага можно достичь при использовании

тонких слоев бумаги, толщиной  $3\div 4\%$  от общей толщины изоляции. В реальных конструкциях конденсаторов с толщиной изоляции  $d \leq 100$  мкм применение данного способа повышения удельной энергии является проблематичным вследствие невозможности производства конденсаторной бумаги необходимой толщины ( $3\div 4$  мкм). Минимально возможной производимой конденсаторной бумагой является бумага с толщиной листа 6 мкм. Использование бумаги данной толщины в соответствии с рис.3. позволит повысить удельную энергию конденсаторной конструкции с комбинированным бумажно-полипропиленовым диэлектриком на 10 %.

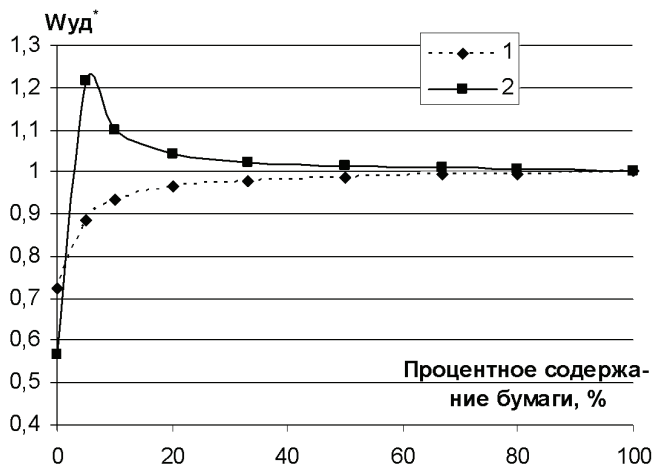


Рисунок 3 – Зависимость удельной энергии бумажно-полипропиленовой изоляции от процентного содержания бумаги (1 – для уровня напряженности на скосе обкладки; 2 – для уровня напряженности на горизонтальной поверхности обкладки)

**Выводы.** 1. Путем комплексного анализа результатов расчета электрического поля и имеющихся экспериментальных данных о ресурсных показателях для конденсаторных конструкций со скошенной и закругленной формой торца обкладки установлена относительная величина характерного размера «напряженного объема». Для высоковольтных импульсных конденсаторов (ВИК) с фольговыми обкладками характерный размер «напряженного объема» составляет  $5\div 6$  % толщины изоляции между обкладками ( $r = 0,05\div 0,06 d$ ).

2. На основе установленной величины характерного размера «напряженного объема» осуществлен выбор наиболее оптимальной структуры диэлектрика (процентного содержания компонентов изоляции) секции ВИК с бумажно-полипропиленовой изоляцией при расположении бумажной изоляции у обкладки. Для данной диэлектрической структуры повышения удельной запасаемой энергии можно добиться размещением у обкладки как можно более тонкого слоя бумажной изоляции, не превышающего характерного раз-

мера «напряженного объема».

Таким образом, показана практическая ценность полученного для ВИК с фольговыми обкладками значения характерного размера «напряженного объема», заключающаяся в возможности выбора из нескольких вариантов конструкций секций ВИК наиболее оптимального на основании расчета электрического поля и известных диэлектрических проницаемостей слоев изоляции. Критерием выбора могут выступать как предполагаемые ресурсные показатели сравниваемых секций, так и расчетные величины удельной запасаемой энергии.

**Список литературы.** 1. *Бржезицкий В.О., Сакова А.В., Рудаков В.В.* та ін. Техніка і електрофізика високих напруг: Навч. посібник / За ред. В.О. Бржезицького та В.М.Михайлова. – Харків: НТУ «ХПІ» – Торнадо, 2005. – 930 с. 2. Расчет эксплуатационных характеристик и применение электрических конденсаторов / *Беленький Б.П., Бондаренко П.Н., Борисова М.Э.* и др. – М.: Радио и связь, 1988. – 240 с. 3. *Набока Б.Г.* Расчеты электростатических полей в электроизоляционной технике. – К.: ИСИО, 1995. – 120 с. 4. *Рудаков В.В.* Оптимизация конструкции конденсатора // Техническая электродинамика. – 1996. – № 4. – С. 6-9. 5. *Пинталь Ю.С., Шахгеданова С.М., Шкрабляк Н.Н.* Влияние формы края и толщины электрода на характеристики частичных разрядов в конденсаторной бумажно-масляной изоляции // Тезисы докладов VI Всесоюзного научно-технического совещания «Повышение качества и улучшение технико-экономических показателей силовых конденсаторов и комплектных конденсаторных установок». – Серпухов.- Л.: ВНИИГ, 1991. – С. 55-56. 6. *Варшавский Д.С.* Итоги науки и техники // Сер. Электротехнические материалы, электрические конденсаторы, провода и кабели. – М.: ВИНТИ, 1991. – 110 с. 7. *Кравченко Ю.В., Рудаков В.В.* Распределение электрического поля у края обкладки конденсатора с произвольным наклоном грани торца // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск: Проблеми сучасної електротехніки. – Част. 4. – Київ: Інститут електродинаміки НАН України, 2008. – С. 129-132.

*Поступила в редколлегию 22.04.2010.*