

# Определение границ области «сильной неоднородности» электрического поля в различных диэлектриках секции высоковольтного импульсного конденсатора

А. Я. Дмитришин

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,  
г. Николаев, 54018, Украина, e-mail: [dphc@ipt.com.ua](mailto:dphc@ipt.com.ua)*

Поступила в редакцию 09.10.2020

После доработки 04.12.2020

Принята к публикации 07.12.2020

Разработана методика расчета коэффициента усиления электрического поля на краю обкладки секции конденсатора с различными диэлектрическими системами. Построена зависимость коэффициента усиления от коэффициента неоднородности рабочего диэлектрика и расстояния от края обкладки конденсатора. Определены границы области «сильной неоднородности» в рабочем диэлектрике секции высоковольтного импульсного конденсатора.

*Ключевые слова:* электрическое поле, секция конденсатора, методы расчета

УДК 621.319.4

<https://doi.org/10.52577/eom.2021.57.4.61>

## ВВЕДЕНИЕ

Институт импульсных процессов и технологий (ИИПТ) НАН Украины долгое время занимается созданием и изготовлением высоковольтных импульсных конденсаторов. Значительное внимание уделяется исследованию различного рода диэлектрических систем, которые могут быть использованы в качестве рабочего диэлектрика секции конденсатора. Известно, что основным фактором, определяющим допустимую рабочую напряженность электрического поля в конденсаторе, а, следовательно, удельные энергетические характеристики конденсатора и ресурс, является электрическое поле в рабочем диэлектрике секции конденсатора. Поэтому задача расчета электрических полей в конденсаторных конструкциях является актуальной.

Анализу влияния электрического поля в конденсаторах на их работоспособность за последние годы посвящено несколько работ. Так, в работе [1] рассмотрено влияние электрического поля на деградацию электролитических конденсаторов. В работе [2] исследован механизм старения диэлектрика и изменения емкости в электрических полях постоянного тока в многослойных керамических конденсаторах. К сожалению, подобных работ по конденсаторам с многослойной диэлектрической системой, используемой в конденсаторах, которые производит ИИПТ НАН Украины, в зарубежных изданиях автором не обнаружено, а в украинских изданиях этой тематике посвящена работа [3]. В работе [4] указано, что в диэлектриках с неоднородной структурой внешнее

электрическое поле может усиливаться. В тонких слоях неоднородного диэлектрика, расположенных перпендикулярно направлению поля, а также в газонаполненных сферических включениях внутреннее электрическое поле может в несколько раз превышать внешнее. Это явление негативно сказывается на качестве электроизоляционной системы высоковольтных приборов вообще и конденсаторов в частности и может приводить к возникновению таких нежелательных дефектов, как частичные разряды, и к электрическому пробоему их изоляционных промежутков.

Как указано в работе [5], основной причиной выхода из строя конденсатора является электрический пробой на краю обкладок секции. В работах [6, 7] представлены положения о «напряженном объеме» в конденсаторе – физической характеристике внутренней изоляции конденсаторных конструкций, которая определяет срок ее службы (ресурс).

*Цель работы* – расчет электрического поля на краю обкладки секции конденсатора с различными диэлектрическими системами и определение границ области «сильной неоднородности», влияющих на выбор более надежного рабочего диэлектрика его секции.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В общем виде рабочий диэлектрик секции конденсатора состоит из многослойной диэлектрической системы на основе твердых органических материалов, пропитываемых диэлектрической жидкостью.



Рис. 1. Расположение слоев твердого диэлектрика и пропитывающей жидкости на краю обкладок секции конденсатора.

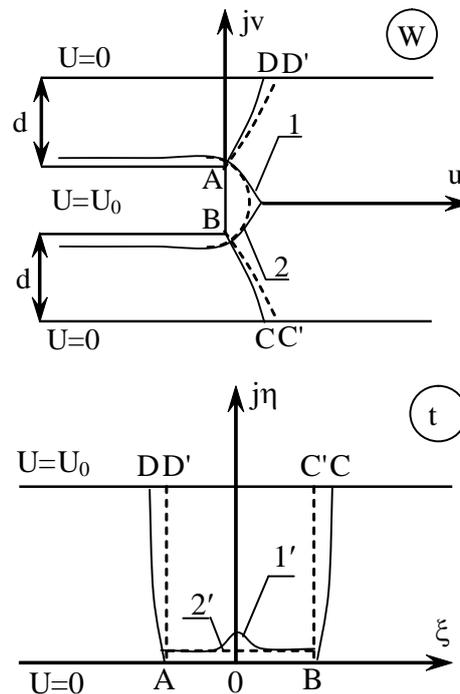


Рис. 2. Расчетная модель секции со сдвинутыми обкладками.

В процессе изготовления конденсатора его секции подпрессовываются с коэффициентом запрессовки  $k_3$ , и слой пропитывающей жидкости в них занимает положение, которое показано на рис. 1.

#### МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Для расчета электрического поля в секции конденсатора можно применить модель секции со сдвинутыми обкладками (рис. 2), которая была предложена в работе [8] и решена методом конформных отображений.

Электрическое поле может характеризоваться таким параметром, как коэффициент усиления, равный отношению напряженности электрического поля  $E$  к напряженности  $E_0$  однородного электрического поля:

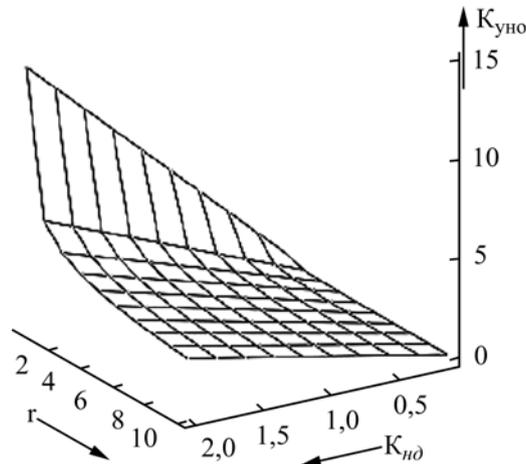
$$E_0 = U_0 / d, \quad (1)$$

где  $U_0$  – приложенное напряжение;  $d$  – суммарная толщина диэлектрической системы.

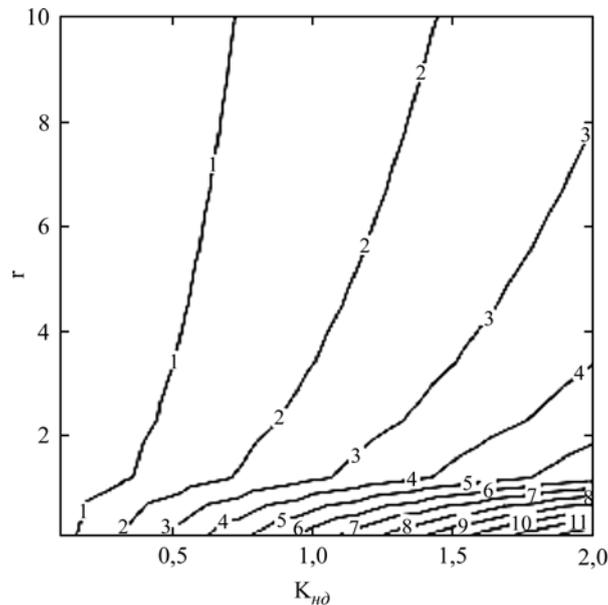
Под область «сильной неоднородности» понимают такое расстояние от края обкладки, на которой коэффициент усиления принимает значение больше двух. В этой области наблюдается увеличенная концентрация силовых линий, и ее размеры оказывают значительное влияние на формирование частичных разрядов, а, следовательно, на длительную электрическую прочность секции конденсатора. Увеличение области «сильной неоднородности» снижает концентрацию силовых линий, и соответственно диэлектрическая система, где эта область оказывается наибольшей, является оптимальной (наиболее рациональной) для рабочего диэлектрика секции конденсатора.

**Таблица.** Значения коэффициентов неоднородности для типичных диэлектрических структур

| Диэлектрическая структура   | $K_{нд}$ |
|---|----------|
| Бумажный диэлектрик, пропитанный касторовым маслом  | 1,204    |
| Бумажно-пленочный диэлектрик (с полипропиленом), пропитанный касторовым маслом                          | 0,758    |
| Бумажно-пленочный диэлектрик (с полиэтилентерефталатом), пропитанный касторовым маслом                  | 0,93     |
| Полипропиленовый диэлектрик, пропитанный фенолксилилэтаном  | 0,765    |
| Полиэтилентерефталатный диэлектрик, пропитанный трансформаторным маслом                                 | 1,166    |
| Комбинированный полипропиленово-полиэтилентерефталатный диэлектрик, пропитанный трансформаторным маслом | 0,957    |



**Рис. 3.** Зависимость коэффициента усиления поля в неоднородном диэлектрике от коэффициента неоднородности и расстояния от острого края обкладки.



**Рис. 4.** Профили зависимости коэффициента усиления электрического поля при его различных значениях.

Для однородного диэлектрика коэффициент усиления электрического поля  $K_{yo}$  на расстоянии  $r$  от острого края обкладки может быть вычислен по формуле [6]:

$$K_{yo} = \sqrt[3]{\frac{d}{\pi \times r \times a_n \times k_T}}, \quad (2)$$

где  $k_T$  – поправочный коэффициент [8],  $k_T = 1,5$ ;  $a_n$  – геометрический коэффициент:

$$a_n = \sqrt{1 - \left(1 / \left(1 + \frac{1}{2} \times n\right)\right)^2}, \quad (3)$$

где  $n$  – отношение толщины обкладки  $d_{об}$  к толщине диэлектрика  $d$ .

Для неоднородного диэлектрика можно записать:

$$K_{yno} = K_{yo} \times K_{нд}, \quad (4)$$

где  $K_{yno}$  – коэффициент усиления поля в неоднородном диэлектрике;  $K_{нд}$  – коэффициент неоднородности диэлектрика.

Следует указать, что коэффициент неоднородности трехкомпонентного диэлектрика можно определить по формуле [9]:

$$K_{н\delta} = \left[ \frac{d_p}{d} + \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_{m\delta 1}} \times \frac{d_{m\delta 1}}{d} + \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_{m\delta 2}} \times \frac{d_{m\delta 2}}{d} \right]^{-1}, \quad (5)$$

где  $d_{жс}$ ,  $d_{m\delta 1}$ ,  $d_{m\delta 2}$  – суммарные толщины слоев жидкости, первого твердого диэлектрика, второго твердого диэлектрика соответственно;  $\varepsilon_{жс}$ ,  $\varepsilon_{m\delta 1}$ ,  $\varepsilon_{m\delta 2}$  – относительные диэлектрические проницаемости слоев жидкости, первого твердого диэлектрика, второго твердого диэлектрика соответственно.

В общем виде толщины слоев соотносятся как:

$$d_p = \alpha_k d_{m\delta 1} = \beta_k d_{m\delta 2}, \quad (6)$$

где  $\alpha_k$ ,  $\beta_k$  – коэффициенты пропорциональности.

Для относительной диэлектрической проницаемости слоев можно записать:

$$\varepsilon_{жс} = \gamma_k \varepsilon_{пл1} = \delta_k \varepsilon_{пл2}, \quad (7)$$

где  $\gamma_k$ ,  $\delta_k$  – коэффициенты пропорциональности.

Толщина слоя жидкости может быть определена из выражения [10]:

$$d_p = d \times (1 - k_s). \quad (8)$$

С использованием (6), (7) и (8) выражение (5) можно записать как:

$$K_{н\delta} = \left[ (1 - k_s) \times \left( 1 + \frac{\alpha_k}{\gamma_k} + \frac{\beta_k}{\delta_k} \right) \right]^{-1}. \quad (9)$$

Итак, электрическое поле на краю обкладки секции конденсатора характеризуется двумя составляющими: геометрической ( $K_{yo}$ ) и технологической ( $K_{н\delta}$ ).

Так как коэффициент усиления поля для однородного диэлектрика  $K_{yo}$  для определенной модели является неизменным, то уменьшение напряженности электрического поля в неоднородной диэлектрической системе возможно за счет уменьшения коэффициента неоднородности  $K_{н\delta}$ , которое достигается уменьшением коэффициента запрессовки  $k_s$  и варьированием параметров  $\alpha_k$ ,  $\beta_k$ ,  $\gamma_k$  и  $\delta_k$ . В работе [9] автором было проанализировано влияние этих параметров на коэффициент неоднородности пленочных диэлектрических систем.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

В таблице представлены значения коэффициентов неоднородности для типичных диэлектрических структур, используемых в качестве рабочего диэлектрика в конденсаторах, изготавливаемых в ИИПТ НАН Украины.

Учитывая выражения (1), (4) и (9), можно построить зависимость коэффициента усиления поля в неоднородном диэлектрике  $K_{уно}$  от

коэффициента неоднородности  $K_{н\delta}$  и расстояния  $r$  от острого края обкладки. Такая зависимость приведена на рис. 3.

На рис. 4 приведены профили этой зависимости при различных значениях  $K_{уно}$ . Из этих профилей можно вычислить границы области «сильной неоднородности» для различных диэлектрических структур. Из данной зависимости видим, что, как и положено, коэффициент усиления электрического поля возрастает в области уменьшения  $r$ , то есть в приближении к обкладке секции конденсатора, а также при этом увеличивается и плотность силовых линий.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью изложенной методики расчета коэффициента усиления электрического поля и определения границ области «сильной неоднородности» можно выбрать такую диэлектрическую систему для рабочего диэлектрика секции конденсатора, которая будет более надежной с точки зрения ее электрической прочности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Renwick, J., Kulkarni, C.S., Celaya, J.R., Analysis of Electrolytic Capacitor Degradation under Electrical Overstress for Prognostic Studies, *Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society*, 18–24 October 2015, Coronado, CA, USA. <https://pdfs.semanticscholar.org/043d/e954ba4718a4d9e93c5ff2611d3aa9058fa5.pdf>
2. Takaaki Tsurumi, Motohiro Shono, Hirofumi Kakemoto, Satoshi Wada, et al. Mechanism of Capacitance Aging under DC Electric Fields in Multilayer Ceramic Capacitors with X7R Characteristics, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2005, vol. 44, part 1, no. 9B, p. 6989.
3. Малюшевская, А.П., Дмитришин, А.Я., Топоров, С.О., Изучение некоторых закономерностей разрушения полимерных пленочных диэлектриков под влиянием электрического поля в условиях ограничения частичных разрядов, *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: «Новые решения в современных технологиях», 2019, т. 5, с. 210.
4. Кислякова, Е.В., Электрическое поле в диэлектриках с неоднородной структурой, *Молодой ученый*. 2012, т. 12, с. 6. <https://moluch.ru/archive/47/5762/>.
5. Рудаков, В.В., Распределение электрического поля у края обкладки конденсатора с комбинированным диэлектриком, *Вестник ХПИУ*, 1998, т. 25, с. 12.
6. Рудаков, В.В. Срок службы кабельной изоляции как функция «напряженного объема», *Техническая электродинамика*, 1998, т. 5, с. 8.

7. Кравченко, Ю.В., Рудаков, В.В., Характерный размер «напряженного объема» высоковольтных фольговых импульсных конденсаторов, *Вестник Национального технического университета «ХПИ». Тематический выпуск «Техника и электрофизика высоких напряжений»*. 2010, т. 34, с. 89.
8. Титов, М.Н., Расчет электрического поля на краю секции конденсатора, *Электричество*, 1979, т. 11, с. 56.
9. Дмитришин, А.Я., Распределение электрического поля в компонентах пленочной диэлектрической системы высоковольтных импульсных конденсаторов. *Вестник Национального технического университета «ХПИ» Тематический выпуск «Техника и электрофизика высоких напряжений»*. 2010, т. 18, с. 76.
10. Ренне, В.Т., *Пленочные конденсаторы с органическим диэлектриком*. Л.: Энергия, 1971. 240 с.

### Summary

A method for calculating the electric field gain at the edge of the plate of a capacitor section with different dielectric systems has been developed. The dependence of the gain on the heterogeneity coefficient of the working dielectric and on the distance from the edge of the capacitor plate is constructed. The boundaries of the region of “high heterogeneity” in the working dielectric of the high-voltage pulse capacitor section are determined.

*Keywords:* electric field, capacitor section, calculation methods