

DOI 10.15589/jnn20160411
УДК 621.319.4
Д53

DISTRIBUTION OF THE ELECTRIC FIELD STRENGTH IN THE DIELECTRIC SYSTEMS OF THE HIGH-VOLTAGE PULSE CAPACITOR SECTIONS AT TRANSIENT

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ СЕКЦИЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ ПРИ ПЕРЕХОДНОМ ПРОЦЕССЕ

Oleksii Ya. Dmytrishyn
dphc@ipt.com.ua
ORCID: 0000-0003-2420-9223

А. Я. Дмитришин,
мл. науч. сотр.

*Institute of Pulse Processes and Technologies of NAS of Ukraine, Mykolaiv
Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, г. Николаев*

Abstract. The research aim is analysis and calculation of the distribution of electric field strength components in the dielectric systems of the sections of high voltage pulse capacitors at transient. Diagrams of dependence of electric field strength distribution from time have been built, on the example of two dielectric systems for the electric discharge dawnhole device. The advantages of film dielectric systems under combined paper-film systems that were used previously are shown.

Keywords: dielectric system; transients; capacitor section.

Анотація. Выполнен анализ и расчет распределения напряженности электрического поля в компонентах диэлектрической системы секций высоковольтных импульсных конденсаторов при переходном процессе. Установлено преимущество пленочных диэлектрических систем над комбинированными бумажно-пленочными системами, которые использовались ранее.

Ключевые слова: диэлектрическая система; переходный процесс; секция конденсатора.

Анотація. Виконано аналіз і розрахунок розподілу напруженості електричного поля в компонентах діелектричної системи секцій високовольтних імпульсних конденсаторів при перехідному процесі. Встановлено перевагу плівкових діелектричних систем над комбінованими паперово-плівковими системами, які використовувалися раніше.

Ключові слова: діелектрична система; перехідний процес; секція конденсатора.

REFERENCES

- [1] Grebennikov I. Yu, Gunko V. I., Dmitrishin A. Ya, Onischenko L. I., Shvets I. S. *O povyshenii udelnykh energeticheskikh kharakteristik i resursa vysokovoltnykh impulsnykh kondensatorov* [About increase specific energy characteristics and a resource of high-voltage pulse capacitors]. *Elektronnaya obrabotka materialov* [Surface Engineering and Applied Electrochemistry]. 2004, issue 5, pp. 70–73.
- [2] Dmitrishin A. Ya., Shcherba A. A. *Prognozirovanie nadezhnosti seksii vysokovoltnogo impulsnogo kondensatora s neodnorodnym plenochnym dielektrikom s pomoshchyu metoda resheniya uravneniya Laplasy* [Reliability

- analysis section of the high-voltage pulse capacitor with non-uniform film dielectric by the method of solving the Laplace equation]. *Tekhnichna Elektrodinamika. Tematichniy vypusk «Sylova elektronika ta energoefektivnist»* [Technical Electrodynamics. Special issue «Power Electronics and Energy Efficiency»]. Vol.4, 2009, pp. 68–71.
- [3] Konotop V. V. *Osnovy proektirovaniya vysokovoltnykh impulsnykh ustroystv* [Bases of high-voltage pulse devices design]. Kharkov, KhPI Publ., 1973. 144 p.
- [4] Kuchinskiy G. S., Nazarov N. I. *Silovye elektricheskie kondensatory* [Electric Power capacitors]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1992. 320 p.
- [5] Titov M. N. *Vliyaniye neodnorodnostey struktury dielektrika na lokalnye napryazhennosti elektricheskogo polya kondensatora* [Influence of inhomogeneities of the dielectric structure on the local electric field intensity of the capacitor]. *I Vsesoyuz. konf. po elektricheskomu razryadu v zhidkosti (Nikolaev, 1976) tez. dokl.* [Proc. of the 1st All-Union conference about electrical discharge in fluids (was held in Mykolaiv, 1976)]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 1976, vol. 1, pp. 89–90.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Высоковольтные импульсные конденсаторы находят широкое применение в различных областях науки и техники в качестве накопителей электрической энергии генераторов импульсных токов (ГИТ) и напряжений (ГИН).

В настоящее время выпускается большое количество типов высоковольтных импульсных конденсаторов, отличающихся конструкцией, типом применяемого диэлектрика, рабочим напряжением, индуктивностью, запасаемой энергией, сроком службы и надежностью, режимом работы и условиями эксплуатации. Для ряда ГИТ и ГИН, в которых массогабаритные параметры имеют ограничения, таких как погружные скважинные установки, лазеры, вопрос повышения энергетических параметров, в частности удельной запасаемой энергии, и ресурса высоковольтных импульсных конденсаторов является актуальной задачей.

Удельная запасаемая энергия конденсатора по объему определяется по известной формуле [3]:

$$w_{\text{уд}} = \frac{1}{2} \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot E_p^2, \quad (1)$$

где ε — эквивалентная относительная диэлектрическая проницаемость конденсаторной изоляции; ε_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума; E_p — рабочая напряженность электрического поля в конденсаторной изоляции.

Ресурс высоковольтного импульсного конденсатора можно определить по формуле [3]:

$$N = A_1 \cdot E_p^{-m}, \quad (2)$$

где A_1 и m — экспериментально полученные коэффициенты, зависящие от технологии изготовления и режима эксплуатации.

Как видно из приведенных формул рабочая напряженность электрического поля в конденсаторной изоляции является одной из важнейших составляющих, которые определяют параметры высоковольтного импульсного конденсатора.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Проведенные в Институте импульсных процессов и технологий НАН Украины исследования [1] показали, что повышение удельной запасаемой энергии и ресурса высоковольтных импульсных конденсаторов возможно за счет применения в качестве конденсаторной изоляции пленочных диэлектрических систем, состоящих из слоев полимерных пленок, пропитанных диэлектрическими жидкостями с низкой вязкостью, высокой газостойкостью и низким тангенсом угла потерь.

В работе [2] показано, что распределение напряженности электрического поля по компонентам диэлектрической системы оказывает влияние на кратковременную электрическую прочность секции конденсатора, а, следовательно, и на надежность конденсатора в целом.

Однако до сих пор вопрос распределения напряженности электрического поля по компонентам диэлектрической системы при переходном процессе заряда конденсатора, как в пленочных диэлектрических системах, так и в бумажно-пленочных диэлектрических системах, рассмотрен не был.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ — исследование особенностей распределения напряженности электрического поля в диэлектрических системах секций высоковольтных импульсных конденсаторов при переходном процессе.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Пленочные диэлектрические системы по сравнению с бумажно-пленочными отличаются меньшей толщиной (около 55–60 мкм для бумажно-пленочного диэлектрика и 34–40 мкм для пленочного), что оказывает влияние не только на массогабаритные параметры конденсатора, но и на картину поля на краю обкладок, где поле становится более неоднородным.

Использование только полимерной пленки без конденсаторной бумаги существенно повышает пробивную напряженность электрического поля, что позволяет повысить и рабочую напряженность электрического поля в диэлектрике секций конденсатора [1].

Так, для бумажно-пленочного диэлектрика они составляют 300 – 350 кВ/мм и 85 – 110 кВ/мм соответственно, а для пленочного — 390 – 450 кВ/мм и 100 – 200 кВ/мм. Кроме того, применение пленочного диэлектрика позволяет повысить ресурс и надежность конденсатора за счет изменения картины поля по всей толщине диэлектрика.

Причинами появления искажений поля в диэлектрике могут быть как неоднородности в структуре самих составляющих диэлектрик материалов, так и наличие в них посторонних включений из материалов, отличающихся по своим свойствам (различных диэлектрических и токопроводящих включений), газовых пузырьков в пропитывающей жидкости. В реальном бумажном листе хаотичность расположения волокон клетчатки обуславливает появление локальных искажений поля, определяемых геометрией пор. Неоднородности структуры бумаги будут сказываться тем резче, чем больше различаются между собой диэлектрические проницаемости клетчатки и пропитывающей жидкости [5]. Можно сделать предположение, что исключение из состава диэлектрика секции конденсатора бумажной составляющей не только напрямую уменьшит неоднородность поля, но и повлияет на распределение его между компонентами, т.к. диэлектрические проницаемости полимерных пленок и используемых пропитывающих жидкостей близки по значению.

Для примера рассмотрим распределение напряженности электрического поля в компонентах диэлектрика секции высоковольтного импульсного конденсатора для погружных электроразрядных комплексов при заряде. Используемая в таких конденсаторах бумажно-пленочная система состоит из слоев конденсаторной бумаги КОН-2 и полиэтилентерефталатной пленки ПЭТ-КЭ, пропитанных касторовым маслом (рис. 1, а). В качестве пленочной системы в новой разработанной конструкции конденсатора предложена система, состоящая из двух слоев полипропиленовой пленки ПП-КСШ (пленка 1, поз. 4) и одного слоя полиэтилентерефталатной пленки ПЭТ-КЭ (пленка 2,

поз. 3), пропитанных полиметилсилоксановой жидкостью ПМС-20 (рис. 1, б).

При включении многокомпонентного диэлектрика, содержащего компоненты с различными электрофизическими параметрами и, следовательно, с различными собственными постоянными времени, под напряжение, в ходе переходного процесса, когда напряжение на нем растет, происходит перераспределение напряженностей поля между компонентами E_j , распределение которых между ними в этот период описывается формулой [4]:

$$E_j = \frac{E_0 \cdot d}{\epsilon_{rj} \cdot \sigma_\epsilon}, \tag{3}$$

где E_0 — расчетная напряженность поля в диэлектрической системе;

$$E_0 = U_0 / d, \tag{4}$$

U_0 — приложенное напряжение; d — суммарная толщина диэлектрической системы;

$$\sigma_\epsilon = \sum_{j=1}^n (d_j / \epsilon_{rj}), \tag{5}$$

d_j — толщина j -го компонента диэлектрической системы; ϵ_{rj} — относительная диэлектрическая проницаемость j -го компонента диэлектрической системы.

Хотя собственные постоянные времени компонентов различны, процесс перераспределения напряженностей между ними независимо от рода напряжения происходит по одной и той же общей постоянной времени τ , которая определяется свойствами используемых диэлектриков. Для трехкомпонентного бумажно-пленочного диэлектрика:

$$\tau = \epsilon_0 \cdot \epsilon_{rб} \cdot \epsilon_{rп} \cdot \rho_б \cdot \rho_п \cdot \sigma_\epsilon / \sigma_p, \tag{6}$$

где $\epsilon_{rб}$ и $\epsilon_{rп}$ — относительные диэлектрические проницаемости бумаги и пленки соответственно; $\rho_б$ и $\rho_п$ — удельные объемные сопротивления бумаги и пленки соответственно;

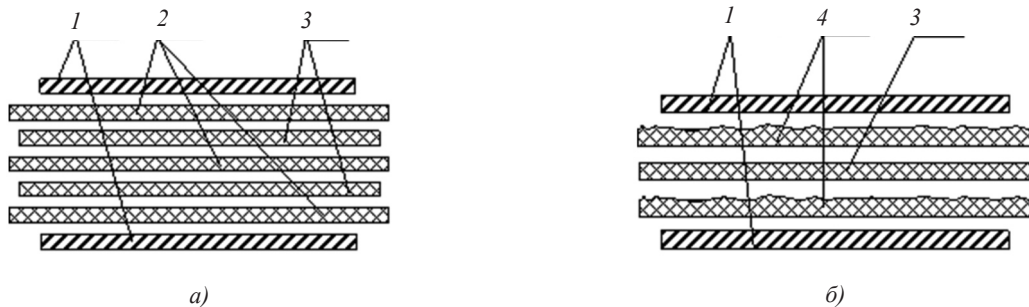


Рис. 1. Структуры диэлектрических систем конденсаторной изоляции бумажно-пленочной (а) и пленочной (б): 1 — обкладка из алюминиевой фольги; 2 — диэлектрик из конденсаторной бумаги КОН2; 3 — диэлектрик из полиэтилентерефталатной пленки ПЭТ-КЭ; 4 — диэлектрик из односторонне шероховатой полипропиленовой пленки ПП-КСШ

$$\sigma_\rho = \sum_{j=1}^n \rho_j \cdot d_j, \quad (7)$$

где ρ_j — удельное объемное сопротивление j -го компонента диэлектрической системы.

Для трехкомпонентного пленочного диэлектрика:

$$\tau_n = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{rn1} \cdot \varepsilon_{rn2} \cdot \rho_{n1} \cdot \rho_{n2} \cdot \sigma_\varepsilon / \sigma_\rho, \quad (8)$$

где ε_{rn1} и ε_{rn2} — относительные диэлектрические проницаемости пленки 1 и пленки 2 соответственно; ρ_{n1} и ρ_{n2} — удельные объемные сопротивления пленки 1 и пленки 2 соответственно.

Зависимости изменения напряженности в компонентах в переходном процессе при постоянном напряжении:

– для бумажно-пленочного диэлектрика

$$E_j = B_j \cdot U \cdot \exp(-t/\tau_{\text{он}}) + F_j \cdot U, \quad (9)$$

где U — напряжение заряда конденсатора;
– для пленочного диэлектрика

$$E_j = B_j \cdot U \cdot \exp(-t/\tau_n) + F_j \cdot U. \quad (10)$$

Коэффициенты B_j и F_j определяются по формулам:

$$B_j = (\sigma_\rho - \varepsilon_{rj} \cdot \rho_j \cdot \sigma_\varepsilon) / \varepsilon_{rj} \cdot \sigma_\rho \cdot \sigma_\varepsilon; \quad (11)$$

$$F_j = \rho_j / \sigma_\rho. \quad (12)$$

Зависимости распределения напряженности электрического поля по компонентам для рассматриваемых диэлектрических систем при переходном процессе изображены на рис. 2 и 3.

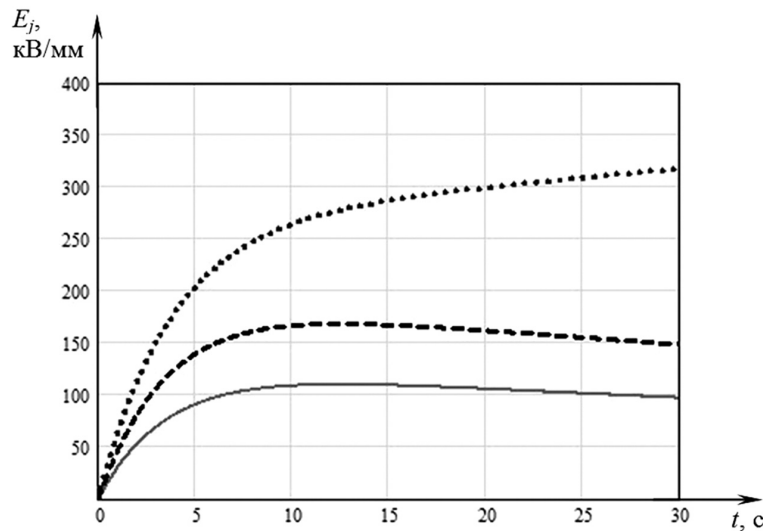


Рис. 2. Распределение напряженности электрического поля в компонентах бумажно-пленочной диэлектрической системы: 1 — полиэтилентерефталатная пленка; 2 — касторовое масло; 3 — конденсаторная бумага

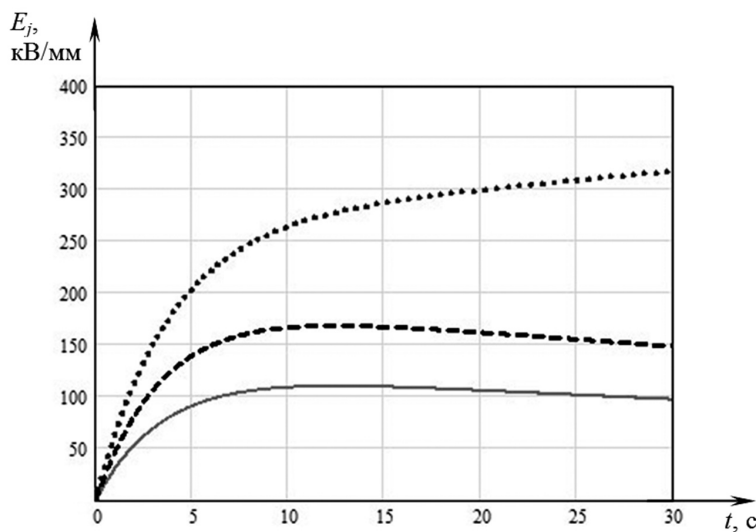


Рис. 3. Распределение напряженности электрического поля в компонентах пленочной диэлектрической системы: 1 — полипропиленовая пленка; 2 — полиметилсилоксановая жидкость ПМС-20; 3 — полиэтилентерефталатная пленка

Анализируя графики можно отметить, что в бумажно-пленочном диэлектрике со временем происходит «нагружение» пленки, т.е. резкое возрастание напряженности электрического поля в ней, что при длительных временах заряда конденсатора может привести к снижению электрической прочности всей диэлектрической системы.

В пленочной диэлектрической системе распределение напряженности электрического поля по компонентам равномерное. Кроме того, установившийся режим достигается за более короткое время. Это служит подтверждением предположения о более высо-

кой электрической прочности пленочной диэлектрической системы по сравнению с бумажно-пленочной.

ВЫВОДЫ. 1. Установлено, что при переходном зарядном процессе распределение напряженности электрического поля в компонентах у пленочной диэлектрической системы более однородно, чем у бумажно-пленочной. 2. Применение в качестве рабочего диэлектрика секции высоковольтного импульсного конденсатора пленочных диэлектрических систем качественно улучшает картину электрического поля в секции, что приводит к повышению надежности конденсатора в целом.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Гребенников, И. Ю.** О повышении удельных энергетических характеристик и ресурса высоковольтных импульсных конденсаторов [Текст] / И. Ю. Гребенников, В. И. Гунько, А. Я. Дмитришин, Л. И. Онищенко, И. С. Швец // Электронная обработка материалов. — 2004. — № 5. — С. 70–73.
- [2] **Дмитришин, А. Я.** Прогнозирование надежности секции высоковольтного импульсного конденсатора с неоднородным пленочным диэлектриком с помощью метода решения уравнения Лапласа [Текст] / А. Я. Дмитришин, А. А. Щерба // Технічна Електродинаміка. Тематичний випуск «Силова електроніка та енергоефективність». Ч. 4. — 2009. — С. 68–71.
- [3] **Конотоп, В. В.** Основы проектирования высоковольтных импульсных устройств [Текст] / В. В. Конотоп. — Харьков : ХПИ, 1973. — 144 с.
- [4] **Кучинский, Г. С.** Силовые электрические конденсаторы [Текст] / Г. С. Кучинский, Н. И. Назаров. — М. : Энергоатомиздат, 1992. — 320 с.
- [5] **Титов, М. Н.** Влияние неоднородностей структуры диэлектрика на локальные напряженности электрического поля конденсатора [Текст] / М. Н. Титов // I Всесоюз. конф. по электрическому разряду в жидкости (Николаев, 1976 г.) тез. докл. — Киев: Наукова думка, 1976. — Ч. I. — С. 89–90.

© О. Я. Дмитришин
 Надійшла до редколегії 12.07.2016
 Статтю рекомендує до друку
 д-р техн. наук, проф. Н. І. Кускова