

УДК 621.319.4

**О.Я. ДМИТРИШИН****РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ В ПЛІВКОВІЙ ДІЕЛЕКТРИЧНІЙ СИСТЕМІ ЯК СПОСІБ ПРОГНОЗУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МІЦНОСТІ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ІМПУЛЬСНОГО КОНДЕНСАТОРА**

Розглянуто питання визначення напруженості електричного поля в плівковій діелектричній системі, яка може бути використана у якості робочого діелектрика секції високовольтного імпульсного конденсатора. Досліджено вплив напруженості електричного поля на електричну міцність комбінованої плівкової діелектричної системи. Проведено порівняння розрахункових даних з експериментальними, на основі якого зроблені висновки про можливість прогнозування електричної міцності плівкових діелектричних систем.

**Ключові слова:** напруженість електричного поля, плівкова діелектрична система, електрична міцність, секція високовольтного імпульсного конденсатора.

**А.Я. ДМИТРИШИН****РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПЛЕНОЧНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ КАК СПОСОБ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИМПУЛЬСНОГО КОНДЕНСАТОРА /**

Рассмотрены вопросы определения напряженности электрического поля в пленочной диэлектрической системе, которая может быть использована в качестве рабочего диэлектрика секции высоковольтного импульсного конденсатора. Исследовано влияние напряженности электрического поля на электрическую прочность комбинированной пленочной диэлектрической системы. Проведено сравнение расчетных данных с экспериментальными, на основании которого сделаны выводы о возможности прогнозирования электрической прочности пленочных диэлектрических систем.

**Ключевые слова:** напряженность электрического поля, пленочная диэлектрическая система, электрическая прочность, секция высоковольтного импульсного конденсатора.

**A.YA. DMITRISHIN****CALCULATION OF THE ELECTRIC FIELD IN A FILM DIELECTRIC SYSTEM AS A METHOD FOR PREDICTING THE ELECTRICAL STRENGTH OF A HIGH-VOLTAGE PULSE CAPACITOR /**

The problems of determining the electric field strength in a film dielectric system, which can be used as a working dielectric in the section of a high-voltage pulse capacitor, are considered. The effect of the density of electric field on the electrical strength of a combined film dielectric system is studied. Methods of solution of the Laplace equation and of conformal mappings are used for calculations. Comparison of calculated data with experimental data, on the basis of which conclusions are made about the possibility of predicting the electrical strength of film dielectric systems, is made. It's shown that for combined film dielectric systems of the same qualitative composition, the geometric dimensions and the coefficient of heterogeneity affects the electrical strength more than the distribution of the electric field intensity on the components of this system.

**Keywords:** density of electric field, film dielectric system, dielectric strength, section of high-voltage pulse capacitor.

**Вступ.** Основним фактором, що визначає допустиму величину робочої напруженості електричного поля, та, відповідно, питомі енергетичні характеристики конденсатора й ресурс, є електричне поле в робочому діелектрику секції конденсатора.

Умовно електричне поле в секції можливо розділити на дві області – область «слабкої неоднорідності» (у середині секції) і область «сильної неоднорідності» (на краю обкладок). Більшість робіт по дослідженню електричного поля в конденсаторних конструкціях присвячені дослідженню електричного поля на краю обкладок секції конденсатора та інших крайових задач [1, 2, 3]. Показано, що напруженість електричного поля на краю обкладки впливає на довготривалу електричну міцність конденсатора в цілому. Питання розподілу напруженості електричного поля по компонентам діелектричної системи (в області «слаб-

кої неоднорідності») не приділялося достатньо уваги, але, як показують дослідження, приведені в [4], цей розподіл впливає на короточасну електричну міцність секції конденсатора, а, відповідно, й на надійність конденсатора в цілому.

Крім того, відома залежність середнього ресурса конденсатора  $N_{cp}$ , що очікується, від робочої напруженості електричного поля  $E$  [5]

$$N_{cp} = A_1 \cdot E^{-m}, \quad (1)$$

де  $A_1$  – експериментальна стала для визначеного типу діелектрика;  $m$  – показник ступеня, що залежить від виду діелектричної системи та рівня напруженості електричного поля.

Для широкого класу електричних конденсаторів при робочих напруженостях електричного поля  $E_p$ , близьких до напруженості початкових часткових роз-

рядів  $E_n$ , показник ступеня  $m$  має значення від 4 до 6. Для  $E_p$ , яка змінюється від  $E_n$  до напруженості критичних часткових розрядів  $E'_{кр}$ , значення  $m$  змінюється від 6 до 10. При  $E_p > E'_{кр}$  показник ступеня  $m$  від 10 до 36. При низьких робочих градієнтах (напруженості) електричного поля ( $E_p \approx E_n$ ) пробої робочого діелектрика секції конденсатора відбуваються біля края обкладок. При  $E_p \geq E'_{кр}$  пробої ізоляції розподіляються по площі обкладок секції, в тому числі й біля країв обкладок [6].

Така істотна залежність середнього ресурса, що очікується, від невеликих змін робочих градієнтів електричного поля, згідно формули (1), показує, що дослідження електричного поля в конденсаторних конструк-

ціях є актуальною науковою й практичною задачею.

**Мета** даної роботи – визначення можливості прогнозування електричної міцності секції конденсатора з комбінованою плівковою діелектричною системою за допомогою розрахунку напруженості електричного поля в ній.

**Основна частина.** В якості об'єкта досліджень вибрані комбіновані плівкові діелектричні системи на основі поліпропіленової (ПП) і поліетилентерефталатної (ПЕТ) плівок, що просочені трансформаторним маслом Т-1500, номінальними товщинами  $d_n$  що дорівнюють 30, 34, 35 і 39 мкм. Параметри цих систем приведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Параметри комбінованих плівкових діелектричних систем з різною товщиною

$d_n$ , мкм	$d$ , мкм	$d_{пл1}$ , мкм	$d_{\Sigma пл1}$ , мкм	$d_{пл2}$ , мкм	$d_{\Sigma пл2}$ , мкм	$d_{рід}$ , мкм	$d_{\Sigma рід}$ , мкм	$\epsilon_{екв}$	$\epsilon_{пл1}$	$\epsilon_{пл2}$	$\epsilon_{рід}$
30	36,145	10	20	10	10	1,536	6,145	2,965	2,2	3,2	2,2
34	40,964	12	24	10	10	1,741	6,964	2,660			
35	42,169	10	20	15	15	1,792	7,169	2,699			
39	46,988	12	24	15	15	1,997	7,988	2,444			

Примітка.  $\epsilon_{екв}$  – еквівалентна діелектрична проникність діелектричної системи

Такі системи за даними робіт [7, 8] є найбільш придатними для використання в якості робочого діелектрику секцій високовольтних імпульсних конденсаторів.

Тут  $d_{рід}$ ,  $d_{пл1}$ ,  $d_{пл2}$  – товщина шару рідини, шару першої плівки (ПП) і другої плівки (ПЕТ) відповідно;  $\epsilon_{рід}$ ,  $\epsilon_{пл1}$ ,  $\epsilon_{пл2}$  – діелектрична проникність рідини, першої й другої плівки відповідно;  $d_{\Sigma рід}$ ,  $d_{\Sigma пл1}$ ,  $d_{\Sigma пл2}$  – сумарні товщини шарів рідини, першої й другої плівки відповідно.

У роботі [4] показано, що напруженість електричного поля в області «слабкої неоднорідності» може бути визначена методом рішення рівняння Лапласа для двовимірного випадку.

На рис. 1 приведена розрахункова модель тришарової плівкової діелектричної системи.

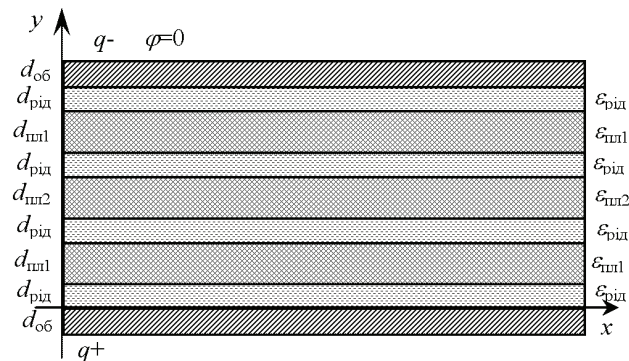


Рисунок 1 – Розрахункова модель тришарової плівкової діелектричної системи

Для діелектричної системи плаского конденсатора рівняння Лапласа для потенціалу електричного поля  $\varphi$  залежить від одної змінної по осі ординат  $y$  і виглядає як

$$\nabla^2 \varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0. \quad (2)$$

Рішаючи (2) отримаємо вираз для потенціалу електричного поля

$$\varphi = A \cdot y + B, \quad (3)$$

де  $A, B$  – матриці коефіцієнтів.

Напруженість електричного поля

$$E = -grad \varphi = -\frac{\partial \varphi}{\partial y} = -A. \quad (4)$$

У табл. 2 приведені дані розрахунку напруженості електричного поля в компонентах плівкової діелектричної системи для різних товщин при робочій напрузі  $U_p = 6$  кВ.

Аналізуючи дані табл. 2, можна відмітити, що у системи товщиною 30 мкм напруженість електричного поля в рідкому діелектрику (найбільш електрично слабкому компоненті) максимальна, а у системи товщиною 39 мкм – мінімальна. Можливо припустити, що й електрична міцність у цих систем буде збільшуватися з ростом товщини.

Таблиця 2 – Дані розрахунку напруженості електричного поля в компонентах плівкової діелектричної системи для різних товщин

$d_n$ , мкм	$E_{пл1}$ , кВ/мм	$E_{пл2}$ , кВ/мм	$E_{рід}$ , кВ/мм
30	218,91	150,50	218,91
34	191,07	131,36	191,07
35	188,42	129,54	188,42
39	170,91	117,50	170,91

У роботі [9] одержано вираз для визначення коефіцієнту неоднорідності електричного поля для трьохкомпонентної діелектричної системи.

$$K_{но} = \left[ \frac{d_{\Sigma ж} + \epsilon_{ж} \cdot \frac{d_{\Sigma н1}}{d} + \epsilon_{ж} \cdot \frac{d_{\Sigma н2}}{d}}{d} \right]^{-1}. \quad (5)$$

Цей коефіцієнт характеризує викривлення коефіцієнту посилення електричного поля, тобто відношення напруженості електричного поля в конкретній точці до початкової напруженості  $E_0 = U_0/d_n$ , де  $U_0$  – прикладена до обкладок конденсатора напруга.

У роботі [10] представлена методика розрахунку «напруженого об'єму»  $V_n$ , для плівкових діелектричних систем, який, згідно [3] зворотно пропорційний ресурсу конденсатора (довгочасній електричній міцності).

В таблиці 3 приведено результати розрахунку коефіцієнта неоднорідності, критичної напруженості  $E_{кр}$ , «напруженого об'єму» і радіусу області з підвищеною напруженістю  $r_n$  для обраних діелектричних систем при початковій напруженості електричного поля  $E_0 = 100$  кВ/мм.

Таблиця 3 – Дані розрахунку для обраних діелектричних систем

$d_n$ , мкм	$K_{н\partial}$	$E_{кр}$ , кВ/мм	$V_n$ , мм <sup>3</sup>	$r_n$ , мкм
30	0,909	411,4	0,202	19,00
34	0,899	407,3	0,261	21,61
35	0,934	421,8	0,270	21,99
39	0,929	419,7	0,336	24,54

Аналізуючи дані, які приведені в таблиці 3 можна відмітити, що у системи товщиною 34 мкм коефіцієнт неоднорідності менше, ніж у системи товщиною 30 мкм, тобто у системи товщиною 34 мкм можна припустити більшу короточасну електричну міцність. Що стосується «напруженого об'єму»  $V_n$  і радіусу області з підвищеною напруженістю  $r_n$ , то видно, що зі збільшенням товщини вони збільшуються, і, відповідно, ресурс буде зменшуватися.

На рис. 2 приведена залежність напруженості електричного поля  $E$  від відстані  $r$  до гострого краю обкладки й товщини діелектрика  $d$  при нарузі на обкладках 6 кВ.

Електричне поле може характеризуватися таким параметром як коефіцієнт посилення електричного поля, що дорівнює відношенню напруженості електричного поля  $E$  до напруженості  $E_0$  однорідного електричного поля.

$$E = K_n \cdot E_0, \tag{6}$$

де  $K_n$  – коефіцієнт посилення електричного поля.

$$K_n = K_{н\partial} \cdot K_0, \tag{7}$$

де  $K_0$  – коефіцієнт посилення однорідного електричного поля.

Вираз для  $K_0$  отримано в роботі [2] методом конформних відображень.

$$K_0 = \sqrt[3]{\frac{d}{\pi \cdot a_n \cdot k_T}} \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{r}}, \tag{8}$$

де  $k_T$  – поправочний коефіцієнт [2],  $k_T = 1,5$ ;  $a_n$  – геометричний коефіцієнт;

$$a_n = \sqrt{1 - (1/(1 + \frac{1}{2} \cdot n))^2}, \tag{9}$$

де  $n$  – відношення товщини обкладки  $d_{об}$  до товщини діелектрика  $d$ .

Аналізуючи зазначену на рис. 2 залежність можна відзначити, що напруженість електричного поля поблизу краю обкладки у діелектричній системі товщиною 39 мкм вище, ніж у системі товщиною 30 мкм. Отже, очікуваний ресурс діелектричній системі меншою за товщиною буде вище, незважаючи на більш високе значення напруженості електричного поля в рідині в області «слабкої неоднорідності», в залежності від коефіцієнта запасу по електричній міцності.

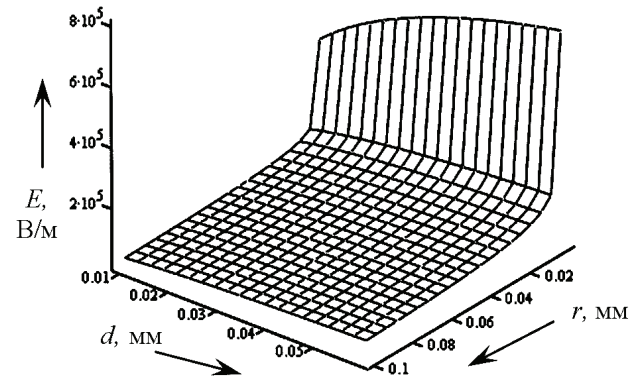


Рисунок 2 – Залежність напруженості електричного поля від відстані  $r$  до гострого краю обкладки й товщини діелектрика

У табл. 4 наведені експериментальні дані по визначенню пробивної напруженості  $E_{пр}$  (короточасної електричної міцності) для досліджуваних систем [7].

Таблиця 4 – Середні значення пробивної напруженості електричного поля для обраних систем

$d$ , мкм	30	34	35	39
$E_{пр}$ , кВ/мм	420,0	423,5	402,9	379,5

Дані табл. 4 підтверджують отримані теоретично припущення, висловлені на підставі розрахунку коефіцієнта неоднорідності. Що стосується значень напруженості електричного поля в компонентах діелектрика (див. табл. 2), а саме - зменшення електричної міцності зі збільшенням напруженості в рідкому діелектрику, не підтвердилося, хоча для плівкових діелектричних систем з різним складом в роботі [4] дане припущення підтверджується. Це свідчить про те, що в комбінованих діелектричних системах фактор впливу розподілу напруженості електричного поля не домінує над фактором неоднорідності системи.

У табл. 5 наведені експериментальні дані по визначенню середнього ресурсу  $N_{ср}$ , що очікується (довгочасної електричної міцності) для досліджуваних систем, при напруженості електричного поля  $E_0 = 150$  кВ/мм [8].

Таблиця 5 – Середні значення ресурсу для обраних систем

$d$ , мкм	30	34	35	39
$N_{ср}$ , зарядів-розрядів	$1,39 \cdot 10^7$	$1,42 \cdot 10^6$	$1,33 \cdot 10^6$	$3,71 \cdot 10^5$

Дані у табл. 5 підтверджують дані розрахунку в табл. 3, тобто у діелектричних систем з меншим «напруженим об'ємом» ресурс вище.

**Висновки.** Прогнозування електричної міцності комбінованих плівкових діелектричних систем за допомогою методів розрахунку напруженості електричного поля достовірно, що підтверджується експериментальними даними. Для комбінованих плівкових діелектричних систем одного якісного складу геометричні розміри і коефіцієнт неоднорідності впливає на електричну міцність більше, ніж розподіл напруженості електричного поля по компонентах цієї системи.

#### Список літератури:

1. Рудаков В.В. Распределение электрического поля у края обкладки конденсатора с комбинированным диэлектриком. / В.В. Рудаков // Вестник ХГПУ. – 1998. – № 25. – С. 12-16.
2. Титов М.Н. Расчет электрического поля на краю секции конденсатора / М.Н. Титов // Электричество. – 1979. – № 11. – С. 56-58.
3. Рудаков В.В. Срок службы кабельной изоляции как функция «напряженного объема» / В.В. Рудаков // Техническая электродинамика. – 1998. – № 5. – С. 8-10.
4. Дмитришин А.Я. Прогнозирование надежности секции высоковольтного импульсного конденсатора с неоднородным пленочным диэлектриком с помощью метода решения уравнения Лапласа / А.Я. Дмитришин, А.А. Щерба // Техническая электродинамика. Тематический выпуск «Силовая электроника и энергоэффективность». – 2009. – № 4. – С. 8-10.
5. Конотоп В.В. Основы проектирования высоковольтных импульсных устройств / В. В. Конотоп. – Харьков: ХПИ, 1973. – 144 с.
6. Рудаков В.В. Сильні електричні поля в конденсаторних конструкціях та удосконалення високовольтних силових конденсаторів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук: спец. 05.09.13 «Техніка сильних електричних та магнітних полів» / В.В. Рудаков. – Х.: 1999. – 35 с.
7. Gun'ko V.I. Investigations of the constructions of film dielectrics for high-voltage pulse capacitors / V.I. Gun'ko, A.Ya. Dmitrishin, L.I. Onishchenko, S.O. Toporov, T.A. Feshchuk // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2012. – Vol. 48, № 2. – P. 167-169.
8. Дмитришин А.Я. Оценка длительной электрической прочности различных конструкций пленочного диэлектрика для высоковольтных импульсных конденсаторов / А.Я. Дмитришин, И.Ю. Гребенников, С.О. Топоров, Е.Н. Слепец // Электронная обработка материалов. – 2014. – № 5. – С. 92-94.
9. Дмитришин А.Я. Определение коэффициента неоднородности пленочной диэлектрической системы секции высоковольтного импульсного конденсатора / А.Я. Дмитришин // Материалы XV Международной научной конференции «Физика импульсных разрядов в конденсированных средах». – Николаев, 2011. – С. 205-208.
10. Дмитришин А.Я. Определение «напряженного объема» для пленочных диэлектрических систем высоковольтных конденсаторов / А.Я. Дмитришин // Сборник научных трудов НУК. – 2010. – № 4. – С. 125-129.

#### References (transliterated):

1. Rudakov V.V. Raspredelenie elektricheskogo polya u kraia obkladki kondensatora s kombinirovannyim dielektrikom [The distribution of the electric field at the edge of the capacitor

- plate with a combined dielectric]. Vestnik KhGPU [Bulletin of the National Technical University «KhPI»], 1998. Vol. 25. P. 12-16.
2. Titov M.N. Raschet elektricheskogo polya na kraju sektsii kondensatora [Calculation of the electric field at the edge of the capacitor section]. Elektrichestvo [Electricity], 1979. No. 11. P. 56-58.
  3. Rudakov V.V. Srok sluzhby kabelnoj izolyatsii kak funktsiya «napryazhonnogo ob'yoma» [The lifetime of cable insulation as a function of "stressed volume"]. Tehnicheskaya elektrodinamika [Technical electrodynamics], 1998. No. 5. P. 8-10.
  4. Dmitrishin A.Ya., Scherba A.A. Prognozirovanie nadezhnosti sektsii vyisokovoltного impulsного конденсатора s neodnorodnym plenochnym dielektrikom s pomoschyu metoda resheniya uravneniya Laplasa [Forecasting the reliability of a section of a high-voltage pulse capacitor with an inhomogeneous film dielectric using the method of solving the Laplace equation]. Tehnichna Elektrodinamika. Tematichnyj vypusk «Sylova elektronika ta energoefektyvnist» [Technical electrodynamics. Special issue «Power Electronics and Energy Efficiency»], 2009. No. 4. P. 68-71.
  5. Konotop V.V. Osnovy proektirovaniya vyisokovoltnykh impulsnykh ustroystv [Fundamentals of designing high-voltage impulse devices]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 1973. 144 p.
  6. Rudakov V.V. Sylni elektrichni polya v kondensatornih konstruksiyah ta udoskonalennya visokovoltnykh silovykh kondensatoriv: avtoref. dis. na zdobuttya nauk. stupenya d-ra tehn. nauk: spets. 05.09.13. [Strong electric fields arising in the capacitor structures and improvement of the high-voltage high-power capacitors: thesis for the doctor's degree of technical sciences, specialty 05.09.13 – strong electrical and magnetic fields engineering].
  7. Gun'ko V.I., Dmitrishin A.Ya., Onishchenko L.I., Toporov S.O., Feshchuk T.A. Investigations of the constructions of film dielectrics for high-voltage pulse capacitors. Surface Engineering and Applied Electrochemistry, 2012. Vol. 48, no. 2. P. 167-169.
  8. Dmitrishin A.Ya., Grebennikov I.Yu., Toporov S.O., Slepets E.N. Otsenka dlitelnoj elektricheskoy prochnosti razlichnykh konstruksij plenochного dielektrika dlya vyisokovoltnykh impulsnykh kondensatorov [Evaluation of the long-term electrical strength of various film dielectric structures for high-voltage impulse capacitors]. Elektronaya obrabotka materialov [Surface Engineering and Applied Electrochemistry], 2014. No. 5. P. 92-94.
  9. Dmitrishin A.Ya. Opredelenie koeffitsienta neodnorodnosti plenochной dielektricheskoy sistemy sektsii vyisokovoltного impulsного конденсатора [Determination of the inhomogeneity coefficient of the film dielectric system of the high-voltage pulse capacitor section]. Materialy XV Mezhdunarodnoj shkoly-seminara «Fizika impulsnykh razryadov v kondensirovannykh sredah» [Proc. of the XV Int. Conf. "Physics of Pulse Discharges in Condensed Media"] Nikolaev, 2011. P. 205-209.
  10. Dmitrishin, A.Ya. Opredelenie «napryazhennogo ob'yoma» dlya plenochnykh dielektricheskikh sistem vyisokovoltnykh kondensatorov [The definition of "stressed volume" for film dielectric systems of high-voltage capacitors]. Zbirnyk naukovykh prats NUK [Bulletin of the National Shipbuilding University], 2010. No. 4. P. 125-129.

Надійшла (received) 07.03.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Дмитрішин Олексій Ярославович (Дмитрішин Алексей Ярославович, Dmitrishin Aleksey Yaroslavovich)** – молодший науковий співробітник, ІІІТ НАН України, м. Миколаїв; тел.: (0512) 58-71-36; e-mail: dphc@iipr.com.ua.