

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Кравченко Юрій Володимирович



УДК 621.319.4

УДОСКОНАЛЕННЯ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ІМПУЛЬСНИХ КОНДЕНСАТОРІВ З  
ПЛІВКОВОЮ НЕПОЛЯРНОЮ ІЗОЛЯЦІЄЮ

Спеціальність 05.09.13 – техніка сильних електричних та магнітних полів

Автореферат дисертації  
на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2011

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Науково-дослідному та проектно-конструкторському інституті «Молнія» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Рудаков Валерій Васильович,**  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»,  
завідувач кафедри інженерної електрофізики

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Бржезицький Володимир Олександрович,**  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут»,  
в.о. завідувача кафедри техніки та  
електрофізики високих напруг

доктор технічних наук, доцент  
**Безпрозванних Ганна Вікторівна,**  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»,  
професор кафедри електроізоляційної та  
кабельної техніки

Захист відбудеться «26» травня 2011 р. о 12 годині 30 хвилин на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.08 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Автореферат розісланий «07» квітня 2011 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



О. Ю. Юр'єва

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** В теперішній час плівкова неполярна ізоляція є основним діелектричним матеріалом, що використовується при виробництві силових конденсаторів змінної напруги. При цьому недостатньо досліджено застосування плівки з низьким тангенсом кута діелектричних втрат для високовольтних імпульсних конденсаторів, що широко використовуються як у складі ефективного технологічного устаткування для магнітно-імпульсної штамповки матеріалів, дроблення твердих відходів, в мобільних електролабораторіях для визначення місць ушкодження силових кабелів, так і для фізичних досліджень за допомогою генераторів імпульсів напруги та струму.

До того ж, набуває чинності задача створення імпульсних конденсаторів, які працюють в умовах підвищеної частоти слідування імпульсів більш за 10 Гц. Ці частотні режими використовують в нових технологіях комплексу високовольтних імпульсних впливів для одержання озону та очищення шкідливих газів, обробці харчових продуктів. Традиційні паперово-касторові конденсатори можуть працювати при частотах слідування імпульсів до 10 Гц, а при більших частотах виходять з ладу через тепловий нагрів, що призводить до пробоя конденсатора. Плівкові конденсатори з неполярної плівки мають менший на порядок тангенс кута діелектричних втрат і тому можуть працювати на більших частотах слідування імпульсів. Крім того, плівкова ізоляція має більшу електричну міцність, що забезпечить кращі питомі характеристикам високовольтних імпульсних конденсаторів у порівнянні з паперовими.

У той же час, необхідно зважати на те, що високовольтні імпульсні конденсатори мають конструктивно невід'ємну область з різкою неоднорідністю електричного поля. Ця область розташована біля краю конденсаторної обкладинки та має визначальний вплив, як на ресурсні, так і на питомі характеристики конденсатора. Маючи це на увазі, вибір тієї чи іншої діелектричної структури конденсатора необхідно обґрунтувати з точки зору кращого розподілення електричного поля в області найбільшої його неоднорідності з урахуванням комбінованої структури ізоляції.

Таким чином, актуальність теми дисертації полягає у розробці рекомендацій щодо конструювання високовольтних імпульсних конденсаторів, які базуються на визначенні характеру розподілення електричного поля в крайовій області конденсаторної обкладинки для різних діелектричних структур, з використанням плівкової неполярної ізоляції, та встановленні ступеня впливу розподілення електричного поля на ресурсні характеристики конденсаторів.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана в Науково-дослідному та проектно-конструкторському інституті «Молнія» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» в рамках держбюджетних науково-дослідницьких тем МОН України «Розробка і дослідження макету швидкого потужного генератора з граничними параметрами імпульсів струму (ПГІС)» (ДР №0104U000445), «Дослідження і розробка маловтратних плівкових силових високовольтних імпульсних конденсаторів

з підвищеною питомою енергією» (ДР №0106U012305) та «Дослідження електрофізичних характеристик конденсаторної ізоляції з вітчизняної поліпропіленової плівки і можливості створення високовольтних конденсаторів змінного струму» (ДР №0108U010895), а також госпдоговірних тем: «Розробка і виготовлення високовольтного конденсатора напругою 40 кВ» (ТОВ «Інститут електромагнітних досліджень», м. Харків), «Розробка і виготовлення високовольтного малоіндуктивного конденсатора напругою 30 кВ» (ПП «Виробничо-технічний центр «Промелектросервіс», м. Київ), «Розробка та виготовлення комплекту високовольтних конденсаторів змінної напруги 200 кВ» (ЗАТ «Південкабель», м. Харків), в яких здобувач був виконавцем окремих етапів.

**Мета й задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є удосконалення високовольтних імпульсних конденсаторів з плівковою неполярною ізоляцією на основі встановлення впливу розподілення електричного поля на ресурс.

Для досягнення поставленої мети вирішені наступні задачі:

- проаналізувати існуючі конструкції конденсаторів, типи ізоляційних матеріалів, основні чинники, що впливають на ресурс, а також наявні методи розрахунку розподілення електричного поля в області краю конденсаторної обкладинки;
- визначити характер розподілення електричного поля в крайовій області конденсатора з багат шаровим діелектриком для вибору найкращої структури з погляду розподілення електричного поля;
- експериментально оцінити ресурс секцій високовольтних імпульсних конденсаторів з різним вмістом плівкової неполярної ізоляції;
- визначити характер розподілення електричного поля в конденсаторі з урахуванням ослаблення «крайового ефекту» за рахунок використання заокруглення краю обкладинки;
- реалізувати отримані теоретичні і експериментальні результати досліджень в конструкціях перспективних типів високовольтних конденсаторів.

*Об'єкт дослідження* – процес старіння ізоляції високовольтних імпульсних конденсаторів під впливом сильних електричних полів.

*Предмет дослідження* – питомі і ресурсні характеристики високовольтних імпульсних конденсаторів з плівковою неполярною ізоляцією.

*Методи дослідження.* Розрахунок електричного поля в конденсаторних конструкціях здійснено методом граничних інтегральних рівнянь з використанням рівнянь Фредгольма 1-го та 2-го роду шляхом переходу до системи лінійних алгебраїчних рівнянь. Програмна реалізація методу розрахунку розроблена в програмному середовищі Matlab. Визначення похибки обчислень здійснювалася методами теорії ймовірності. Порівняння результатів експериментальних і теоретичних досліджень проводилось на підставі методів моделювання процесів руйнування високовольтної електричної ізоляції. Експериментальні дослідження по визначенню ресурсних характеристик проводились на зразках секцій конденсаторів з використанням випробувальних високовольтних стендів НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ», вимірювальних приладів, методів формування випробувальних високовольтних імпульсів, методів планування експерименту та статистичної обробки результатів за допомогою стандартного набору функцій програмного пакету Microsoft Excel.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає у наступному:

- вперше показано, що найкраще розподілення електричного поля біля краю обкладинки при застосуванні комбінованої ізоляції відповідає варіанту з розташуванням біля обкладинки шару ізоляції з більшою діелектричною проникністю, що є справедливим для будь-яких значень діелектричної проникності масляного прошарку. При цьому товщина даного шару має бути мінімально можливою, але не менше за характерний розмір «напруженого об'єму», котрий складає 5 – 6 % від товщини ізоляції;
- вперше встановлена залежність місцезнаходження області з максимальною напруженістю електричного поля на заокругленому торці обкладинки в присутності комбінованої ізоляції від співвідношення геометричних та діелектричних параметрів конденсаторної конструкції: відношення радіусу заокруглення обкладинки до товщини діелектрика та діелектричних проникностей масляного прошарку та твердої ізоляції;
- отримали подальший розвиток дослідження по визначенню залежності розподілення напруженості електричного поля біля краю обкладинки конденсатора з комбінованим діелектриком від комплексного поєднання величин: кута скосу краю обкладинки, співвідношення діелектричних проникностей та геометричних розмірів конструкції конденсатора;
- уточнені формули для визначення значень коефіцієнтів посилення електричного поля біля краю конденсаторної обкладинки для однорідної твердої ізоляції з урахуванням масляного прошарку за рахунок введення залежності від характерного розміру області «напруженого об'єму» та кута скосу краю обкладинки;
- досліджені способи закладання ізоляції між заокругленими пласкими біфілярними електродами високовольтної конденсаторної конструкції і показано, що найменше значення розрахункової напруженості електричного поля та найбільшу електричну міцність ізоляційного проміжку забезпечує закладка ізоляції шляхом симетричного обгортання електродів шарами діелектрика.

**Практичне значення отриманих результатів.** Результати роботи знайшли застосування в галузі силового конденсаторобудування, проектуванні та виробництві високовольтної імпульсної техніки:

- визначено, що збільшення ємності секцій з виключно плівковою неполярною ізоляцією після просочення діелектричною рідиною є незначним (до 7,5 % при просоченні трансформаторним маслом, до 16 % – касторовим маслом), тому значення діелектричної проникності рідкого діелектрика не є визначальним фактором при його виборі;
- встановлено, що для комбінованої ізоляції (з шарів полярного паперового та плівкового неполярного діелектриків) зменшенням відсоткового вмісту полярного паперового діелектрика, який розташовано у обкладинок, можливо досягнути на 20 % збільшення питомої енергії конденсатора;
- показано, що розрахунок електричного поля для багат шарового діелектрика можна проводити з використанням еквівалентної розрахункової моделі з двошаровим діелектриком з достатньою для інженерних розрахунків точністю;

- встановлено, що питомі характеристики секцій імпульсних конденсаторів з повністю плівковою неполярною ізоляцією не перевищують питомі характеристики комбінованої та просоченої паперової ізоляції;

- встановлено, що при конструюванні струмопроводів малоіндуктивних генераторів імпульсів напруги у вигляді плоских симетрично розташованих електродів з заокругленими краями, при збільшенні співвідношення радіусу заокруглення до товщини ізоляції між електродами від 0,1 до 1 відбувається зменшення напруженості електричного поля на поверхні електроду в 1,6 разів.

Результати роботи використано при створенні перспективних типів високовольтних імпульсних конденсаторів: КІМ-137, КІМ-141, КІМ-142 та конденсаторів змінного струму марки КМР-100-0,016 для підприємств ТОВ «Інститут електромагнітних досліджень» (м. Харків); ПП «Виробничо-технічний центр «Промелектросервіс» (м. Київ); ЗАТ «Південкабель» (м. Харків).

**Особистий внесок здобувача.** Всі наукові результати, що викладено у дисертації, отримано здобувачем особисто. Проведено аналіз результатів розрахунку напруженості електричного поля для визначення характеру розподілення електричного поля в конденсаторі з багатошаровим діелектриком в зонах найбільшої неоднорідності електричного поля. Запропоновані формули для визначення коефіцієнта посилення електричного поля поблизу краю конденсаторної обкладинки залежно від геометричних і діелектричних параметрів конструкції конденсатора. Аналіз розрахунку електричного поля в конденсаторі з багатошаровою ізоляцією запропоновано, з урахуванням ряду припущень, звести до розрахунку двошарової ізоляції. Проведені експериментальні дослідження ресурсних характеристик зразків конденсаторних секцій з плівковою неполярною ізоляцією. На підставі результатів теоретичних і експериментальних досліджень розроблені рекомендації по удосконаленню високовольтних імпульсних конденсаторів. Розроблені перспективні типи високовольтних конденсаторів з комбінованим діелектриком.

**Апробація результатів дисертації.** Матеріали дисертаційної роботи доповідалися та обговорені на: Міжнародних симпозіумах «Проблеми вдосконалення електричних машин та апаратів. Теорія й практика. SIEMA» (м. Харків, 2007 – 2010 рр.); XIII, XIV Міжнародних наукових школах-семінарах «Фізика імпульсних розрядів в конденсованих середовищах» (м. Миколаїв, 2007 р., 2009 р.); Міжнародних науково-практичних конференціях «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, обладнання, здоров'я» (м. Харків, 2007 – 2010 рр.); X міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми сучасної електротехніки» (м. Київ, 2008 р.).

**Публікації.** Результати дисертації опубліковані в 15 наукових працях, з яких 11 – у фахових наукових виданнях ВАК України.

**Структура і об'єм дисертації.** Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, висновків, додатків та списку використаних джерел. Повний об'єм дисертаційної роботи становить 182 сторінки, серед них: 9 рисунків на 7 окремих сторінках, 63 рисунки по тексту, 11 таблиць по тексту, 4 додатки на 15 сторінках, список використаних джерел зі 108 найменувань на 13 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

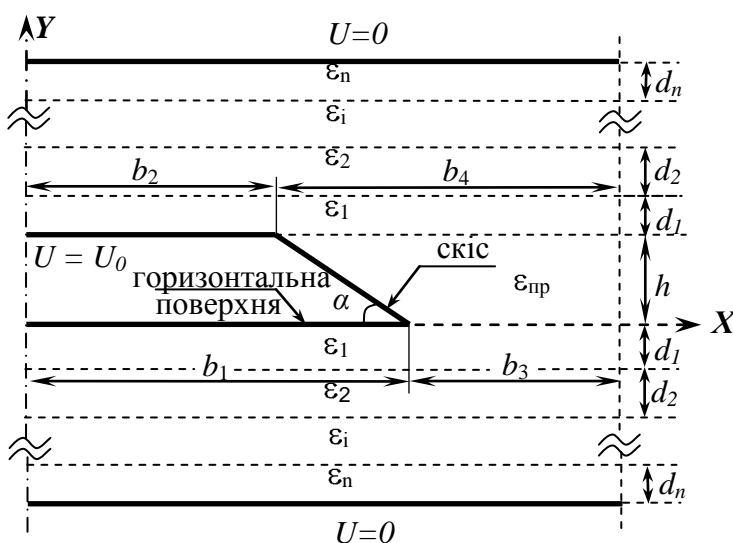
У вступі обґрунтовано актуальність дослідження застосування плівкової неполярної ізоляції для покращення питомих показників високовольтних імпульсних конденсаторів (ВІК); сформульована мета і задачі роботи, викладена наукова новизна отриманих результатів, відзначені практична цінність результатів в галузі конденсаторобудування, особистий внесок здобувача, вказані відомості щодо апробації результатів і їх публікації, приведена структура і об'єм дисертації.

У першому розділі проведено аналіз основних тенденцій в галузі імпульсного конденсаторобудування. Наведено перелік основних напрямків застосування ВІК у складі технологічного обладнання. Приведено характеристики діелектричних матеріалів, що знаходять найбільш широке використання при виробництві сучасних ВІК. Виявлені основні чинники, що впливають на ресурс ВІК. Показана істотна залежність ресурсу конденсатора від напруженості електричного поля, товщини діелектрика, товщини обкладинки, відношення товщини обкладинки до товщини діелектрика.

Найбільший вплив на ресурсні характеристики ВІК має значення напруженості електричного поля, тому постає питання підвищення ресурсу ВІК за рахунок покращення розподілення електричного поля в найбільш електрично напружених областях конденсатора – біля краю конденсаторної обкладинки. Проаналізовані основні відомі спрощені розрахункові моделі та методи розрахунку розподілення електричного поля біля краю конденсаторної обкладинки. Для вирішення задачі з розрахунку електричного поля в роботі прийнято чисельний метод граничних інтегральних рівнянь та розрахункова спрощена модель краю конденсаторної обкладинки зі скошеною формою торця.

У другому розділі наведені результати розрахунку розподілення електричного поля біля скошеного краю конденсаторної обкладинки з використанням розрахункової моделі (рис. 1), що враховує багат шарову структуру діелектрика.

Для визначення напруженості електричного поля в електростатичному наближенні використані такі межові умови для потенціалів:



$$U = U_0 \begin{cases} y = 0; 0 \leq x \leq b_1, \\ y = (b_1 - x) \cdot \operatorname{tg} \alpha; b_2 < x < b_1, \\ y = h; 0 \leq x \leq b_2; \end{cases} \quad (1)$$

$$U = 0 \begin{cases} y = -d; 0 < x < (b_1 + b_3), \\ y = d + h; 0 < x < (b_1 + b_3), \end{cases}$$

де  $U_0$  – потенціал на обкладинці із скошеним торцем;  $h$ ,  $d$  – товщина обкладинки та багат шарової ізоляції, відповідно;  $\alpha$  – кут скосу краю конденсаторної обкладинки.

Рис. 1. Спрощена розрахункова модель краю конденсаторної обкладинки

З рівності нормальних складових вектора електростатичної індукції на межі поділу  $i$ -го та  $k$ -го діелектриків (представлено випадок, коли діелектричні проникності шарів твердої ізоляції однакові –  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_i = \varepsilon_n$ ) виходять наступні умови

$$\varepsilon_{\text{пр}} E_{\text{пр}N} = \varepsilon_1 E_{1N} \quad \text{при} \begin{cases} b_2 < x < b_4, & y = h; \\ b_1 < x < b_3, & y = 0, \end{cases} \quad (2)$$

де  $\varepsilon_{\text{пр}}$  – діелектрична проникність масляного прошарку;  $E_N$  – нормальна складова напруженості електричного поля.

Виходячи з межових умов (1), (2) та використовуючи рівняння Фредгольма 1-го і 2-го роду складена система інтегральних рівнянь по числу характерних меж

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^z \left[ \sum_{i=1}^m \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \cdot \int_{S_i} \sigma_i \cdot \ln \frac{1}{r_{ij}} dS \right] = U_0(j) \quad \text{при} \quad j = 1, 2, \dots, z; \\ \sum_{j=z+1}^m \left[ \frac{\sigma_j}{2\varepsilon_0} + \lambda \cdot \sum_{i=1}^m \int_{S_i} \sigma_i \cdot \frac{\cos\left(\vec{r}_{ij}, \vec{n}\right)}{r_{ij}} dS \right] = 0 \quad \text{при} \quad j = z+1, z+2, \dots, m, \end{cases} \quad (3)$$

де  $\lambda = \frac{\varepsilon_k - \varepsilon_i}{\varepsilon_k + \varepsilon_i}$ ;  $\sigma_i$  – поверхнева густина електричних зарядів на  $i$ -тій поверхні електроду (при

$i \leq z$ ) і межі розділу діелектричних середовищ (при  $z < i \leq m$ , всього характерних меж –  $m$ );  $\sigma(j)$  – поверхнева густина електричних зарядів в точці спостереження  $j$ ;  $r_{ij}$  – відстань від  $i$ -тої точки розташування поверхневого заряду  $\sigma_i$  до  $j$ -тої точки спостереження;  $\vec{n}$  – вектор нормалі до поверхні розділу сусідніх  $i$ -того та  $k$ -того середовищ, що є направленим з  $i$ -того середовища до  $k$ -того;  $S_i$  – площа поверхні  $i$ -тої межі (чисельно дорівнює довжині  $i$ -тої межі при одиничній довжині розміру в напрямку перпендикулярному до площини рис. 1).

Для проведення чисельного розрахунку кожна  $i$ -та межа поділена на значну кількість відрізків, густина зарядів на яких прийнята постійною. При цьому кожний інтеграл в системі рівнянь (3) замінено сумою інтегралів відповідно до кількості відрізків. Невідомі значення густини зарядів винесено за знак інтеграла, а значення кожного інтегралу встановлено чисельно в припущенні, що заряд відрізка розташовано в його середині.

За допомогою розробленої розрахункової програми в програмному середовищі Matlab отримані результати розподілення електричного поля біля вершини кута скошу на горизонтальній та скошеній поверхнях обкладинки (рис. 1). Теоретично обґрунтовано, що найбільший вплив на ресурсні характеристики конденсатора має розподілення електричного поля на горизонтальній поверхні обкладинки.

За результатами розрахунку отримані залежності розподілення електричного поля від співвідношення діелектричних проникностей масляного прошарку та твердої ізоляції  $\varepsilon_{\text{пр}}/\varepsilon_1$ , товщини обкладинки  $h$ , співвідношення товщини обкладинки до товщини діелектрика  $h/d$ , величини кута скошу  $\alpha$ , відстані від вершини кута



скосу до розрахункової точки у відношенні до товщини твердого діелектрика  $r/d$ . Вибірково вище перераховані залежності розподілення електричного поля для окремих випадків сполучення вихідних даних наведені на рис. 2.

На рис. 2 у якості індикатора зміни характеру розподілення електричного поля виступає параметр  $E^*$

$$E^* = E_r / E_0,$$

де  $E_r$  – напруженість електричного поля у даній точці на відстані  $r$  від вершини кута скосу;  $E_0$  – напруженість електричного поля в однорідній області,  $E_0 = U/d$ .

Аналізуючи результати розрахунку електричного поля, встановлено, що покращення розподілення електричного поля має місце зі збільшенням співвідношення  $\epsilon_{np}/\epsilon_1$  (рис.2, а), збільшенням величини  $\alpha$  в діапазоні від  $30^\circ$  до  $90^\circ$  (рис.2, б) та збільшенням співвідношення  $h/d$  (рис. 2, в).

Проведено уточнення значень коефіцієнту посилення поля  $K_{II}$  на відстані  $r=(0,005 - 0,05) \cdot d$  від вершини кута скосу згідно з виразом

$$K_{II} = \frac{E_i}{E_B^*}, \quad (4)$$

де  $E_i$  – напруженість поля для даної конфігурації розрахункової системи;  $E_B^*$  – базове значення напруженості поля на відстані  $r$  від краю обкладинки.

У якості базового в (4) приймається значення напруженості поля, що визначено для випадку однорідного діелектрика ( $\epsilon_{np} = \epsilon_1$ ).

Одержані в ході розрахунків значення коефіцієнтів посилення поля для крайніх і ряду проміжних точок діапазону початкових даних дозволили, ґрунтуючись на спостережуваних закономірностях зміни  $K_{II}$  і користуючись стандартним набором апроксимуючих функцій програмного пакету Microsoft Excel, отримати формули для опису залежності  $K_{II} = f(r/d, h/d, \epsilon_{np}/\epsilon_1)$ . Для випадку прямокутної форми торця обкладинки отримана формула

$$K_{II} = (1 + |\lambda| \cdot k_r \cdot k_h)^n, \quad (5)$$

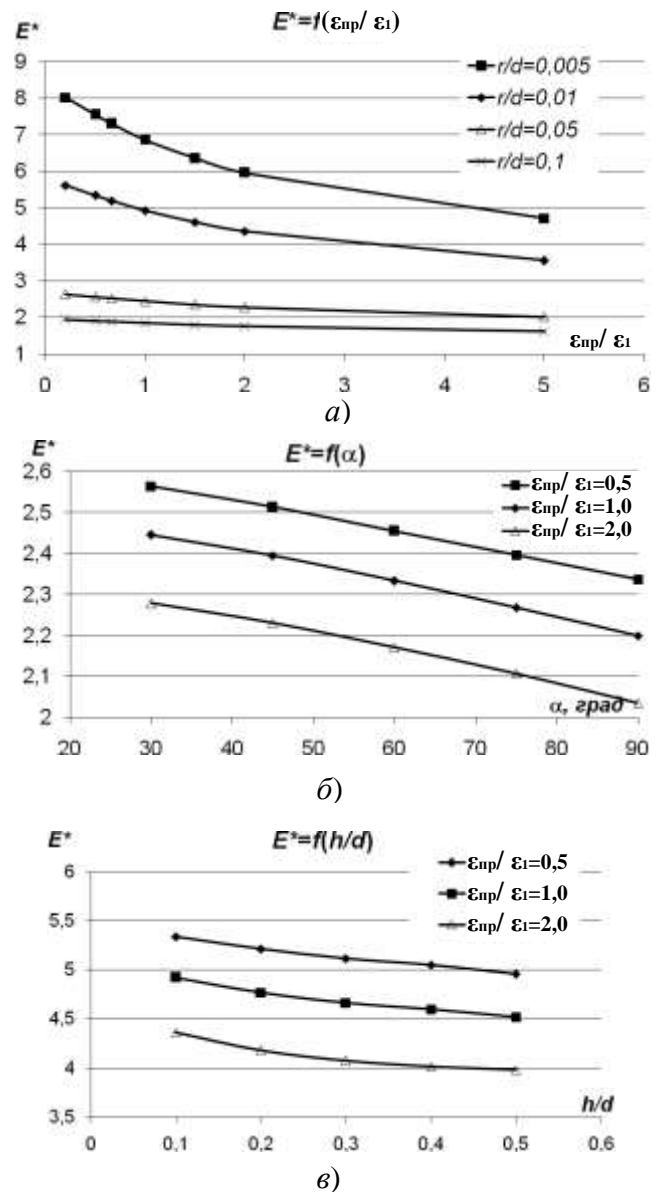


Рис. 2. Характер зміни напруженості поля біля краю обкладинки на горизонтальній поверхні від співвідношення  $\epsilon_{np}/\epsilon_1$  – (а), величини кута скосу  $\alpha$  – (б), співвідношення  $h/d$  – (в).

$$\text{де } \lambda = \frac{\varepsilon_{\text{пр}} - \varepsilon_1}{\varepsilon_{\text{пр}} + \varepsilon_1}; k_r = -0,125 \cdot \ln(r/d) - 0,2; k_h = \sqrt{1 + 0,5 \cdot h/d \cdot |\ln(r/d)|};$$

$$n = \begin{cases} 1 & \text{при } \lambda \leq 0, \\ 1,3 \cdot e^{6 \cdot r/d} \cdot (1 + 0,005/\lambda^3) & \text{при } \lambda > 0. \end{cases}$$

Аналогічно (5) були отримані формули для визначення коефіцієнта посилення електричного поля для випадку скошеного торця обкладинки з  $\alpha = 30^\circ$

$$K_{\Pi} = (1 + \lambda \cdot k_r / k_h)^n, \quad (6)$$

$$\text{де } \lambda = \frac{\varepsilon_{\text{пр}} - \varepsilon_1}{\varepsilon_{\text{пр}} + \varepsilon_1}; k_r = 0,05 \cdot \ln(r/d); k_h = \begin{cases} \sqrt{1 + \frac{2}{10^4 \cdot (h/d - 0,4 \cdot r/d)^3}} & \text{при } \lambda \leq 0, \\ 1 & \text{при } \lambda > 0; \end{cases}$$

$$n = \begin{cases} 1 & \text{при } \lambda \leq 0, \\ 2,45 \cdot \lambda \cdot e^{-0,5 \cdot r/d} & \text{при } \lambda > 0. \end{cases}$$

Отримані формули (5) та (6) дозволяють провести порівняльний аналіз розподілення напруженості електричного поля для конденсаторів з різними просочуючими рідинами без попередніх розрахунків.

Проведено аналіз результатів розрахунку напруженості електричного поля з урахуванням багатошарової ізоляції (рис. 1). Показано, що при розрахунках розподілення електричного поля подібні конструкції можуть бути заміщені конструкцією з двошаровим діелектриком. При цьому, в даній двошаровій структурі діелектрична проникність та товщина першого шару ізоляції дорівнює діелектричній проникності та товщині шару багатошарової структури, що прилягає до обкладинки, а діелектрична проникність та товщина другого шару – еквівалентній діелектричній проникності та сумарній товщині інших шарів багатошарової структури, відповідно. Подібна еквівалентна заміна припустима, якщо товщина першого шару ізоляції складає більше 10 % від загальної товщини ізоляції ( $d_1/\Sigma d_i > 0,1$ , рис. 1).

З урахуванням вище наведеного, отримано результати розрахунку напруженості електричного поля для конденсаторів з багатошаровою ізоляцією. Аналіз результатів дозволив визначити тенденції впливу геометричних та діелектричних параметрів конструкції, що є аналогічними до тенденцій, встановлених для конденсаторів з однорідним діелектриком в присутності масляного прошарку (рис. 2).

За результатами розрахунку для багатошарового активного діелектрика встановлено, що найкраще розподілення електричного поля відноситься до випадку розташування біля обкладинки шару діелектрика з більшою діелектричною проникністю, при чому товщину даного шару доцільно зменшувати.

Проведено розрахунки по визначенню характеру розподілення електричного поля для конкретних конструкцій конденсаторних секцій, ресурсні характеристики яких експериментально досліджувалися в даній роботі. Встановлено, що найкраще розподілення поля для конденсаторних секцій (які складаються з найбільш вживаних в вітчизняному конденсаторобудуванні матеріалів – конденсаторного

паперу (Б) та поліпропіленової плівки (П) або їх комбінації) відноситься до структури папір-плівка-папір (БПБ).

Одним з можливих критеріїв визначення найкращого співвідношення товщини шарів діелектриків у комбінації БПБ є величина питомої енергії, що запасується. Оскільки питома енергія дорівнює:  $W_{\text{пит}} = \varepsilon E^2 / 2$ , де  $E$  – робоча напруженість електричного поля, то співвідношення питомих енергій двох будь-яких порівнюваних конструкцій з комбінованим діелектриком можна представити у вигляді

$$W_{\text{пит}.i} = W_{\text{пит}.j} \cdot \left( \frac{E_j}{E_i} \right)^2 \cdot \left( \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_j} \right), \quad (7)$$

де індекси  $i$  та  $j$  відносяться до порівнюваних конструкцій;  $E$  – розрахункова напруженість електричного поля поблизу вершини гострого кута краю обкладинки;

$\varepsilon$  – еквівалентна діелектрична проникність комбінованого діелектрика.

За результатами розрахунку електричного поля для структури БПБ з урахуванням (7) побудована крива рис. 3, аналіз характеру якої свідчить про те, що найбільша питома енергія для даної структури відповідає відсотковому вмісту паперу 5–10 %. При відсотковому вмісті паперу більш 20 % перевага структури БПБ перед паперовою за значенням питомої енергії не є суттєвою, проте має місце перевага за значенням тангенса кута діелектричних втрат (рис. 4).

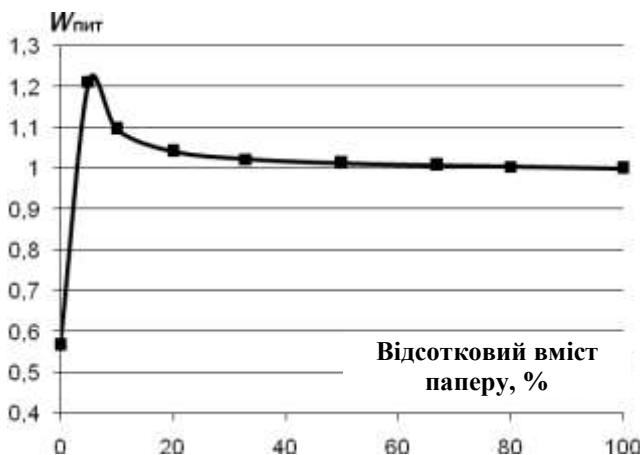


Рис. 3. Залежність питомої енергії паперово-плівкової ізоляції (БПБ) від відсоткового вмісту паперу

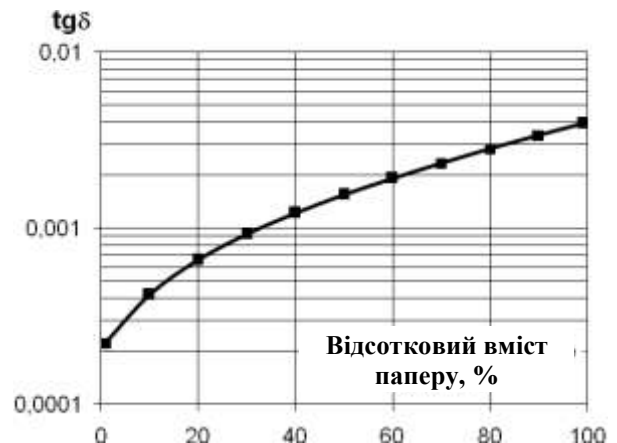


Рис. 4. Розрахункова залежність  $\text{tg}\delta$  від відсоткового вмісту паперу

**Третій розділ** містить результати експериментальних досліджень ресурсних характеристик зразків секцій ВІК як з повністю плівковою ізоляцією, так і в поєднанні з конденсаторним папером.

Дослідження секцій ВІК з повністю плівковою поліпропіленовою ізоляцією, що просочена касторовим або трансформаторним маслом показали, що: 1) збільшення ємності зразків після просочення є незначним, тому при виборі рідкого діелектрика значення його  $\varepsilon$  не є ключовим чинником; 2) короточасна електрична міцність поліпропіленової ізоляції (біля 450 кВ/мм) в 2 рази перевищує відповідну характеристику паперово-касторового діелектрика; 3) ресурс зразків, які просочені трансформаторним маслом, в 4–6 разів вище за ресурс зразків з ідентичною конструкцією, технологією виготовлення і сушки, які просочені касторовим маслом; 4) поліпшення якості просочення секцій можна досягти шляхом дотримання пра-

вильності укладання листів односторонньо шорсткої плівки по відношенню один до одного і обкладинок секцій.

Частково результати ресурсних випробувань у вигляді кривих Вейбула наведено на рис. 5.

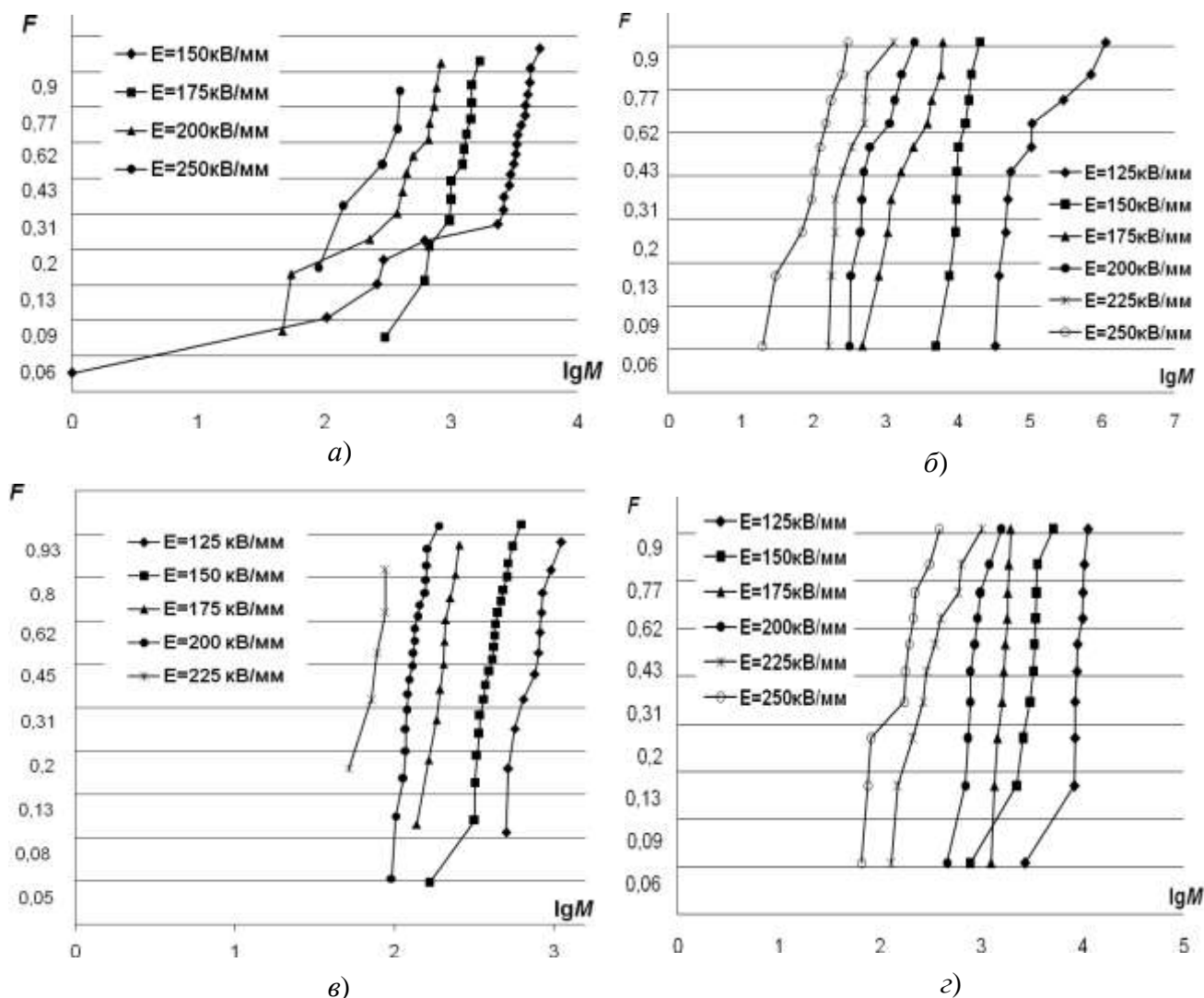


Рис. 5. Результати ресурсних випробувань зразків з двошаровою (24  $\mu\text{m}$ ) поліпропіленою ізоляцією (а, в) та чотиришаровою (48  $\mu\text{m}$ ) (б, г), які просочені касторовим (а, б) та трансформаторним маслом (в, г) на різних рівнях робочої напруженості електричного поля

Результати ресурсних випробувань зразків з повністю плівковою ізоляцією показали доцільність використання даного типу ізоляції при підвищених рівнях напруженості електричного поля ( $\geq 200$  кВ/мм), коли традиційна паперово-касторова ізоляція вже перестає працювати. На нижчих рівнях напруженості поля ( $< 200$  кВ/мм) ресурсні характеристики зразків плівкових конденсаторних секцій не перевищують показників секцій з паперово-касторовою ізоляцією.

Низькі ресурсні характеристики секцій з плівковою ізоляцією пов'язані передусім з їх неякісним просоченням. Одним з засобів покращення якості просочення плівкової ізоляції є застосування її в комбінації із конденсаторним папером.

З урахуванням вищенаведеного проведені ресурсні випробування зразків конденсаторних секцій із комбінованою ізоляцією з різним відсотковим вмістом паперу та плівки. За результатами експерименту встановлено, що на всіх рівнях

напруженості електричного поля, які приймалися у ході досліджень (від 125 до 200 кВ/мм), найбільші значення ресурсу відносяться до комбінованого діелектрика зі структурою: конденсаторний папір – плівка – конденсаторний папір (БПБ).

На рис. 6 приведена залежність питомої енергії зразків, що мають найбільш вживану в імпульсному конденсаторобудуванні структуру ізоляції, від експериментально встановлених значень ресурсу. Для порівняння на рис. 6 також наведена залежність питомої енергії паперово-касторових секцій (за відомими даними).

Аналіз кривих (рис. 6) показує, що зразки БПБ при рівних значеннях ресурсу не поступаються по значеннях питомої енергії паперово-касторовій ізоляції, а при  $E > 150$  кВ/мм (малих ресурсах) навіть перевищують. Високі значення  $W_{\text{пит}} > 0,5$  кДж/дм<sup>3</sup> для інших зразків з тришаровою структурою досягаються на рівнях напруженості, при яких ресурс секцій не перевищує 300 імпульсів (для зразків ЗБ це рівень напруженості  $E = 200$  кВ/мм, для ЗП і ПБП –  $E = 250$  кВ/мм).

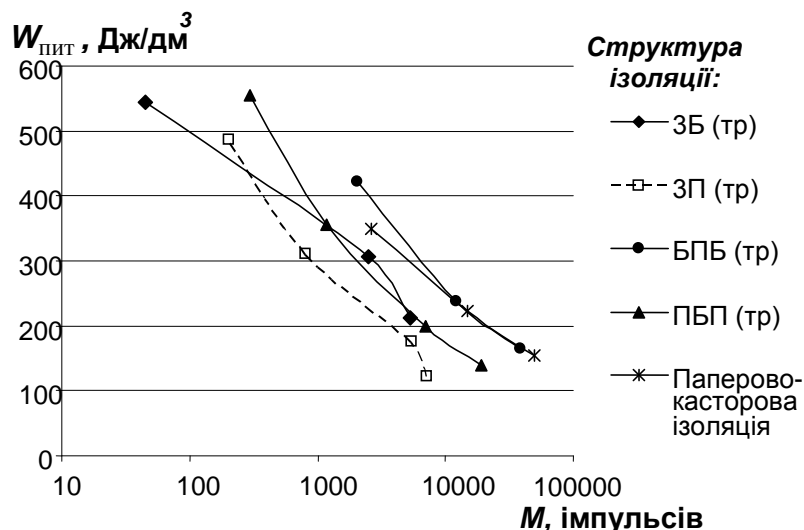


Рис. 6. Питома енергія зразків з просоченою поліпропіленовою, комбінованою і з паперово-касторовою ізоляцією

Таким чином, за результатами випробувань біля 1000 зразків секцій з різним відсотковим вмістом поліпропіленової плівки в діапазоні зміни напруженості електричного поля 125–250 кВ/мм встановлено, що найкращі ресурсні показники відносяться до секцій з структурою БПБ. Ресурс цих секцій при підвищених градієнтах електричного поля ( $> 150$  кВ/мм) суттєво перевищує ресурс секцій з традиційною паперово-касторовою ізоляцією. Крім того, максимальна робоча частота проходження імпульсів для ВІК з комбінованою паперово-плівковою ізоляцією (з рівним об'ємним вмістом паперового і плівкового діелектрика) приблизно в 20 раз вище, ніж для ВІК з паперово-касторовою ізоляцією (рис. 4).

**В четвертому розділі** визначається характер розподілення електричного поля поблизу краю обкладинки із заокругленим торцем, встановлюється місцезнаходження області з максимальною напруженістю електричного поля на торці обкладинки при різних комбінаціях початкових даних.

Розрахунки проводилися чисельним методом інтегральних рівнянь з використанням спрощеної розрахункової моделі, що наведена на рис. 7. За результатами розрахунків побудовані криві, що відображають характер розподілення електричного поля на заокругленому торці обкладинки – рис. 8.

Аналізуючи результати розрахунку електричного поля на заокругленому торці обкладинки, встановлено, що найбільший вплив на характер розподілення має співвідношення  $\epsilon_{\text{пр}}/\epsilon_1$  (рис. 8) та відношення радіусу заокруглення до товщини ізоляції –  $R/d$ .

Комплексне урахування впливу співвідношень  $\varepsilon_{\text{пр}}/\varepsilon_1$  та  $R/d$  дає можливість отримати умову, виконання якої призводить до наявності на картині електричного поля центрального максимуму

$$\left( \frac{\varepsilon_{\text{пр}}}{\varepsilon_1} - 1,55 \cdot \frac{R}{d} \right) \leq 0,65. \quad (8)$$

Нерівність (8) є справедливою для діапазону зміни  $\varepsilon_{\text{пр}}/\varepsilon_1 = 0,65-2,2$  та  $R/d = 0,01-1$ . Із ростом співвідношення  $R/d$  та зменшенням  $\varepsilon_{\text{пр}}/\varepsilon_1$  область з максимальною напруженістю електричного поля на торці обкладинки зміщується до початку заокруглення ( $\varphi \rightarrow 0$ ) – має місце наявність двох максимумів на картині розподілення електричного поля.

Для визначення діапазону відстаней від краю конденсаторної обкладинки, значення напруженості на якому

має визначальний вплив на ресурсні характеристики ВІК, проведено порівняльний аналіз розподілення поля для обкладинок із скошеною та заокругленою формою торця (рис. 9). Заокруглена форма торця відображає такий реально вживаний у виробництві ВІК засіб покращення розподілення поля, як заломлення краю конденсаторної обкладинки. За відомими результатами багатократних експериментальних досліджень ресурс зразків конденсаторних секцій із заломленим краєм в 2–3 рази перевищує ресурс секцій без заламування краю обкладинки. Зважаючи на це та з урахуванням степеневі залежності ресурсу від робочої напруженості поля з показником степеня  $n=5$ , отримуємо, що діапазон відстаней від краю обкладинки буде відповідати діапазону, на якому співвідношення значень напруженості поля для випадків з заокругленою та скошеною формою торця обкладинки буде становити:

$$E_1^* / E_2^* = (\sqrt[5]{2}) \div (\sqrt[5]{3}) \approx 1,15 \div 1,2 \text{ рази.}$$

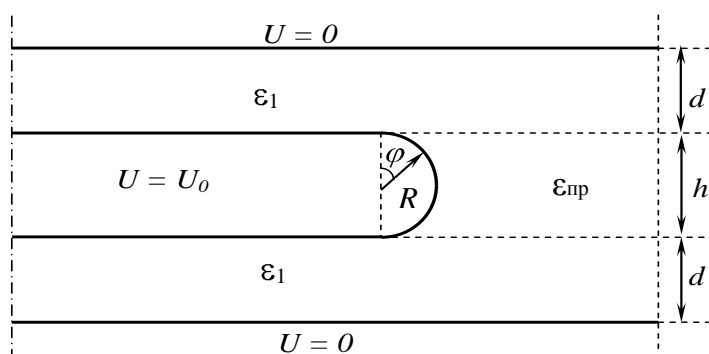


Рис. 7. Спрощена розрахункова модель обкладинки з заокругленим торцем

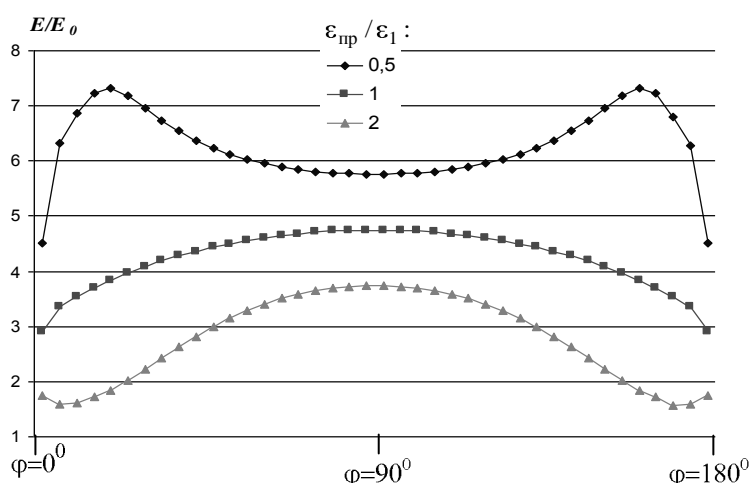


Рис. 8. Характер розподілення електричного поля на заокругленому торці залежно від співвідношення  $\varepsilon_{\text{пр}}/\varepsilon_1$  ( $h/d=0,1$ )

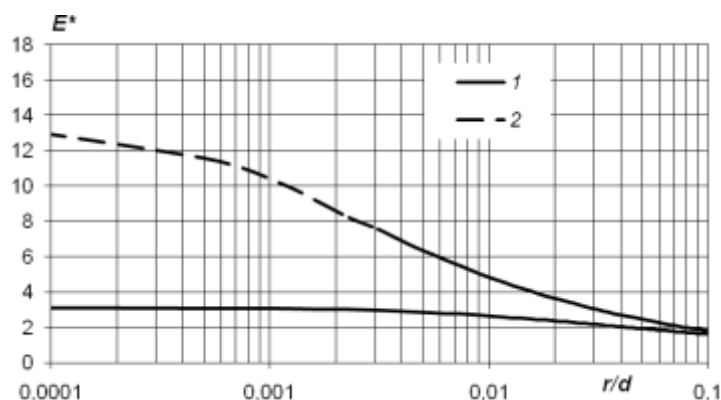


Рис. 9. Залежність  $E^* = f(R/d)$  для розрахункових систем з різною формою торця обкладинки ( $h/d=0,1$ ;  $\varepsilon_{\text{пр}}/\varepsilon_1 = 0,5$ )

має визначальний вплив на ресурсні характеристики ВІК, проведено порівняльний аналіз розподілення поля для обкладинок із скошеною та заокругленою формою торця (рис. 9). Заокруглена форма торця відображає такий реально вживаний у виробництві ВІК засіб покращення розподілення поля, як заломлення краю конденсаторної обкладинки. За відомими результатами багатократних експериментальних досліджень ресурс зразків конденсаторних секцій із заломленим краєм в 2–3 рази перевищує ресурс секцій без заламування краю обкладинки. Зважаючи на це та з урахуванням степеневі залежності ресурсу від робочої напруженості поля з показником степеня  $n=5$ , отримуємо, що діапазон відстаней від краю обкладинки буде відповідати діапазону, на якому співвідношення значень напруженості поля для випадків з заокругленою та скошеною формою торця обкладинки буде становити:

На рис. 9 наведені залежності розподілення електричного поля на горизонтальній частині обкладинки з заокругленою та скошеною формою торця – криві 1 та 2, відповідно. Таким чином, аналізуючи залежності рис. 9, величина відстані  $r/d$ , значення напруженості поля на якій є визначальним при порівнянні секцій ВК з різною структурою діелектриків та електродів, дорівнює  $r/d=(0,05-0,06)$ .

Також в четвертому розділі розглянута задача по аналізу розподілення електричного поля в системі плоских електродів з заокругленими краями та твердим діелектриком між електродами. Спрощена модель для розрахунку електричного поля приведена на рис. 10. Ця модель на практиці відтворює систему прямого та зворотного струмопроводів генератора імпульсів напруг (ГІН), відстань між якими мінімізується (для зменшення індуктивності ГІН) за рахунок шарів твердої ізоляції, що вкладається між електродами. Розглянуто 3 способи закладання ізоляції: у вигляді плоских шарів ( $d_1=0$ ); шляхом обгортання електродів шарами ізоляції ( $d_2=0$ ); комбінація першого і другого способу закладки ( $d_1 \neq 0$ ;  $d_2 \neq 0$ ).

За результатами розрахунку встановлено, що максимальна напруженість електричного поля в газових проміжках за інших рівних умов більше при першому способі закладки ізоляції ( $4,6E^*$  при  $R/d = 0,1$ ;  $2,95E^*$  при  $R/d = 1$ ), менше при третьому ( $(1,95-2,1)E^*$  при  $R/d = 0,1$ ;  $(2,18-2,25)E^*$  при  $R/d = 1$  за умови того, що  $d_1/d_2=1$ ) та найнижча відноситься до другого способу закладки ізоляції ( $1,55E^*$  при  $R/d = 0,1$ ;  $2,13E^*$  при  $R/d = 1$ ).

Таким чином, симетричне обгортання плоских електродів шарами ізоляції забезпечує краще розподілення електричного поля в конструкції. Даний теоретично отриманий висновок підтверджено експериментально на підставі дослідження моделей шин струмопроводів з закладанням ізоляції плоскими шарами та шляхом обгортання електродів. Ресурсні випробування даних моделей показали, що при однаковій робочій напруженості електричного поля зразки з ізоляцією, що закладена плоскими шарами, мають на порядок менший ресурс –  $6 \times 10^5$  проти  $6,7 \times 10^6$  (при  $d_{i3}=4,8$  мм та  $E_{роб}=25$  кВ/мм) – ніж ресурс системи електродів, які симетрично обгорнуті ізоляцією.

У п'ятому розділі наведені технічні характеристики, особливості конструкції та функціонування високовольтних конденсаторів, що побудовані з урахуванням результатів дисертаційної роботи (рис. 11). Дані конденсатори мають підвищений ресурс за рахунок покращеного розподілення електричного поля в області біля країв конденсаторних обкладинок. В конденсаторах КІМ-141 ( $C=1,8$  мкФ;

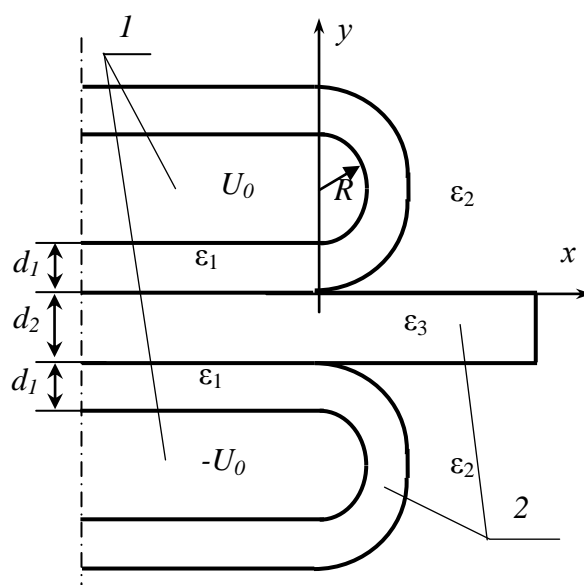


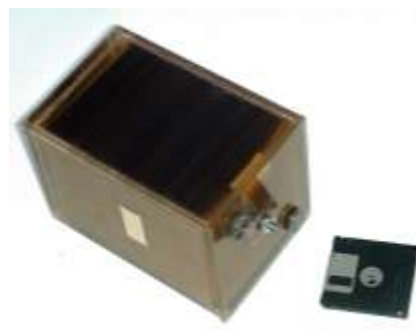
Рис. 10. Розрахункова модель системи двох плоских електродів: 1 – плоский електрод; 2 – твердий діелектрик;  $d_1$ ,  $d_2$  – товщини шарів твердого діелектрика;  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_3$  та  $\epsilon_2$  – діелектричні проникності шарів твердої ізоляції та середовища, в якому перебувають електроди, відповідно

$U=30$  кВ;  $\text{tg}\delta=24\cdot 10^{-4}$ ) (рис.11, а), КІМ-137 ( $C=0,8$  мкФ;  $U=40$  кВ;  $\text{tg}\delta=38\cdot 10^{-4}$ ) (рис.11, б) та КМР-100-0,016 ( $C=0,0165$  мкФ;  $U=100$ кВ;  $\text{tg}\delta=18\cdot 10^{-4}$ ) (рис.11, з) для підвищення ресурсних характеристик застосовано комбіновану паперово-плівкову ізоляцію. В конденсаторі КІМ-142 ( $C=0,8$  мкФ;  $U=40$  кВ;  $\text{tg}\delta=46\cdot 10^{-4}$ ) (рис.11, в) для покращення розподілення електричного поля застосоване загинання краю стрічки фольги пласко-мотаної секції по всій її довжині.

Усі конденсатори успішно пройшли приймально-здавальні випробування та експлуатуються у складі технологічних установок підприємств-замовників.



а)



б)



в)



г)

Рис. 11. Високовольтні конденсатори, що побудовані за результатами роботи: а) КІМ-141; б) КІМ-137; в) КІМ-142; г) КМР-100-0,016

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі теоретичних досліджень розподілення електричного поля в крайовій області конденсаторної конструкції і експериментальних досліджень ресурсних характеристик ВІК вирішено науково-практичне завдання по удосконаленню високовольтних імпульсних конденсаторів з плівковою неполярною ізоляцією в частині підвищення їх ресурсу. Основні висновки і практичні рекомендації дисертації полягають в наступному:

1. Обґрунтована на основі аналізу існуючих конструкцій ВІК доцільність застосування у якості активного діелектрика імпульсних конденсаторів плівкової неполярної ізоляції як в чистому вигляді, так і в комбінації з конденсаторним папером, що має істотне значення для підвищення ресурсу ВІК. Суттєва залежність ресурсу конденсатора від напруженості електричного поля зумовлює необхідність проведення розрахунку розподілення електричного поля для обґрунтування вибору конструкції конденсатора. У якості розрахункової моделі для визначення характеру розподілення електричного поля в крайовій області конденсаторної обкладинки прийнята модель зі скошеним торцем, як така, що найбільше відповідає реальній конфігурації краю конденсаторної обкладинки.



2. Встановлено із застосуванням чисельного методу інтегральних рівнянь розподілення електричного поля поблизу краю конденсаторної обкладинки з однорідною і комбінованою ізоляцією. Аналіз отриманих результатів дозволив обґрунтувати структуру ізоляції, що забезпечує краще розподілення електричного поля. Визначено, що задачу розрахунку електричного поля в конструкції з багатошаровою ізоляцією можна звести до задачі з двошаровою ізоляцією. Показано, що результати вирішення польових задач задовольняють необхідному для інженерних розрахунків рівню точності.

3. Уточнені залежності коефіцієнтів посилення електричного поля в крайовій області конденсаторної обкладинки з урахуванням масляного прошарку від геометричних і діелектричних параметрів конденсаторної конструкції, що дозволяє провести порівняльний аналіз розподілення напруженості електричного поля при застосуванні різних просочуючих рідин без попередніх розрахунків.

4. Встановлено на підставі ресурсних випробувань секцій ВІК з різним вмістом плівкової неполярної ізоляції, що найкращі ресурсні показники відносяться до секцій з комбінованим паперово-поліпропіленовим діелектриком з розташуванням шарів паперу у обкладинок. Результати експериментальних досліджень підтверджені висновками, що отримані теоретично, – краще розподілення електричного поля відноситься до комбінованої структури ізоляції з розташуванням у обкладинки шару ізоляції з більшим значенням діелектричної проникності.

На підставі аналізу отриманих розрахунковим шляхом співвідношень питомих енергій для конденсаторів з паперово-плівковою ізоляцією з різним відсотковим вмістом компонентів ізоляції визначено, що для збільшення питомих показників товщину шарів паперу, які розташовані у обкладинок, необхідно мінімізувати.

5. Визначено шляхом порівняння результатів розрахунку електричного поля для моделі із скошеним і заокругленим торцем, що характерний розмір області "напруженого об'єму", яка визначає ресурсні показники ізоляції, складає 5 – 6 % від товщини ізоляції. На підставі цього встановлені вимоги по товщині шару ізоляції, розташованої в комбінованому діелектрику у обкладинок, – товщина цього шару має бути не менше характерного розміру "напруженого об'єму".

6. Встановлено істотний вплив величини радіусу заокруглення і співвідношення діелектричної проникності масляного прошарку і твердої ізоляції на місцезорозташування області з максимальною напруженістю електричного поля на заокругленому торці конденсаторної обкладинки. Визначені умови, при виконанні яких область з максимальною напруженістю електричного поля зсувається з осі горизонтальної симетрії обкладинки в зону початку заокруглення.

Для системи двох пласких шин із заокругленими кінцями встановлено, що, кращим способом закладання ізоляції в міжелектродний простір є симетричне обгортання електродів шарами ізоляції.

7. З урахуванням результатів дисертаційної роботи сконструйовані ВІК КІМ-137, КІМ-141, КІМ-142 і високовольтний конденсатор змінної напруги КМР-100-0,016, в яких виконані конструктивні заходи щодо поліпшення розподілення електричного поля, що дозволило підвищити їх ресурсні характеристики приблиз-

но в 2 рази. Результати роботи впроваджені на підприємствах ТОВ «Інститут електромагнітних досліджень» (м. Харків); ПП «Виробничо-технічний центр «Промелектросервіс» (м. Київ); ЗАТ «Південкабель» (м. Харків).

### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Кравченко Ю. В. Исследование бумажно-пленочного диэлектрика, пропитанного касторовым маслом с добавкой поверхностно-активного вещества / В. Д. Беспалов, Ю. В. Кашицкая, Ю. В. Кравченко, Т. О. Пономаренко, В. В. Рудаков, О. П. Чумак // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків : НТУ «ХПІ». – 2006. – № 7. – С. 58–63.

*Здобувачем проведено постановку та аналіз результатів ресурсного експерименту зразків конденсаторних секцій з комбінованою ізоляцією.*

2. Кравченко Ю. В. Расчет электрического поля системы плоских электродов с твердым диэлектриком / В. В. Рудаков, О. В. Покладов, Ю. В. Кравченко // Електротехніка і електромеханіка. – 2006. – № 4. – С. 72–75.

*Здобувачем здійснено моделювання розрахункової конфігурації електродів та виконано аналіз результатів розрахунку електричного поля.*

3. Кравченко Ю. В. Ресурс пленочной полипропиленовой изоляции, пропитанной касторовым маслом, в импульсном режиме / Ю. В. Кравченко, В. В. Рудаков, Д. А. Доценко // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків : НТУ «ХПІ». – 2006. – № 37. – С. 113–118.

*Здобувачем виконано постановку експерименту, проведено систематизацію та аналіз результатів ресурсного експерименту.*

4. Кравченко Ю. В. Особенности конструирования высоковольтных импульсных конденсаторов с последовательным соединением секций / В. В. Рудаков, О. Ю. Дубийчук, Ю. В. Кравченко, Е. П. Еремеева, В. П. Кравченко, Е. Г. Крамчанин, В. О. Лысенко // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків : НТУ «ХПІ». – 2006. – № 37. – С. 119–127.

*Здобувачем спроектовано конструкцію ряду конденсаторів типу КІМ.*

5. Кравченко Ю. В. Ресурс пленочной полипропиленовой изоляции, пропитанной трансформаторным маслом, в импульсном режиме / Ю. В. Кравченко, В. В. Рудаков // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків : НТУ «ХПІ». – 2007. – № 20. – С. 167–174.

*Здобувачем виконано постановку експерименту та проведено систематизацію та аналіз результатів ресурсного експерименту.*

6. Кравченко Ю. В. «Краевой эффект» у скошенного края обкладки конденсатора / Ю. В. Кравченко, В. В. Рудаков, В. О. Лысенко // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків : НТУ «ХПІ». – 2007. – № 34. – С. 85–91.

*Здобувачем здійснено моделювання конденсаторної системи з комбінованою ізоляцією та скошеною формою торця обкладинки. Виконано розрахунки електричного поля в крайовій області та проаналізовано результати розрахунків.*

7. Кравченко Ю. В. Повышение добротности колебательного контура резонансной установки для высоковольтных испытаний кабелей / Ю. А. Антонец,

В. М. Золотарев, В. П. Карпушенко, Ю. В. Кравченко, С. В. Лактионов, Б. Г. Набока, В. В. Рудаков // Метрологія та прилади. – 2008. – № 2. – С. 33–37.

*Здобувачем теоретично досліджені засоби підвищення добротності коливального контуру резонансної установки.*

8. Кравченко Ю. В. Распределение электрического поля у края обкладки конденсатора с произвольным наклоном грани торца / Ю. В. Кравченко, В. В. Рудаков // Технічна електродинаміка. – Київ: Інститут електродинаміки НАН України. – 2008. – Тем.вип.,ч. 4. – С. 129–132.

*Здобувачем проаналізовано результати розрахунків електричного поля біля скошеного краю конденсаторної обкладки, обґрунтовано можливість заміни при розрахунках багат шарового діелектрика двошаровим.*

9. Кравченко Ю. В. Ресурс пропитанной бумажно-полипропиленовой изоляции в импульсном режиме / Ю. В. Кравченко // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків : НТУ «ХПІ». – 2008. – № 21. – С. 107–116.

10. Кравченко Ю. В. Резонансная установка для испытания коротких отрезков высоковольтных кабелей / Ю. В. Кравченко, Б. Г. Набока, В. В. Рудаков, Ю. А. Антоненц, В. М. Золотарев, В. П. Карпушенко // Електротехніка і електромеханіка. – 2008. – № 4. – С. 75–80.

*Здобувачем розроблена конструкція та виготовлено комплект конденсаторів змінного струму для резонансної випробувальної установки.*

11. Кравченко Ю. В. Расчет электрического поля для конденсаторной системы со скругленной кромкой края обкладки / Ю. В. Кравченко // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків : НТУ «ХПІ». – 2008. – № 44. – С. 84–90.

12. Кравченко Ю. В. Емкостной блок резонансной установки для испытания высоковольтных кабелей / Ю. В. Кравченко, В. В. Рудаков, Н. Р. Ясинский // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків : НТУ «ХПІ». – 2008. – № 44. – С. 126–132.

*Здобувачем проведено аналіз результатів високовольтних випробувань конденсатора змінного струму.*

13. Кравченко Ю. В. Определение коэффициента усиления электрического поля для конденсаторной системы с комбинированной изоляцией / Ю. В. Кравченко // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків : НТУ «ХПІ». – 2009 – № 11. – С. 69–77.

14. Кравченко Ю. В. Ресурс многослойной полиэтиленовой изоляции при воздействии импульсов наносекундной длительности / Ю. В. Кравченко, О. В. Покладов, В. В. Рудаков // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків : НТУ «ХПІ». – 2009. – № 11. – С. 78–84.

*Здобувачем виконано постановку експерименту та проведено аналіз результатів ресурсних випробувань багат шарової поліетиленової ізоляції.*

15. Кравченко Ю. В. Характерный размер «напряженного объема» высоковольтных фольговых импульсных конденсаторов / Ю. В. Кравченко, В. В. Рудаков // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків : НТУ «ХПІ». – 2010. – № 34. – С. 89–94.

*Здобувачем на підставі аналізу результатів розрахунку електричного поля встановлено величину характерного розміру області «напруженого об'єму».*

**Кравченко Ю. В. Удосконалення високовольтних імпульсних конденсаторів з плівковою неполярною ізоляцією.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.09.13 – техніка сильних електричних та магнітних полів. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2011.

В дисертаційній роботі вирішена науково-практична задача по визначенню впливу на ресурс високовольтних імпульсних конденсаторів характеру розподілення електричного поля в зонах його найбільшої неоднорідності.

На підставі теоретичних і експериментальних досліджень встановлена істотна залежність ресурсних характеристик секцій імпульсних конденсаторів від геометричних і діелектричних параметрів їх конструкції, які визначають ступінь неоднорідності електричного поля поблизу краю конденсаторних обкладинок. Аналіз результатів вирішення польових задач для різного набору початкових даних дозволив виявити ступінь впливу кожного з чинників, що приймаються до розгляду, на розподілення електричного поля поблизу краю конденсаторної обкладинки та отримати залежності коефіцієнта посилення поля від варіантів поєднання початкових даних. Комплексний аналіз результатів експериментальних і теоретичних досліджень дозволив розробити ряд рекомендацій по підвищенню ресурсних характеристик ВК і провести оцінку розмірів області «напруженого об'єму», що визначає ресурс конденсаторів.

Результати роботи використано при проектуванні та виробництві нових типів ВК КІМ-137, КІМ-141 та КІМ-142, а також конденсаторів змінної напруги КМР-100-0,016. Дані конденсатори відрізняються покращеними ресурсними характеристиками.

*Ключові слова:* сильні електричні поля, конструкції високовольтних пристроїв, генератори імпульсних струмів та високих напруг, високовольтні імпульсні конденсатори, напруженість та коефіцієнт посилення електричного поля, ресурсні характеристики, плівкова поліпропіленова та комбінована ізоляція.

**Кравченко Ю. В. Усовершенствование высоковольтных импульсных конденсаторов с пленочной неполярной изоляцией.** – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.13 – техника сильных электрических и магнитных полей. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2011.

В диссертационной работе решена научно-практическая задача по определению влияния на ресурс высоковольтных импульсных конденсаторов характера распределения электрического поля в зонах его наибольшей неоднородности.

На основании анализа источников информации в связи с появлением новых положительных результатов исследований секций конденсаторов с различным составом пленочных и комбинированных диэлектриков выявлена необходимость

уточнения ресурсных характеристик различных изоляционных структур (различных комбинаций твердых диэлектриков и пропитывающих жидкостей, различного соотношения толщин изоляции и фольговых обкладок, различного долевого участия компонентов изоляции).

Численным методом интегральных уравнений произведен расчет электрического поля для наиболее напряженной области конденсаторной конструкции – края обкладки. В качестве расчетной принята модель края обкладки со скошенным торцом. Расчеты проведены для широкого диапазона изменения геометрических и диэлектрических параметров конденсаторной конструкции. Показано, что результаты расчетов удовлетворяют необходимому для инженерных расчетов уровню точности.

Уточнены зависимости коэффициентов усиления электрического поля как функции геометрических и диэлектрических параметров конденсаторной системы. Полученные зависимости коэффициента усиления позволяют провести сравнительный анализ распределения напряженности электрического поля в новых современных диэлектрических системах ВИК без предварительных расчетов.

Показано, что задачу расчета поля в конденсаторной конструкции с многослойной изоляцией можно свести к задаче с двухслойной изоляцией со слоем диэлектрика, имеющим эквивалентную диэлектрическую проницаемость.

Установлено, что лучшее распределение электрического поля относится к комбинированной структуре изоляции с расположением у обкладки слоя с большим значением диэлектрической проницаемости, что подтверждено ресурсными испытаниями, согласно которым наилучшими ресурсными характеристиками обладают образцы конденсаторных секций с комбинированной бумажно-полипропиленовой изоляцией, с симметричной структурой и расположением слоев бумаги у обкладки.

Произведен расчет поля для конденсаторной конструкции с комбинированным диэлектриком и закругленной формой торца обкладки. Показано влияние значений отношений  $R/d$  и  $\epsilon_{\text{пр}}/\epsilon_1$  на характер изменения электрического поля, как на закругленном торце, так и на горизонтальной части обкладки. Определены значения отношений  $R/d$  и  $\epsilon_{\text{пр}}/\epsilon_1$ , при которых область максимальной напряженности электрического поля смещается с оси горизонтальной симметрии обкладки.

Комплексный анализ результатов экспериментальных и теоретических исследований позволил разработать ряд рекомендаций по повышению ресурсных характеристик ВИК и произвести оценку размеров области «напряженного объема», определяющей ресурс конденсаторов.

Результаты диссертационной работы использованы при проектировании и конструировании ВИК с комбинированной изоляцией КИМ-137 и КИМ-141. В конструкции ВИК КИМ-142 применен загиб края ленты фольги по всей ее длине, обоснованный проведенными в работе расчетами электрического поля для различных конфигураций электродных систем. На базе теоретических и экспериментальных исследований выбрана конструкция высоковольтного конденсатора переменного напряжения КМР-100-0,016 на основе комбинированного бумажно-пленочного диэлектрика, пропитанного трансформаторным маслом.

Все изготовленные с учетом результатов диссертационной работы высоковольтные конденсаторы успешно прошли приемо-сдаточные испытания и функционируют в составе технологических установок предприятий-заказчиков. На все данные конденсаторы получены соответствующие акты внедрения.

*Ключевые слова:* сильные электрические поля, конструкции высоковольтных устройств, генераторы импульсных токов и высоких напряжений, высоковольтные импульсные конденсаторы, напряженность и коэффициент усиления электрического поля, ресурсные характеристики, пленочная полипропиленовая и комбинированная изоляция.

**Kravchenko Yu. V. The Improvement of High-voltage Pulse Capacitors with a Film Non-polar Insulation.** – Manuscript.

The thesis is presented for technical sciences Ph. D. degree in specialty 05.09.13 – techniques of strong electric and magnetic fields. – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, 2011.

The important science and practice task of influence electric field distributing character determination, in the areas of its most heterogeneity, on the high-voltage pulse capacitors resource is decided in dissertation.

On the basis of theoretical and experimental researches the resource descriptions substantial dependence of pulse capacitors sections from the geometrical and dielectric parameters of their construction is set. The got results of the field tasks decision for a different initial data set allowed to expose the value of each factors influencing on electric field distributing near the edge of the capacitor facing, the dependence of field amplification coefficient from combination of initial data is collected. The complex analysis of experimental and theoretical researches results allowed to develop the row of recommendations for the improve of resource descriptions and to conduct size estimation of «stressed volume» region, that determines the capacitors resource.

Job performances are used for projecting and production of new types HVPC KIM-137, KIM -141 and KIM -142, and also alternative voltage capacitors KMR-100-0,016. The given capacitors differ by the improved resource descriptions.

*Keywords:* strong electric fields, constructions of high-voltage devices, generators of pulse currents and high voltage, high-voltage pulse capacitors, capacitor type devises, tension and amplification coefficient of the electric field, resource descriptions, film polypropylene and combined insulation.



Підписано до друку 28.03.2011 р. Формат 60x90 1/16.  
Папір офсетн. Друк – різнографія. Ум.друк. арк.. 0,9  
Гарнітура Times New Roman. Наклад 120 прим. Зам. №4533439

«ФОП Шевченко»  
Свідоцтво про державну реєстрацію № 04058870Ф0070809  
м. Харків вул. Петровського, 34  
т.:700-42-81