

**В.В.РУДАКОВ**, докт.техн. наук;  
**Ю.В.КРАВЧЕНКО; Д.А.ДОЦЕНКО**; НТУ «ХПИ»

## **РЕСУРС ПЛЕНОЧНОЙ ПОЛИПРОПИЛЕНОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ, ПРОПИТАННОЙ КАСТОРОВЫМ МАСЛОМ, В ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ**

Наведено результати випробувань секцій високовольтних імпульсних конденсаторів з поліпропіленової плівки, які просочені касторовим маслом, на короткострокову електричну міцність та ресурс

The results of testing the short-term strength and resource of the high voltage pulse capacitor gangs made of polypropylene film impregnated with castor oil have been given.

**Постановка задачі.** В високовольтній імпульсній техніці широке застосування отримала паперово-плівочна і комбінована ізоляція. Однак, в даний час, в зв'язі з прогресом, досягнутим в створенні нових якісних конденсаторних полімерних плінок (в частині, поліпропіленової) з'явилася можливість створення чисто плівочних імпульсних конденсаторів. Поліпропіленова плівка вже завойовувала надійні позиції при створенні силових конденсаторів перемінного напруги [1,2]. В той же час застосування плівки для імпульсних конденсаторів практично не досліджено.

**Цілью** даної роботи є дослідження чисто плівочного діелектрика, пропитанного касторовим маслом в імпульсному режимі.

**Конструкція образців.** Для проведення експерименту були виготовлені секції з поліпропіленової плівки товщиною 12 мкм (рис. 1) з різним числом шарів: 2,3,4 і 5 шарів (24,36,48 і 60 мкм відповідно) по 80 образців кожної конструкції.

Використовувана плівка типу TERFILM RER мала односторонню шорсткатування для покращення умов пропитки за рахунок зменшення кута смачування. Кожна секція складалася з трьох паралельно включених емкостних проміжків (рис.1, б) для забезпечення умов створення конфігурації електричного поля, близької до реальної. Активна площа обкладки секції складала 60 x 90 мм. Друга від друга секції відокремлювалися за допомогою 4-10 шарів паперової плівки товщиною 120 мкм для уникнення пробоя між сусідніми секціями. Після збирання зразки сушили в вакуумній камері при температурі 80 °С і вакуумі 6,5 Па впродовж 6 днів. Далі виготовлялися заливка в бак з зразками попередньо откакумованого рідкого діелектрика, в якості якого використовувалося касторове масло. Пропитка відбувалася впродовж 3 днів при температурі 70 °С і вакуумі 6,5 Па.

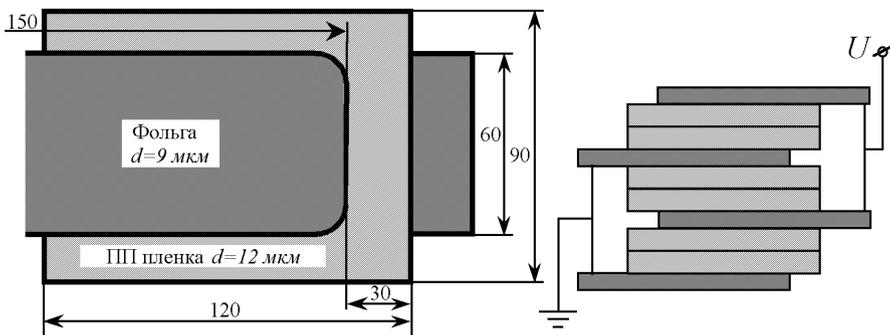


Рисунок 1 – Конструкция секций из полипропиленовой (ПП) пленки, изготовленных для проведения эксперимента

**Методика проведения эксперимента.** До и после пропитки проводилось измерение емкости образцов мостом E7-8. Результаты измерений приведены в табл. 1. Значения тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$  образцов находились в пределах  $(3-8) \cdot 10^{-4}$ .

В ходе проведения эксперимента секции испытывались на кратковременную электрическую прочность и на ресурс в стандартном режиме (частота разрядного тока контура 100 кГц и декремент колебаний 1,38).

Испытание образцов на кратковременную электрическую прочность производилось путем скачкообразной подачи на испытуемый образец напряжения, соответствующего уровню напряженности для данного количества слоев пленки  $E = 250$  кВ/мм. Далее подъем напряжения осуществлялся с шагом по времени  $\Delta t = 30$  с и по напряженности  $\Delta E = 25$  кВ/мм.

Ресурсные испытания образцов проводились с использованием генератора поджигающих импульсов, который генерировал импульсы с частотой  $f = 2$  Гц. Подаваемое на образец напряжение контролировалось при помощи электростатического киловольтметра С196.

Таблица 1 – Результаты измерения емкости образцов до и после пропитки

Толщина изоляции, мкм	Количество измеренных образцов, ед.	Средняя емкость образцов до пропитки, нФ	Средняя емкость образцов после пропитки, нФ	Относительное увеличение емкости после пропитки
24	38	12,19	13,95	1,145
36	40	8,16	9,39	1,152
48	40	6,21	7,06	1,138
60	40	4,83	5,63	1,166

**Результаты испытаний.** Результаты испытания секций на кратковременную электрическую прочность приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Кратковременная электрическая прочность образцов

Толщина изоляции, мкм	Количество испытанных образцов, ед.	Среднее напряжение пробоя, кВ	Средняя напряженность пробоя, кВ/мм
24	15	11,19	466
36	17	14,48	402
48	11	19	396

Следует отметить, что в результатах, занесенных в таблицу, не учтены образцы, напряженность пробоя которых составила менее 300 кВ/мм (5 образцов с изоляцией 24 мкм, 3 – 36 мкм, 0 – 48 мкм). Коэффициент вариации результатов пробоя 2-х слойных образцов составил  $K = 0,37$ ; 3-х слойных –  $K = 0,23$ ; 4-х слойных –  $K = 0,06$ .

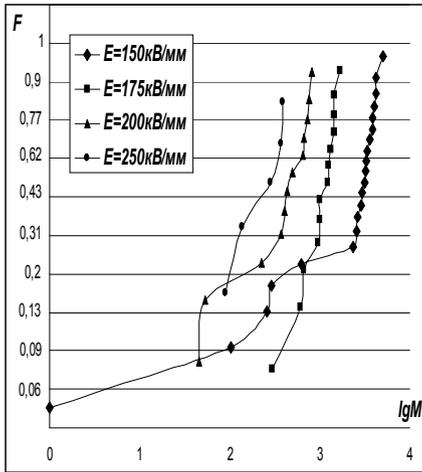
Ресурсные испытания, проводимые на нескольких уровнях (4-5 уровнях) напряженности для образцов с различной толщиной пленочного диэлектрика, дали следующие результаты (табл. 3):

Таблица 3 – Средние значения наработки образцов с различными толщинами пленочного диэлектрика и различных значениях напряженности эл. поля

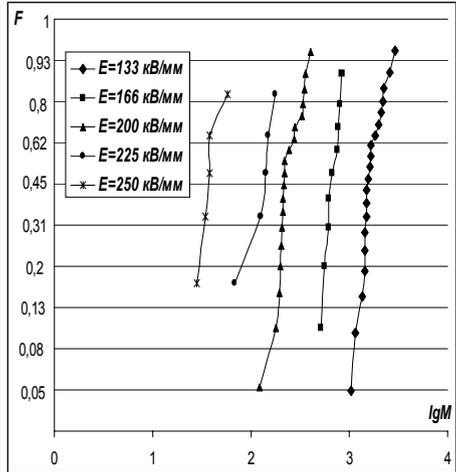
Толщина изоляции, мкм	Средний ресурс при различных уровнях напряженности, импульсов							
	$E$ , кВ/мм							
	125	133	150	167	175	200	225	250
24	–	–	2837	–	1108	475	–	256
36	–	1737	–	681	–	250	132	39
48	761	–	411	–	202	134	76	–
60	630	–	288	–	159	82	–	–

Распределение образцов по ресурсу приведено на рис. 2 в координатной сетке, соответствующей закону распределения Вейбулла.

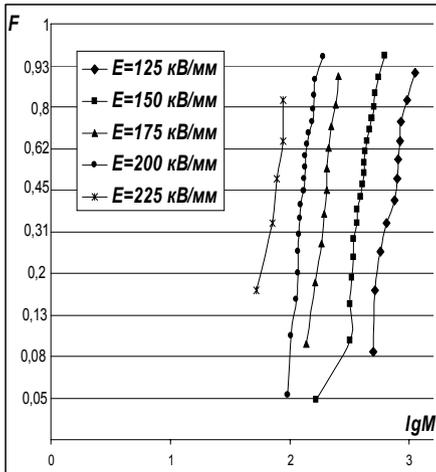
После окончания испытаний образцы были разобраны для определения расположения точек пробоя секций. Подавляющее большинство точек пробоя (90%) находится в верхней полуплоскости секций, что объясняется способом подключения источника высокого напряжения к секции (на секцию от источника подается выпрямленное напряжение положительной полярности). Для 3-х, 4-х и 5-ти слойных образцов точки пробоя лежат в 95 % случаев на краю обкладок, тогда как для секций с 2-мя слоями пленки 35 % точек пробоя находятся вне области закраины обкладок (причем большинство пробоев в области однородного поля произошло на образцах, которые испытывались на кратковременную электрическую прочность).



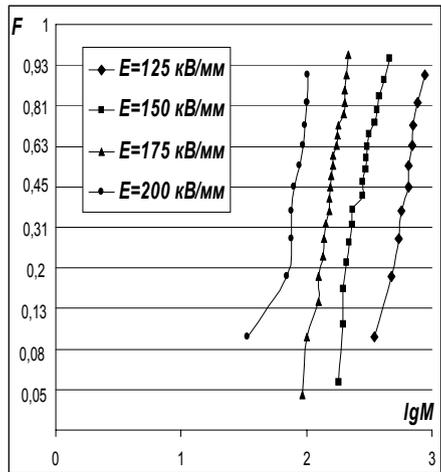
а)



б)



в)



г)

Рисунок 2 – Распределение образцов по ресурсу: а) 2-х слойных (24 мкм); б) 3-х слойных (36 мкм); в) 4-х слойных (48 мкм); г) 5-ти слойных (60 мкм).

**Анализ результатов.** Определение показателя степени в формуле «жизни» – зависимости ресурса от напряженности поля по данным, приведенным в табл. 3, по формуле:

$$n = \frac{\ln \frac{M_i}{M_j}}{\ln \frac{E_j}{E_i}}, \quad (1)$$

где  $M_i$  ( $M_j$ ) – ресурс  $i$ -той ( $j$ -той) секции на напряженности  $E_i$  ( $E_j$ ), показало, что значения показателя степени  $n$  находится в пределах 3 – 6,5. Причем при больших значениях напряженности электрического поля показатель степени принимает большие значения. Наибольшие значения показателя степени соответствуют варианту с двухслойным диэлектриком, так как разрушение диэлектрика обусловлено двумя механизмами пробоя одновременно (как в области равномерного электрического поля, так и на краях обкладок). На рис. 3 приведены зависимости удельной энергии испытанных образцов от ресурса. Также приведена зависимость удельной энергии бумажно-касторовых секций по данным работы [3]. Последняя в 2-3 раза превышает энергию испытанных образцов. Видимо применение стандартной технологии пропитки, принятой для бумажно-касторовых диэлектриков, является некорректным для чисто пленочных конденсаторов, несмотря на то, что электрическая прочность пленки выше до 1,5 раз. Следует отметить, что и ресурс бумажно-касторовой изоляции на напряженностях 125-200 кВ/мм в несколько раз превышает (по данным [4]) ресурс испытанных секций из полипропиленовой пленки.

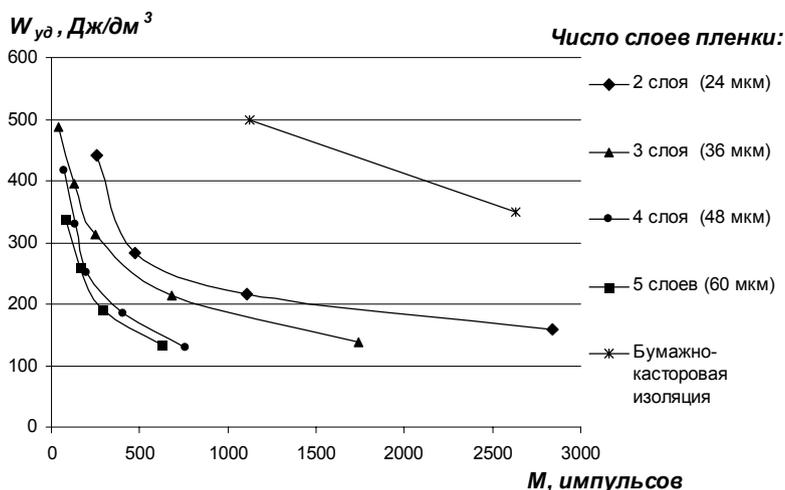


Рисунок 3 – Удельная энергия образцов с пропитанной полипропиленовой изоляцией и с бумажно-касторовой изоляцией

К преимуществам применения пленочной изоляции можно отнести низкий тангенс угла диэлектрических потерь, что дает возможность применять пленочные конденсаторы в частотных режимах (от 10 до 100 Гц), где применение бумажно-касторовых конденсаторов невозможно. Также преимуществом является возможность сокращения времени сушки.

Коэффициент вариации значений ресурсов испытанных образцов уменьшается с увеличением числа слоев пленки, что показано на рис. 4.

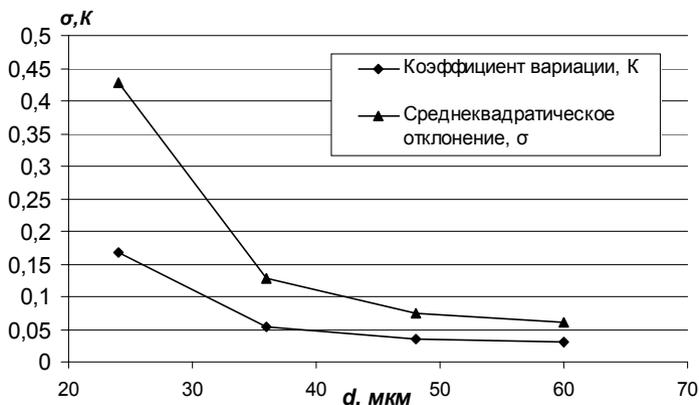


Рисунок 4 – Зависимость среднеквадратического отклонения и коэффициента вариации ресурса испытанных образцов (при  $E=200$  кВ/мм) от толщины диэлектрика

### Выводы:

1. С увеличением числа слоев полипропиленовой пленки ресурс образцов при одинаковом уровне напряженности электрического поля снижается, в тоже время происходит и значительное уменьшение коэффициента вариации.

2. Ресурс и удельная энергия пропитанной полипропиленовой пленочной изоляции, изготовленной по технологии сушки и пропитки бумажно-касторовой изоляции, в импульсном режиме при напряженности электрического поля 125-200 кВ/мм в несколько раз меньше, чем у бумажно-касторовых секций. Необходимо провести дальнейшие исследования по изменению технологии изготовления.

3. Несмотря на худшие показатели, пропитанные полипропиленовые конденсаторы, можно использовать в частотных режимах, так как они имеют тангенс угла диэлектрических потерь на порядок ниже.

4. Необходимо продолжить исследования по применению для пропитки пленочных конденсаторов диэлектрических жидкостей с меньшей вязкостью и более низким углом смачивания.

**Список литературы:** 1. Г.С.Кучинский, Н.И.Назаров, Г.Т.Назарова, И.Ф.Переселенцев. Силовые электрические конденсаторы. – М.: Энергия, 1975. – 248 с. 2. Бржезицький В.О., Исакова А.В., Рудаков В.В. та ін. Техніка і електрофізика високих напруг: Навч. посібник / За ред. В.О.Бржезицького та В.М.Михайлова. – Харків: НТУ «ХП» – Торнадо, 2005. – 930 с. 3. В.В.Рудаков, О.Ю.Дубийчук, В.П.Кравченко Предельные удельные характеристики высоковольтных импульсных конденсаторов // Вісник НТУ «ХП». Тематичний випуск «Електроенергетика і перетворююча техніка». – Харків, НТУ «ХП». – 2004. – № 7. – С. 142-147. 4. Дубийчук О.Ю., Рудаков В.В. Экспериментальное определение показателей надежности секций конденсаторов с бумажно-касторовой изоляцией // Електротехніка і електромеханіка. – 2006. – № 1. – С. 71-75.

Поступила в редколлегию 12.10.2006.