

И.Ю. Гребенников, В.И. Гунько, А.Я. Дмитришин, Л.И. Онищенко, И.С. Швец

О ПОВЫШЕНИИ УДЕЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И РЕСУРСА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский 43-А, г. Николаев, 54018, Украина*

Возрастающий уровень высоковольтной импульсной техники требует создания новых типов высоковольтных импульсных конденсаторов с повышенными значениями удельной запасаемой энергии и ресурса. Такие конденсаторы необходимы для многих областей науки и техники (лазерная техника, нефтедобыча и др.), где особенно остро стоят вопросы снижения массогабаритных показателей, повышения удельных энергетических характеристик, надежности и срока службы оборудования электрофизических установок.

Проведенные в Институте импульсных процессов и технологий НАН Украины исследования показали, что повышение удельных энергетических характеристик и ресурса высоковольтных импульсных конденсаторов может быть достигнуто применением в качестве рабочего диэлектрика секций конденсаторов чистопленочной изоляции, пропитанной неполярным жидким диэлектриком с высокой газостойкостью и стойкостью к частичным разрядам, с низким тангенсом угла потерь.

Удельная запасаемая энергия конденсаторов по объему (удельная энергоемкость $W_{уд}$ чисто пленочного пропитанного конденсаторного диэлектрика без учета характеристик материала обкладок) может быть определена по известной формуле

$$W_{уд} = \frac{\varepsilon_n \cdot E_p^2 \cdot \left[d_n + \left(\frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_{жс}} \right) \cdot d_{жс} \right]}{2 \cdot (\rho_n \cdot d_n + \rho_{жс} \cdot d_{жс})}, \quad (1)$$

где ε_n , $\varepsilon_{жс}$ – относительные диэлектрические проницаемости полимерной пленки и пропитывающей жидкости соответственно; E_p – рабочая напряженность электрического поля в диэлектрике; d_n , $d_{жс}$ – общие толщины пленки и пропитывающей жидкости; ρ_n , $\rho_{жс}$ – плотности пленки и жидкости.

Ранее вопросам повышения удельной энергоемкости конденсаторов с чисто пленочным рабочим диэлектриком уделялось внимание в работах [1, 2]. В [1] повышение удельной запасаемой энергии конденсатора в соответствии с приведенной формулой достигалось за счет увеличения относительной диэлектрической проницаемости пленочного диэлектрика посредством применения поливинилиденфторидной пленки (ПВДФ). Однако пленка ПВДФ с ε_n от 10 до 14 из-за высоких диэлектрических потерь (при частоте 10^3 Гц и температуре 20°C $\text{tg}\delta = 0,015$, а при более высокой частоте 10^6 Гц – $\text{tg}\delta = 0,22$) может применяться только в конденсаторах, эксплуатирующихся в моноимпульсном режиме, и уже при частоте следования зарядов-разрядов 1 – 2 Гц в структуре рабочего диэлектрика конденсатора возникают места локального перегрева, что приводит к его быстрому выходу из строя.

В [2] с учетом [1] уже рассматривалась не сама ПВДФ пленка, а композиция полиэтилентерефталатной пленки ПЭТ-КЭ толщиной $d_{п1} = 20$ мкм и $\varepsilon_{п1} = 3,2$ и нанесенным на нее слоем ПВДФ пленки толщиной $d_{п2} = 2$ мкм и $\varepsilon_{п2} = 10$, то есть суммарной толщиной $d_n = 22$ мкм. Для сравнения рассматривалась полипропиленовая пленка ПП с $\varepsilon_n = 2,2$. Определим эквивалентную относительную диэлектрическую проницаемость ε_n композиции ПЭТ-КЭ -ПВДФ по известной формуле

$$\varepsilon_n = \frac{d_n}{\frac{d_{n1}}{\varepsilon_{n1}} + \frac{d_{n2}}{\varepsilon_{n2}}}. \quad (2)$$

Величина эквивалентной относительной диэлектрической проницаемости композиции ПЭТ-КЭ-ПВДФ составляет $\varepsilon_n = 3,41$, то есть по сравнению с пленкой ПЭТ-КЭ возрастает незначительно, но как показано в [2], длительная электрическая прочность этой композиции выше, чем у ПВДФ пленки. Однако здесь также наблюдаются места локального перегрева.

Вопросу повышения удельной запасаемой энергии конденсаторов за счет применения чисто пленочного диэлектрика уделено внимание и в [3]. Но в этой работе чисто пленочный диэлектрик рассматривался применительно к повышению рабочей частоты следования зарядов-разрядов конденсаторов, и здесь не отражена взаимосвязь среднего ресурса конденсаторов с их удельной запасаемой энергией в случае применения чисто пленочного диэлектрика.

Цель данной статьи – оценка достижимой удельной энергоемкости высоковольтных импульсных конденсаторов на основе пропитанных чисто пленочных диэлектриков с учетом ресурса конденсаторов.

В качестве объектов исследования использовались следующие структуры трехслойного чисто пленочного диэлектрика:

- полипропиленовый толщиной 36 мкм на основе полипропиленовой пленки ПП-КСШ;
- полиэтилентерефталатный толщиной 35 мкм на основе полиэтилентерефталатной пленки ПЭТ-КЭ;
- комбинированный полипропиленово-полиэтилентерефталатный толщиной 34 мкм на основе двух слоев полипропиленовой пленки ПП-КСШ и расположенного между ними слоя полиэтилентерефталатной пленки ПЭТ-КЭ.

В качестве жидких пропитывающих диэлектриков исследовались фенилксиллэтан (ФКЭ) и трансформаторное масло Т-1500.

Экспериментальные исследования кратковременной и длительной электрической прочности выбранных структур чисто пленочного диэлектрика проводились на макетах секций высоковольтного импульсного конденсатора.

В табл. 1 приведены данные экспериментальных исследований по определению кратковременной электрической прочности различных структур чисто пленочного диэлектрика.

Критерием отбора структур чисто пленочного диэлектрика для проведения экспериментальных исследований по определению их длительной электрической прочности служили величины их кратковременной электрической прочности. Поэтому для проведения дальнейших исследований выбраны структуры с наибольшей электрической прочностью – полипропиленовый диэлектрик, пропитанный фенилксиллэтаном; полиэтилентерефталатный, пропитанный трансформаторным маслом Т-1500, и комбинированный полипропиленово-полиэтилентерефталатный, пропитанный ФКЭ и трансформаторным маслом Т-1500.

Таблица 1. Данные по определению кратковременной электрической прочности

Диэлектрик пленочный	Пропитывающий диэлектрик	d_n , мкм	$\text{tg}\delta$	$R_{из}$, МОм	$E_{пр}$, кВ/мм
Полипропиленовый	фенилксиллэтан	36	0,0015	12500	424,6
	трансформаторное масло Т-1500		0,0009	23000	334,3
Полиэтилентерефталатный	фенилксиллэтан	35	0,0079	17500	325,7
	трансформаторное масло Т-1500		0,0077	25000	437,1
Полипропиленово-полиэтилентерефталатный	фенилксиллэтан	34	0,0027	13000	407,8
	трансформаторное масло Т-1500		0,0024	25000	453,0

Исследования по определению длительной электрической прочности различных структур чисто пленочного диэлектрика на макетах секций проводились в режиме колебательного разряда с реверсом разрядного тока 0,3, частотой следования зарядов-разрядов 1,5 Гц при высоких значениях рабочей напряженности электрического поля в диэлектрике.

В табл. 2 приведены данные экспериментальных исследований по определению длительной электрической прочности.

По результатам испытаний с использованием эмпирических формул построены графики зависимости удельной запасаемой энергии высоковольтного импульсного конденсатора от его ресурса при рабочих напряженностях электрического поля в диэлектрике до 183,8 кВ/мм.

Таблица 2. Данные по определению длительной электрической прочности

Диэлектрик пленочный	Пропитывающий диэлектрик	d_p , мкм	$E_{\text{раб}}$, кВ/мм	$N_{\text{ср}}$, зарядов-разрядов
Полипропиленовый	фенилксиллилэтан	36	173,6	$5,96 \cdot 10^5$
Полиэтилентерефталатный	трансформаторное масло Т-1500	35	178,6	$4,83 \cdot 10^5$
Полипропиленово-полиэтилентерефталатный	фенилксиллилэтан	34	183,8	$6,27 \cdot 10^5$
	трансформаторное масло Т-1500		183,8	$5,3 \cdot 10^5$

На рис. 1 и 2 показаны кривые зависимости удельной запасаемой энергии конденсатора от ресурса для различных структур чисто пленочного диэлектрика, пропитанных ФКЭ и трансформаторным маслом Т-1500, в сравнении с бумажно-пленочным диэлектриком, пропитанным касторовым маслом.

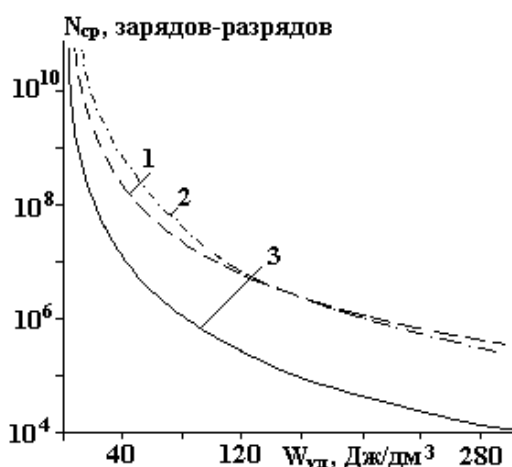


Рис. 1. Зависимость среднего ресурса конденсаторов от удельной запасаемой энергии при пропитке пленочного диэлектрика фенилксиллилэтаном в сравнении с бумажно-пленочным диэлектриком, пропитанным касторовым маслом. 1 – полипропиленовый диэлектрик, 2 – комбинированный полипропиленово-полиэтилентерефталатный диэлектрик, 3 – комбинированный бумажно-пленочный диэлектрик, пропитанный касторовым маслом

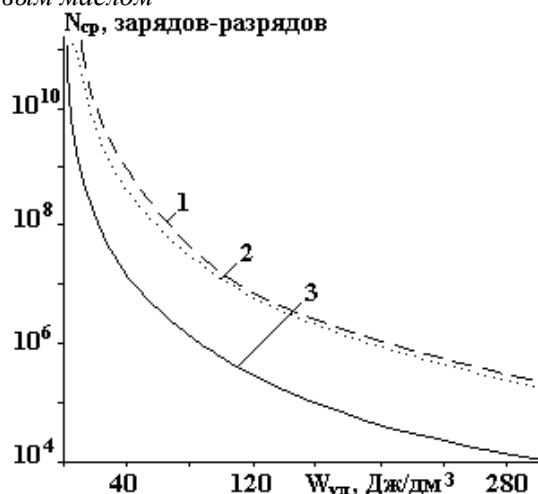


Рис. 2. Зависимость среднего ресурса конденсаторов от удельной запасаемой энергии при пропитке пленочного диэлектрика трансформаторным маслом Т-1500 в сравнении с бумажно-пленочным диэлектриком, пропитанным касторовым маслом. 1 – полиэтилентерефталатный диэлектрик, 2 – комбинированный полипропиленово-полиэтилентерефталатный диэлектрик, 3 – комбинированный бумажно-пленочный диэлектрик, пропитанный касторовым маслом

Анализируя зависимости, приведенные на рис. 1, видно, что при удельной запасаемой энергии 180 Дж/дм³ ресурсы конденсаторов с полипропиленовым и комбинированным полипропиленово-

полиэтилен-терефталатным диэлектриком, пропитанным ФКЭ, равны. С дальнейшим ростом удельной запасаемой энергии до 300 Дж/дм³ ресурс конденсаторов с комбинированным диэлектриком незначительно снижается. Это может быть объяснено меньшей электрической прочностью комбинированного диэлектрика и большими диэлектрическими потерями по сравнению с полипропиленовым диэлектриком.

При снижении удельной запасаемой энергии конденсаторов от 160 до 20 Дж/дм³ при равном ресурсе конденсаторы с комбинированным полипропиленово-полиэтилентерефталатным диэлектриком имеют большую удельную запасаемую энергию по сравнению с полипропиленовым из-за большей относительной диэлектрической проницаемости комбинированного диэлектрика. Необходимо учитывать и то, что при снижении удельной запасаемой энергии конденсатора до 20 Дж/дм³ уменьшалась и величина рабочей напряженности электрического поля, а при величинах от 100 до 120 кВ/мм эти диэлектрики имеют примерно равную длительную электрическую прочность.

Из анализа зависимостей, приведенных на рис. 2, видно, что полиэтилентерефталатный и комбинированный полипропиленово-полиэтилен-терефталатный диэлектрики, пропитанные трансформаторным маслом Т-1500, имеют примерно одинаковую зависимость удельной запасаемой энергии конденсатора от ресурса. При этом удельная запасаемая энергия конденсатора с полиэтилентерефталатным диэлектриком несколько выше по причине большей относительной диэлектрической проницаемости.

Сравнивая между собой зависимости, приведенные на рис. 1 и 2, видно, что в области высоких значений удельной запасаемой энергии, начиная с 140 Дж/дм³ и выше, то есть при высоких напряженностях электрического поля в диэлектрике, пропитка фенилксилитаном по сравнению с трансформаторным маслом Т-1500 обеспечивает более высокий ресурс конденсатора. Это объясняется более высокой газостойкостью и более высокой напряженностью начала частичных зарядов в ФКЭ по сравнению с трансформаторным маслом Т-1500.

Анализируя зависимости удельной запасаемой энергии конденсаторов от ресурса для различных структур чисто пленочного диэлектрика, пропитанных ФКЭ и трансформаторным маслом Т-1500 в сравнении с бумажно-пленочным диэлектриком, пропитанным касторовым маслом, видим, что применение чисто пленочного диэлектрика позволяет повысить удельную запасаемую энергию конденсатора при одинаковом ресурсе более чем в два раза или на порядок повысить ресурс конденсатора при одинаковой удельной запасаемой энергии в зависимости от структуры пленочного диэлектрика и типа пропитывающей жидкости.

При этом следует отметить, что при применении чисто пленочного диэлектрика пропитывающая жидкость должна быть совместима с применяемой пленкой и должен быть выбран режим термовакуумной сушки и пропитки, который обеспечивает высокую электрическую прочность рабочего диэлектрика конденсатора, исключив образование воздушных карманов. Вместе с тем необходимо отметить, что длительность цикла термовакуумной обработки конденсаторов с чисто пленочным диэлектриком, а соответственно и энергозатраты значительно ниже по сравнению с аналогичными конденсаторами, в конструкции которых применен чисто бумажный или комбинированный бумажно-пленочный диэлектрик.

Таким образом можно сделать выводы, что применение чисто пленочного диэлектрика в конструкциях высоковольтных импульсных конденсаторов позволит в сравнении с бумажно-пленочным диэлектриком повысить удельную запасаемую энергию конденсаторов более чем в два раза или увеличить на порядок их ресурс, а также снизить энергозатраты на их изготовление, а следовательно, снизить их стоимость.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беленький Б.П., Тывина О.В. Проблемы повышения удельной запасаемой энергии конденсаторов с органическим диэлектриком // *Электротехника*. 1992. № 2. С. 64–66.
2. Андреев А.М., Журавлева Н.М., Сажин Б.И., Луцкая Т.В. Оценка удельной энергоемкости пленочных полимерных конденсаторных структур, пропитанных жидкими диэлектриками // Там же. 1994. № 9. С. 57–60.
3. Комин С.Н., Морозов Е.А., Соколова Т.Г. и др. Высоковольтные конденсаторы для мощных импульсных источников питания // Там же. 1991. № 5. С. 51–53.

Поступила 26.01.04

Summary

In the article the estimation of accessible specific energy output of high-voltage pulse capacitors are made on the basis of different frames of impregnated only film dielectrics with allowance of safe life of capacitors.