

ИССЛЕДОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ПЛЕНОЧНОГО ДИЭЛЕКТРИКА ДЛЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

В.И. Гунько, А.Я. Дмитришин, Л.И. Онищенко, С.О. Топоров, Т.А. Фещук

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина, dphc@iipr.com.ua*

Рассмотрены результаты исследований кратковременной и длительной электрической прочности различных конструкций пленочного диэлектрика для высоковольтных импульсных конденсаторов. Проанализированы факторы, влияющие на электрическую прочность таких конструкций, и даны рекомендации по их использованию в производстве конденсаторов.

УДК 621.319.4

ВВЕДЕНИЕ

Анализ научно-технической информации показывает, что мировые центры силового конденсаторостроения таких стран, как Россия, Казахстан, США, Германия, Япония, Китай, постоянно ведут работы по совершенствованию высоковольтных импульсных конденсаторов для повышения удельных энергетических характеристик и ресурса и снижения тангенса угла потерь, чтобы обеспечить повышение частоты следования зарядов-разрядов [1–5].

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ

Исследования различных конструкций пленочного диэлектрика [6, 7, 9, 10] показали, что применение пленочной изоляции в конденсаторах позволяет повысить рабочую напряженность электрического поля в диэлектрике и увеличить по сравнению с бумажно-пленочной удельную запасаемую энергию конденсатора от 1,3 до 1,8 раза при одновременном увеличении ресурса, который зависит от режима эксплуатации. Однако согласно анализу этих работ на электрическую прочность пленочного диэлектрика влияют различные факторы. Так, в [7] изучался пленочный диэлектрик на основе полиэтилентерефталатной пленки, где пропитывающими диэлектриками служили фенилсилилэтан (ФКЭ) и его аналог – жидкость АЗИ. Электрическая прочность секций с пропиткой АЗИ оказалась на 45% выше, чем при пропитке ФКЭ. Поэтому авторы работы [7] для пропитки полиэтилентерефталатного диэлектрика рекомендовали жидкость АЗИ. Однако, с нашей точки зрения, проблема состоит в неправильном подборе пропитывающей жидкости для пленочного диэлектрика [8]. Аналогичная ситуация имеет место и в работах [9, 10], где для пропитки диэлектрика на основе полипропиленовой плёнки применялись трансформаторное и касторовое масла с кинематической вязкостью $9 \cdot 10^{-6}$ и $1030 \cdot 10^{-6}$ м²/с соответственно. При этом длительная электрическая прочность (ресурс) секций с пропиткой касторовым маслом почти на порядок ниже, чем у секций с пропиткой трансформаторным маслом. Таким образом, для пропитки плёночного диэлектрика должны применяться жидкости с малой вязкостью. В [9] сказано, что при пропитке секций трансформаторным и касторовым маслами использовалась стандартная технология. При этом, как показано в [10], при одной и той же напряженности электрического поля в диэлектрике ресурс секций с двухслойным пленочным диэлектриком оказался почти в два раза выше ресурса секций с трехслойным пленочным диэлектриком, что свидетельствует о некачественной пропитке трехслойного пленочного диэлектрика, то есть стандартная технология при пропитке пленочных диэлектриков не работает. В [9, 10] максимальная наработка секций на основе полипропиленового диэлектрика с пропиткой трансформаторным маслом составила порядка 10^4 зарядов-разрядов, что можно объяснить снижением электрической прочности трансформаторного масла в результате контактирования с полипропиленовой пленкой [11].

Исследование различных конструкций пленочного диэлектрика по определению их кратковременной и длительной (ресурса) электрической прочности позволит разработчикам высоковольтных импульсных конденсаторов обоснованно подойти к выбору как рабочего диэлектрика, так и напряженности электрического поля в нем в зависимости от заданного ресурса и режима работы конденсатора.

Цель данной работы – исследование факторов, влияющих на электрическую прочность конструкций плёночного диэлектрика для высоковольтных импульсных конденсаторов.

Основная часть. Для достижения поставленной цели проводились экспериментальные исследования на макетах секций с тремя конструкциями трёхслойного полипропиленово-полиэтилентерефталатного диэлектрика толщиной 30, 34 и 39 мкм, пропитанного трансформаторным маслом Т-1500. Данные диэлектрики выбрали по результатам проведенных ранее исследований [5], в которых между двумя слоями шероховатой полипропиленовой плёнки толщиной 12 мкм располагался один слой полиэтилентерефталатной плёнки толщиной 6, 10 или 15 мкм. При пропитке макетов секций была задействована технология, разработанная специально для пленочного диэлектрика [12].

Кратковременная электрическая прочность указанных конструкций диэлектрика производилась путем доведения секций до электрического пробоя.

Результаты испытаний полипропиленово-полиэтилентерефталатного диэлектрика, пропитанного трансформаторным маслом Т-1500, на кратковременную электрическую прочность на макетах секций приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты испытаний полипропиленово-полиэтилентерефталатного диэлектрика на кратковременную электрическую прочность

Толщина диэлектрика, мкм	$E_{нр.ср}$, кВ/мм	Коэффициент вариации, %	Место пробоя в секции, %		
			на изгибе	на ровной поверхности	на складке
30	433,3	4,6	28,6	14,3	57,1
34	418,2	2,5	14,3	–	85,7
39	388,3	2,3	28,6	–	71,4

Из анализа полученных результатов для полипропиленово-полиэтилентерефталатного диэлектрика толщиной 39 мкм видно, что средняя величина пробивной напряженности электрического поля для этого диэлектрика составляет 388,3 кВ/мм при коэффициенте вариации 2,3%. При дефектации секций выявлено, что у 71,4% секций электрический пробой произошел под обкладками секции, на складке диэлектрика, а 28,6% секций пробивались на изгибе секции.

Средняя пробивная напряженность электрического поля для диэлектрика толщиной 34 мкм составила 418,2 кВ/мм при коэффициенте вариации 2,5%. При этом у 85,7% секций пробой выявлен под обкладками, на складке диэлектрика, а у 14,3% – на изгибе секции.

Диэлектрик толщиной 30 мкм пробивался при средней напряженности электрического поля 433,3 кВ/мм при коэффициенте вариации 4,6%. При дефектации у 57,1% секций пробой выявлен под обкладками секции, на складке диэлектрика, у 28,6% – на изгибе секции, а у 14,3% – на ровной поверхности диэлектрика.

Ускоренные ресурсные испытания макетов секций с различными конструкциями диэлектрика проводились в режиме колебательного разряда с декрементом колебаний разрядного напряжения 10 и частотой следования зарядов-разрядов 0,2 Гц при значениях напряженности электрического поля в диэлектрике от 153,8 до 220,6 кВ/мм.

Для сравнения макетов секций одной и той же конструкции, испытывавшихся на ресурс при различных величинах напряженности электрического поля в диэлектрике, необходимо ввести величину коэффициента запаса по электрической прочности $K_{зан}$, равную отношению $E_{нр.ср}$ к $E_{раб}$.

Результаты ресурсных испытаний полипропиленово-полиэтилентерефталатного диэлектрика, пропитанного трансформаторным маслом Т-1500, на макетах секций приведены в табл. 2.

Согласно анализу результатов ресурсных испытаний макетов секций с различными структурами диэлектрика, средний ресурс макетов секций с толщиной диэлектрика 30 мкм при рабочей напряженности электрического поля 200 кВ/мм составил $3,38 \cdot 10^5$ зарядов-разрядов при коэффициенте вариации 16,3%.

Проведенная дефектация макетов секций показала, что большинство пробоев макетов секций каждого варианта исполнения наблюдалось под обкладками, на складке диэлектрика.

При сравнении результатов ресурсных испытаний макетов секций с толщиной диэлектрика 34 мкм и коэффициентом запаса по электрической прочности 1,9 с результатами испытаний макетов секций с толщиной диэлектрика 30 мкм и коэффициентом запаса по электрической прочности 2,17 видно, что при меньшем коэффициенте запаса коэффициент вариации выше.

Более сильно эта зависимость от коэффициента запаса по электрической прочности заметна при испытании на ресурс макетов секций с толщиной диэлектрика 34 мкм. Так, макеты секций с ко-

эффицентом запаса по электрической прочности, равным 1,9 ($E_{\text{раб}}=220,6$ кВ/мм), имеют средний ресурс $9,74 \cdot 10^4$ зарядов-разрядов, в то время как у секций с коэффициентом запаса, равным 2,37 ($E_{\text{раб}} = 176,5$ кВ/мм), средний ресурс равен $5,3 \cdot 10^5$ зарядов-разрядов.

Аналогично эта зависимость проявляется и у диэлектрика толщиной 39 мкм.

Таблица 2. Результаты испытаний полипропиленово-полиэтилентерефталатного диэлектрика на длительную электрическую прочность (ресурс)

Толщина диэлектрика, мкм	$U_{\text{раб}}$, кВ	$E_{\text{раб}}$, кВ/мм	$K_{\text{зап}}$	$N_{\text{ср}}$, зарядов-разрядов	Средне-квадратичное отклонение	Коэффициент вариации, %
30	6	200	2,17	$3,38 \cdot 10^5$	$5,5 \cdot 10^4$	16,3
34	6	183,8	2,28	$5,3 \cdot 10^5$	$4,8 \cdot 10^4$	9,1
	7,5	220,6	1,9	$9,74 \cdot 10^4$	$3,1 \cdot 10^4$	31,6
39	6	153,8	2,52	$1,2 \cdot 10^6$	$7,4 \cdot 10^4$	6,2
	7,5	192,3	2,02	$4,83 \cdot 10^5$	$5,1 \cdot 10^4$	10,6

ВЫВОДЫ

1. По результатам проведенных исследований с целью обеспечения высокой электрической прочности пленочного диэлектрика необходимо соблюдение следующих условий:

- для пропитки пленочного диэлектрика должны применяться жидкости с низкой вязкостью;
- пленочный диэлектрик не должен ухудшать электрофизические характеристики пропитываемой жидкости;
- секции с пленочным диэлектриком должны пропитываться жидким диэлектриком по специальной технологии.

2. Так как большинство мест пробоя происходит на складках диэлектрика, технологическая операция намотки секций с пленочным диэлектриком должна производиться с минимальным складкообразованием.

3. В конструкциях высоковольтных импульсных конденсаторов должны применяться пленочные диэлектрические структуры с коэффициентом запаса по электрической прочности не менее двух.

ЛИТЕРАТУРА

1. Конденсаторы широкого диапазона характеристик. Элкод. <http://www.elcod.spb.ru/catalog.asp>.
2. Конденсаторы импульсные. ЗАО «Русская технологическая группа». <http://www.rustechgroup.ru/rus/index.htm>.
3. General Atomics Energy Products. High Voltage Capacitors. <http://www.gaep.com/capacitors.html>.
4. Capacitors. High Voltage Products. Maxwell Technologies. <http://www.maxwell.com/highvolt/products/index.asp>.
5. Гребенников И.Ю., Гунько В.И., Дмитришин А.Я., Онищенко Л.И., Швец И.С. О повышении удельных энергетических характеристик и ресурса высоковольтных импульсных конденсаторов. *Электротехника*. 2005, **12**, 47–51.
6. Гунько В.И., Дмитришин А.Я., Онищенко Л.И., Швец И.С. Оценка достигнутого уровня в области создания высоковольтных импульсных конденсаторов с высокой удельной запасаемой энергией. *Электронная обработка материалов*. 2004, **4**, 87–90.
7. Ермилов И.В. Современные импульсные высоковольтные конденсаторы с пленочным диэлектриком. *Прикладная физика*. 2001, **5**, 77–87.
8. Gun'ko V.I., Onishchenko L.I., Grebennikov I.Yu., Dmitrishin A.Ya., Toporov S.O. and Slepets E.N. Study of the Compatibility of Phenyltrinitroxylenethane (Phenylxylilethane) with Structural Materials. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2008, **44**(2), 154–158.
9. Кравченко Ю.В. Ресурс секций импульсных конденсаторов с полипропиленовой изоляцией. *Физика импульсных разрядов в конденсированных средах: Материалы XIII междунар. научн. школы-семинара (август 2007)*. Николаев: КП «Николаевская областная типография», 2007. С. 138–139.
10. Кравченко Ю.В. Ресурс пропитанной бумажно-полипропиленовой изоляции в импульсном режиме. *Вестник НТУ «ХПИ»*. 2008, **1**(21), 107–116.

11. Гунько В.И., Дмитришин А.Я., Топоров С.О., Фещук Т.А. Исследование совместимости трансформаторного масла Т-1500 с конструкционными материалами. *Электронная обработка материалов*. 2006, **5**, 77–79.
12. UA 57999 15.03.2011. Гунько В.И., Гребенников И.Ю., Дмитришин А.Я., Онищенко Л.И., Топоров С.О. Способ пропитки электрических конденсаторов с пленочным диэлектриком.

Поступила 15.07.11

Summary

Results of researches of short-time and long-time dielectric strength of various structures of film dielectric for high-voltage pulse capacitors are reviewed. Factors, which influenced on dielectric strength those constructions, are analyzed and recommendations about its using in capacitor's manufacture are given.
