

В. И. ГУНЬКО, зав. сектором, ИИПТ НАН Украины, Николаев;
А. Я. ДМИТРИШИН, мл. науч. сотр., ИИПТ НАН Украины, Николаев;
Л. И. ОНИЩЕНКО, зав.отделом, ИИПТ НАН Украины, Николаев;
С. О. ТОПОРОВ, вед. инж., ИИПТ НАН Украины, Николаев;
И. А. ПЕРЕКУПКА, инж.-констр. I кат., ИИПТ НАН Украины, Николаев

РАЗРАБОТКА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ С ПЛЕНОЧНЫМ ДИЭЛЕКТРИКОМ

Проведены исследования пленочного диэлектрика на макетах секций высоковольтного импульсного конденсатора. На основе этих исследований разработаны три новых типа конденсаторов с пленочным диэлектриком, которые имеют повышенных ресурс в сравнении с аналогичными конденсаторами с бумажным и бумажно-пленочным диэлектриками.

Ключевые слова: высоковольтный импульсный конденсатор, пленочный диэлектрик, запасаемая энергия, электрическая прочность диэлектрика, ресурс.

Введение. Удовлетворение растущего спроса на импульсное электротехническое высоковольтное оборудование ориентирует исследователей и разработчиков такой продукции на поиск малозатратных технологических процессов их изготовления и минимизацию технологических операций [1-5].

На данный момент в ИИПТ НАН Украины проведен комплекс научных исследований различных диэлектрических систем для секций высоковольтных импульсных конденсаторов (ВИК) на основе полимерных пленок, пропитанных жидкими диэлектриками с малой вязкостью, имеющих более высокую электрическую прочность по сравнению с ранее применяемым комбинированным бумажно-пленочным диэлектриком, пропитанным касторовым маслом [6, 7].

Проведенные исследования показали, что по сравнению с бумажно-пленочным диэлектриком применение в конструкции ВИК пропитанного пленочного диэлектрика позволяет повысить от 1,3 до 2 раз удельную запасаемую энергию конденсатора при одинаковом ресурсе или более, чем на порядок повысить его ресурс при одинаковой величине удельной запасаемой энергии конденсатора [7, 8]. В проведенных исследованиях повышение удельной запасаемой энергии ВИК достигается за счет повышения рабочей напряженности электрического поля в диэлектрике секции конденсатора.

Цель данной работы – создание ВИК с пленочным диэлектриком с повышенным ресурсом.

Для достижения поставленной цели было предложено использовать в секциях конденсатора трехслойный полипропиленово-полиэтилентерефталатный диэлектрик толщиной 30, 34 и 39 мкм, пропитанный трансформатор-

ным маслом Т-1500. Данные диэлектрики были выбраны по результатам проведенных ранее исследований [9], в которых между двумя слоями двусторонне шероховатой полипропиленовой пленки толщиной 12 мкм расположен один слой гладкой полиэтилентерефталатной пленки толщиной 6, 10 или 15 мкм. При пропитке макетов секций была задействована технология, разработанная специально для пленочного диэлектрика [10].

Исследования кратковременной и длительной (ресурса) электрической прочности этих пленочных диэлектриков на макетах секций позволяют обоснованно, в зависимости от заданного ресурса и режима работы конденсатора, выбрать конкретную конструкцию рабочего диэлектрика.

Кратковременная электрическая прочность $E_{np,cr}$ определялась путем доведения секций до электрического пробоя.

Определение длительной электрической прочности (ресурса) 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 высоких значениях напряженности электрического поля в диэлектрике $E_{раб}$ от 153,8 до 220,6 кВ/мм.

Для сравнения макетов секций одной и той же конструкции, которые испытывались на ресурс при различных величинах напряженности электрического поля в диэлектрике, введен коэффициент запаса по электрической прочности $K_{зап}$, равный отношению $E_{np,cr}$ к $E_{раб}$.

Результаты испытаний макетов секций с пленочным диэлектриком приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты испытаний макетов секций с пленочным диэлектриком

Толщина диэлектрика, мкм	$E_{np,cr}$, кВ/мм	Коэфф. вариации, %	$U_{раб}$, кВ	$E_{раб}$, кВ/мм	$K_{зап}$	$N_{ср}$, зарядов-разрядов	Коэфф. вариации, %
30	433,3	4,6	6	200	2,17	$3,38 \cdot 10^5$	16,3
34	418,2	2,5	6	183,8	2,28	$5,3 \cdot 10^5$	9,1
			7,5	220,6	1,9	$9,74 \cdot 10^4$	31,6
39	388,3	2,3	6	153,8	2,52	$1,2 \cdot 10^6$	6,2
			7,5	192,3	2,02	$4,83 \cdot 10^5$	10,6

Из анализа полученных результатов испытаний 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 %. Средняя пробивная напряженность электрического поля для диэлектрика толщиной 34 мкм составила 418,2 кВ/мм при коэффициенте вариации 2,5 %, а диэлектрик толщиной 30 мкм пробивался при средней напряженности электрического поля 433,3 кВ/мм при коэффициенте вариации 4,6 %.

Анализируя результаты ресурсных испытаний макетов секций с различ-

ными структурами диэлектрика, видно, что 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 %.

Сравнивая между собой результаты 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 результаты испытаний имеют выше коэффициент вариации.

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 коэффициентом 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.

Результаты проведенных исследований были использованы при создании пленочных высоковольтных импульсных конденсаторов ИМП-6-200, ИМП-10-5 и ИМП-50-1, в конструкции которых применены диэлектрики толщиной 30 мкм, 34 мкм, 39 мкм соответственно.

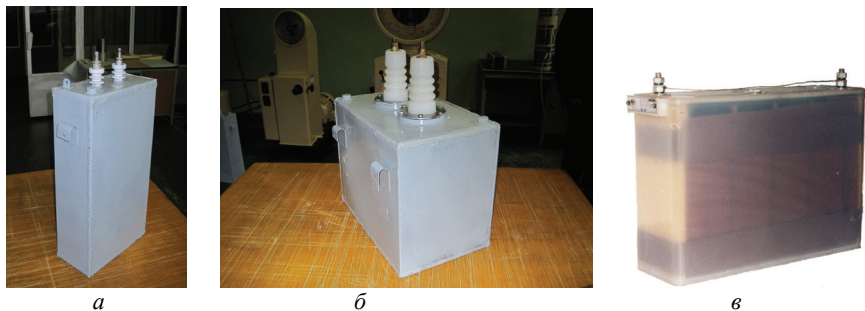


Рисунок – Внешний вид созданных высоковольтных импульсных конденсаторов с пленочным диэлектриком: *а* – ИМП-6-200; *б* – ИМП-50-1; *в* – ИМП-10-5

В табл. 2 и 3 приведены технические характеристики конденсаторов ИМП-6-200 и ИМП-50-1 в сравнении с существующими конденсаторами-аналогами, в которых применен бумажный и бумажно-пленочный диэлектрик, пропитанные касторовым маслом.

В табл. 4 приведены технические характеристики конденсатора ИМП-10-5, аналогов среди конденсаторов с бумажным и бумажно-пленоч-

ным диэлектриками у него не существует.

На рисунке приведены внешние виды указанных ВИК.

Анализ данных, приведенных в табл. 2, показывает, что применение в конструкции конденсатора ИМП-6-200 пленочного полипропиленово-полиэтилентерефталатного диэлектрика толщиной 30 мкм, пропитанного трансформаторным маслом Т-1500, при напряженности электрического поля 200 кВ/мм позволяет создать конденсатор с запасаемой энергией 3600 Дж со средним ресурсом $3 \cdot 10^5$ зарядов-разрядов. По сравнению с конденсатором ИК-5-200 с бумажно-пленочным диэлектриком его удельная запасаемая энергия выше в 1,4 раза, а ресурс выше в 2 раза.

Таблица 2 – Технические параметры и характеристики конденсатора ИМП-6-200 в сравнении с применяемыми конденсаторами ИК-5-200 и ИК-6-250

Наименование	ИМП-6-200	ИК-5-200	ИК-6-250
Номинальное напряжение, кВ	6	5	6
Номинальная емкость, мкФ	200	200	250
Запасаемая энергия, Дж	3600	2500	4500
Тип диэлектрика	пленочный	бумажно-пленочный	
Пропитывающая жидкость	трансформаторное масло	касторовое масло	
Рабочая напряженность электрического поля в диэлектрике секций, кВ/мм	200	83,3	158
Режим работы:			
– характер разряда			
– декремент затухания колебаний разрядного напряжения	2,5	3	10
– максимальный ток разряда, кА	20	10	
– частота повторения разрядов, Гц	0,1	0,17	0,2
Средний ресурс, зарядов-разрядов	$3 \cdot 10^5$	$1,5 \cdot 10^5$	$6 \cdot 10^4$
Габаритные размеры по корпусу, мм:	306x150x615	310x150x590	310x160x500
Масса, кг	42	48	38
Удельная запасаемая энергия:			
– по объему, Дж/дм ³	127,6	90	181
– по массе, Дж/кг	85,7	52,1	118,4

По сравнению с конденсатором ИК-6-250, в котором применен бумажно-пленочный диэлектрик, удельная запасаемая энергия конденсатора ИМП-6-200 ниже в 1,4 раза, но ресурс при этом выше в 5 раз.

Анализ данных, приведенных в табл. 3, показывает, что применение в конструкции конденсатора ИМП-50-1 пленочного полипропиленово-полиэтилентерефталатного диэлектрика толщиной 39 мкм, пропитанного трансформаторным маслом Т-1500, при напряженности электрического поля в диэлектрике секции 91,6 кВ/мм, позволило создать конденсатор с запасаемой энергией 1250 Дж со средним ресурсом 10^8 зарядов-разрядов. По срав-

нению с конденсатором ИКГ-50-1 с бумажным диэлектриком его удельная запасаемая энергия и ресурс в 1,4 и 1,3 раза выше соответственно.

Таблица 3 – Технические параметры и характеристики конденсатора ИМП-50-1 в сравнении с применяемыми конденсаторами ИКГ-50-1 и ИК-50-1

Наименование	ИМП-50-1	ИКГ-50-1	ИК-50-1
Номинальное напряжение, кВ	50		
Номинальная емкость, мкФ	1,0		
Запасаемая энергия, Дж	1250		
Тип диэлектрика	плёночный	бумажный	бумажно-плёночный
Пропитывающая жидкость	трансформаторное масло	касторовое масло	
Рабочая напряженность электрического поля в диэлектрике секций, кВ/мм	91,6	40	90,9
Режим работы:			
– характер разряда	колебательный		
– декремент затухания колебаний разрядного напряжения			
– максимальный ток разряда, кА	20		10
– частота повторения разрядов, Гц	от 2 до 4	2	
Средний ресурс, зарядов-разрядов	10^8 (при $f = 2$ Гц; $\Delta = 50$) $9 \cdot 10^7$ (при $f = 4$ Гц; $\Delta = 10$)	$7,5 \cdot 10^7$	$1,5 \cdot 10^7$
Габаритные размеры по корпусу, мм:	485x296x400	314x314x670	455x150x326
Масса, кг	77	110	31
Удельная запасаемая энергия:			
– по объему, Дж/дм ³	21,8	19	56,2
– по массе, Дж/кг	16,2	11,4	40,3

По сравнению с конденсатором ИК-50-1, в котором применен бумажно-плёночный диэлектрик, изготавливаемом в изоляционном корпусе, удельная запасаемая энергия этого конденсатора ниже в 2,5 раза, но ресурс при этом выше в 6,7 раза.

У конденсатора ИМП-10-5 при относительно невысокой удельной энергоемкости средний ресурс составляет $2 \cdot 10^9$ зарядов-разрядов. Это достигается за счет низкой рабочей напряженности электрического поля 58,8 кВ/мм, что применительно к плёночному диэлектрику обеспечивает большой запас по электрической прочности.

Таблица 4 – Технические параметры и характеристики конденсатора ИМП-10-5

Наименование	Величина
Номинальное напряжение, кВ	10
Номинальная емкость, мкФ	5
Запасаемая энергия, Дж	250
Индуктивность, нГн	500
Тип диэлектрика	плenoчный
Пропитывающая жидкость	трансформаторное масло
Рабочая напряженность электрического поля в диэлектрике секций, кВ/мм	58,8
Режим работы:	
– характер разряда	апериодический
– максимальный ток разряда, кА	5
– частота повторения разрядов, Гц	10
Средний ресурс, зарядов-разрядов	2·10 ⁹
Габаритные размеры по корпусу, мм:	455x156x326
Масса, кг	28
Удельная запасаемая энергия:	
– по объему, Дж/дм ³	10,8
– по массе, Дж/кг	8,93

Выводы. В результате выполненной работы были проведены исследования электрической прочности трех конструкций плenoчного диэлектрика на макетах секций высоковольтных импульсных конденсаторов. Ресурсные испытания проводились при различных величинах рабочей напряженности электрического поля. На основе этих исследований были созданы высоковольтные импульсные конденсаторы ИМП-6-200, ИМП-50-1, ИМП-10-5, которые имеют повышенные характеристики по сравнению с аналогичными конденсаторами, в конструкции которых применен бумажный и бумажно-плenoчный рабочие диэлектрики.

Список литературы: 1. General Atomics Energy Products. High Voltage Capacitors [Электронный ресурс]. – <http://www.gaep.com/capacitors.html>. 2. Ермилов И.В. Высоковольтные импульсные конденсаторы с полимерной изоляцией // Электричество. – 2006. – № 9. – С. 73-79. 3. Ермилов И.В. Современные импульсные высоковольтные конденсаторы с плenoчным диэлектриком // Электронные компоненты. – 2005. – № 4. – С. 47-55. 4. Рудаков В.В. Стан та тенденції розвитку высоковольтних імпульсних конденсаторів // Вісник НТУ «ХП»: зб. наук. пр.: Тем. вип.: Техніка і електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП». – 2009. – № 39. – С. 146-154. 5. Емельянов О.А. Электрические соотношения для оценки эффективности диэлектриков конденсаторов // Электричество. – 2007. – № 1. – С. 65-69. 6. Гребенников И.Ю., Гунько В.И., Дмитришин А.А., Онищенко Л.И., Швец И.С. О повышении удельных энергетических характеристик и ресурса высоковольтных импульсных конденсаторов // Электронная обработка материалов. – 2004. – № 5. – С. 70-73. 7. Гребенников И.Ю., Гунько В.И., Дмитришин А.А., Онищенко Л.И., Швец И.С. Оценка достигнутого уровня и перспективы создания высоковольтных импульсных конденсаторов для погружных электроразрядных комплексов // Электротехника. – 2007. – № 8. – С. 48-51. 8. Дмитришин А.А., Гунько В.И., Онищенко Л.И., Слепец Е.Н., Фецуц Т.А. Тенденции создания высоковольтных импульсных конденсаторов для технологической обработки различных сред // Материалы 6-й международной студенческой научно-исследовательской конференции «Перспектив-

ная техника и технологии-2010» (15-17 сентября 2010 г.). – Николаев: 2010. – С. 54-57. **9.** Гунько В.И., Дмитришин А.Я., Онищенко Л.И., Топоров С.О., Фецул Т.А. Исследования конструкций пленочного диэлектрика для высоковольтных импульсных конденсаторов // Электронная обработка материалов. – 2012. – № 2. – С. 93-96. **10.** Пат. 57999 Украина. МПК H01G 13/04 Способ пропитки электрических конденсаторов с пленочным диэлектриком / Гунько В.И., Гребенников И.Ю., Дмитришин А.Я., Онищенко Л.И., Топоров С.О.; заявитель и патентообладатель ИИПТ НАН Украины. – № U201010500; заявл. 30.08.10; опубл. 25.03.11, Бюл. № 6. – 4 с.

Поступила в редколлегию 01.10.2012

УДК 621.319.4

Разработка высоковольтных импульсных конденсаторов с пленочным диэлектриком / В.И.Гунько, А.Я.Дмитришин, Л.И.Онищенко, С.О.Топоров, И.А.Перекупка // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2012. – № 52 (958). – С. 65-71. – Бібліог.: 10 назв.

Проведено дослідження плівкового діелектрика на макетах секцій високовольтного імпульсного конденсатора. На основі цих досліджень розроблено три нових типи конденсаторів з плівковим діелектриком, які мають підвищений ресурс у порівнянні з аналогічними конденсаторами з паперовим та паперово-плівковим діелектриками.

Ключові слова: високовольтний імпульсний конденсатор, плівковий діелектрик, енергія, що запасастся, електрична міцність діелектрика, ресурс.

Researches of film dielectric on sections of high voltage pulse capacitors are carried out. Three new types of capacitors, which had higher life-time on comparison with analogical capacitors with paper and paper-film dielectrics, are developed on base of these researches.

Key words: high-voltage pulse capacitor, film dielectric, stored energy, dielectric strength, life-time of capacitor.