

П.О. ХАЧАТРЯН, Л.А. ВАРДАНЯН

**ИССЛЕДОВАНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ С КОМБИНИРОВАННЫМИ
ОБКЛАДКАМИ И ВОДЯНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ**

Исследуются секции конденсаторов с полипропиленовым диэлектриком и комбинированными обкладками, охлаждаемыми с помощью двух змеевиков, припаянных к торцу пакета секций. Показано, что в результате применения полипропиленового диэлектрика, обладающего малым тангенсом угла диэлектрических потерь, и водяного охлаждения с помощью двух змеевиков удается увеличить частоту конденсатора до 100 кГц и выше.

Ключевые слова: конденсатор, комбинированные обкладки, полипропиленовый диэлектрик, охлаждающие змеевики, частота, малые диэлектрические потери, высокая электрическая прочность, большой срок службы.

Введение. Создание быстродействующих тиристорных преобразователей с малыми временами восстановления свойств позволяет в настоящее время увеличить частоту коммутаций до 100 кГц и выше. Это стало возможным с помощью конденсаторов с комбинированными обкладками, охлаждаемыми с помощью двух змеевиков, при наличии полипропиленовой пленки (ПП). Применение комбинированных обкладок из фольги и двусторонней металлизированной бумаги позволяет сочетать все положительные качества бумажно-фольговых конденсаторов и двусторонней металлизированной бумаги, являющейся одновременно фитилем для качественной пропитки.

В настоящее время тиристорные преобразователи широко используются в электротранспорте, поэтому увеличение удельных характеристик конденсатора позволяет улучшить удельные параметры всего преобразователя.

Наряду с высокими параметрами к коммутирующим конденсаторам предъявляются особые требования по надежности, определяемые также спецификой их применения.

Для существующих конструкций, применяемых в конденсаторостроении, достигнутый уровень удельных характеристик явно не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к удельным параметрам коммутирующих конденсаторов, применяемых в электротранспорте. Поэтому необходимы более совершенные конструкции конденсаторов с применением наиболее качественных диэлектриков.

В настоящее время наиболее качественным диэлектриком, применяемым в конденсаторостроении, является ПП, обладающая высокой электрической прочностью и малым тангенсом угла диэлектрических потерь [1].

Результаты исследований секций конденсаторов с комбинированными обкладками и полипропиленовым диэлектриком при наличии двух охлаждаемых змеевиков дают возможность увеличить частоту конденсаторов до 100 кГц и выше [2].

Постановка задачи и обсуждение результатов исследования. Важнейшей характеристикой конденсатора, определяющей его качество, является прежде всего его электрическая прочность. Известно [3,4], что кратковременная электрическая прочность слоистой изоляции зависит от токопроводящих включений и краевого эффекта обкладок. Однако наличие свойства самовосстановления позволяет практически исключить влияние токопроводящих включений на кратковременную электрическую прочность конденсатора и применять однослойный диэлектрик минимально возможной толщины.

В настоящей работе исследуется поле у краев плоского конденсатора с учетом толщины обкладок и закругления углов на краях обкладок [5].

Термическая стабильность конструкции конденсатора при высокой удельной мощности обеспечивается как достижением малого угла потерь, так и улучшением внутренней теплопроводности при наличии двух охлаждающих змеевиков.

Условие оптимального выполнения высоковольтных конденсаторов заданной мощности в отношении минимального превышения напряженности электрического поля на краях обкладок путем разбивки на последовательно соединенные секции обеспечивается в данной конструкции схемным решением без дополнительных внешних соединений [6]. На рис.1 показан только случай для двух последовательно соединенных емкостей.

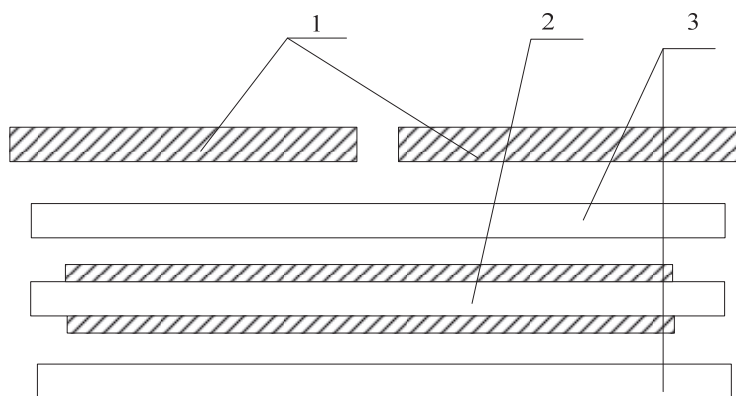


Рис.1. Схема намотки секции нового коммутационного конденсатора с комбинированными обкладками:

1 - фольговые обкладки, 2 - двухсторонняя металлизированная бумага, 3 – полипропиленовый диэлектрик

Как видно из приведенной схемы, в данной конструкции секций применены: комбинированные обкладки из фольги 1, двусторонняя металлизированная бумага 2 и однослойная ПП в качестве диэлектрика 3. Практически можно получить аналогичную схему для трех (рис.2), четырех, пяти и более последовательно соединенных емкостей. На рис.2 b_a - активная ширина, а Δb - закраина конденсатора.

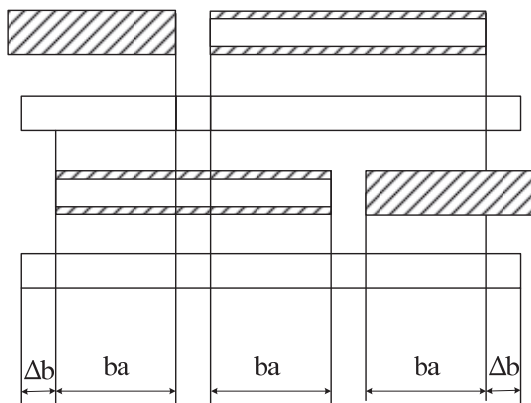


Рис.2. Схема для трех последовательно соединенных емкостей

Область плоского конденсатора с неоднородным полем у краев обкладок представляется схематически в виде, показанном на рис.3.

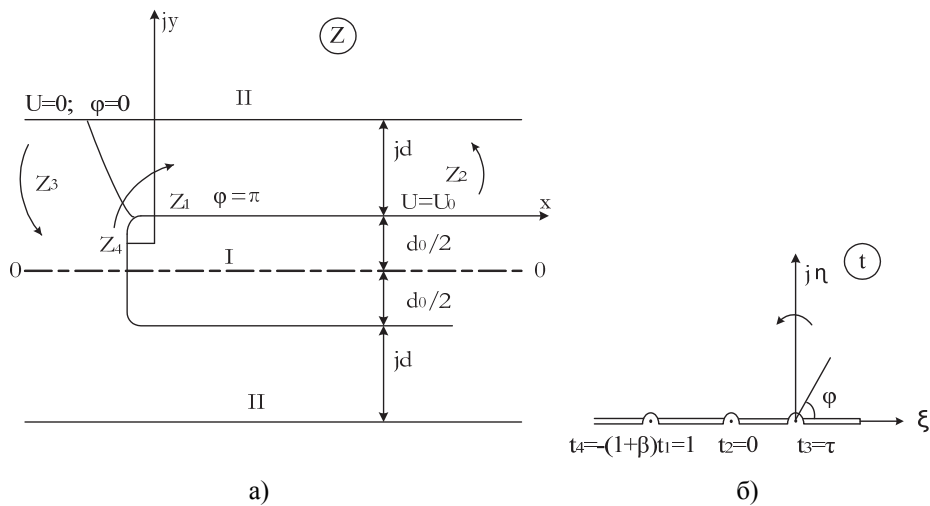


Рис.3. Схема к расчету поля у краев обкладок плоского конденсатора:
 а - область поля на плоскости Z , б - область поля на верхней полуплоскости t

Исследование электрического поля между обкладками (I) и (II) ввиду симметричности картины поля относительно силовой линии 0...0 (рис.3) решается путем конформных преобразований с применением уравнения Кристоффеля-Шварца:

$$\frac{E_Z}{E_0} = \sqrt{1 + \frac{1}{[a(d_0/2d+1)(1 \pm \gamma\sqrt{1+\beta(1-\gamma^2)}/a^2(d_0/2d+1)^2]/1-\gamma^2]^{-1}} \times \frac{1+\gamma\sqrt{1+\beta}}{\gamma\sqrt{\beta}}}, \quad (1)$$

где E_Z - напряженность на закругленном краю обкладки; $E_0 = U/d$ - рабочая напряженность поля в однородной области поля; d_0 - толщина обкладок; d - толщина диэлектрика, а a и γ определяются параметрами конденсатора.

Как видно из уравнения (1), отношение напряженностей зависит от отношения толщины обкладок к толщине диэлектрика $n = d_0/d$ и радиуса закругления кромок ρ , максимальное значение которого не может превышать $\rho_{max} = d_0/2$.

Полученное выражение (1) связывает напряженность поля на краю обкладки E_Z с напряженностью равномерной области E_0 для случая однородной среды (среда считается однородной, так как диэлектрические проницаемости полипропилена и кремнийорганической жидкости примерно равны).

Значения отношения напряженности электрического поля на закругленном краю обкладки к напряженности равномерной области в зависимости от параметров конденсатора рассчитывались с помощью специальной программы для $n = 0,01; 0,1; 1; 10$ и сравнивались с существующими эмпирическими выражениями, полученными в [3,7]. Результаты расчетов приведены в табл. 1-4, где также приведены значения, рассчитанные по [3,7].

Таблица 1

Отношение напряженности поля E_Z к напряженности равномерной области поля конденсатора при $n = 0,01$

β	τ	γ	$\frac{d_0}{2d}$	$\frac{1+\gamma\sqrt{1+\beta}}{\gamma\sqrt{\beta}}$	$\frac{E_Z}{E_0}$	$\sqrt{\frac{d}{\pi\rho}}$ [3]
0,01	0,010	0,965	0,00000	20,400	202,60	-
0,10	0,011	0,960	0,00003	6,600	63,25	90,00
0,50	0,012	0,850	0,00023	3,390	30,40	33,80
1,00	0,014	0,750	0,00061	2,730	23,12	22,70
5,00	0,0188	0,480	0,00211	2,016	14,80	12,30
10,00	0,020	0,377	0,00280	1,880	13,34	10,60
40,00	0,023	0,213	0,00396	1,750	11,55	8,95
100,00	0,024	0,142	0,00434	1,700	11,00	8,50
400,00	0,025	0,070	0,00482	1,670	10,52	8,10

Таблица 2

Отношение напряженности поля E_Z к напряженности равномерной области поля конденсатора при $n = 0,1$

β	τ	γ	$\frac{d_0}{2d}$	$\frac{1 + \gamma\sqrt{1 + \beta}}{\gamma\sqrt{\beta}}$	$\frac{E_Z}{E_0}$	$1,4 \sqrt[3]{\frac{2+n}{n}}$
0,01	0,103	0,998	0,00001	20,00	65,00	65,00
0,10	0,107	0,960	0,00029	6,59	21,00	21,15
0,50	0,124	0,856	0,00253	3,38	10,00	10,20
1,00	0,139	0,767	0,00554	2,70	7,70	7,90
5,00	0,190	0,498	0,01970	1,99	4,90	5,20
10,00	0,210	0,390	0,02690	1,85	4,40	4,70
40,00	0,248	0,220	0,03800	1,72	3,85	4,20
100,00	0,260	0,149	0,04200	1,67	3,67	4,06
400,00	0,273	0,078	0,04600	1,63	3,53	3,90

Таблица 3

Отношение напряженности поля E_Z к напряженности равномерной области поля конденсатора при $n = 1$

β	τ	γ	$\frac{d_0}{2d}$	$\frac{1 + \gamma\sqrt{1 + \beta}}{\gamma\sqrt{\beta}}$	$\frac{E_Z}{E_0}$	$\sqrt[3]{\frac{2+n}{n}}$ [7]
0,01	1,25	0,994	0,00006	20,00	26,90	25,50
0,10	1,31	0,972	0,00173	6,56	8,67	8,34
0,50	1,52	0,889	0,01517	3,32	4,27	4,05
1,00	1,737	0,817	0,03367	2,63	3,30	3,23
5,00	2,70	0,588	0,13183	1,85	2,17	1,97
10,00	3,30	0,485	0,19311	1,70	1,93	1,73
40,00	4,64	0,307	0,31403	1,52	1,68	1,47
100,00	5,40	0,217	0,37604	1,46	1,59	1,39
400,00	6,28	0,120	1,43668	1,42	1,52	1,32

Таблица 4

Отношение напряженности поля E_Z к напряженности равномерной области поля конденсатора при $n = 10$

β	τ	γ	$\frac{d_0}{2d}$	$\frac{1 + \gamma\sqrt{1 + \beta}}{\gamma\sqrt{\beta}}$	$\frac{E_Z}{E_0}$	$\sqrt[3]{\frac{2+n}{n}}$ [7]
0,01	35,10	0,985	0,00010	20,19	20,48	21,54
0,10	36,70	0,980	0,00304	6,54	6,63	6,95
0,50	42,93	0,920	0,02663	3,269	3,30	3,55
1,00	49,70	0,867	0,05950	2,560	2,59	2,60
5,00	88,00	0,694	0,24650	1,73	1,74	1,72
10,00	122,00	0,615	0,38034	1,56	1,56	1,53
40,00	257,00	0,0477	0,72350	1,34	1,34	1,33
100,00	439,00	0,404	0,98800	1,25	1,25	1,26
400,00	1029,00	0,317	1,417	1,15	1,15	1,19

Как видно из таблиц, результаты полученных аналитических расчетов хорошо согласуются с результатами расчетов существующих эмпирических выражений.

Данные, приведенные в табл. 1-4, показывают, что при изменении отношения d_0/d на три порядка ($n = 0,01 \dots 10$) выражение $1 + \gamma\sqrt{1 + \beta}/\gamma\sqrt{\beta}$ практически не изменяется, поэтому при исследовании оптимальности d_0/d из условия обеспечения максимальной удельной мощности конденсатора влиянием этого выражения в формуле (1) можно пренебречь.

Не допуская погрешности более 0,3%, для практических значений отношения $d_0/d = 1$ можно упростить выражение (1), представив его в следующем виде:

$$E_Z = E_0 \sqrt{\frac{1+4}{n^2+4n}} \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{n+2}{n}\right)}, \quad (2)$$

где $n = d_0/d$ - отношение толщины обкладок к толщине диэлектрика.

Определяя значение отношения выражения удельной реактивной мощности конденсатора и выражая значение емкости и активного объема через геометрические параметры, для намотанных конденсаторов получим

$$q = \frac{U^2 \omega C}{V} = \frac{8,85 E_0^2 \omega \varepsilon}{1+d_0/d} = \frac{8,85 E_0^2 \omega \varepsilon}{1+n}, \quad (3)$$

где V - объем конденсатора.

Подставляя значение E_0 из (2) в (3), получим

$$q = \frac{8,85 E_Z^2 \omega \varepsilon}{(1+n)(1+4/n^2+4n) \sqrt[3]{1+(d/\rho)^2}} = \frac{A E_Z^2}{(1+n)(1+4/n^2+4n) \cdot \sqrt[3]{(2+n/n)^2}}, \quad (4)$$

где ω - угловая частота; ε - диэлектрическая проницаемость; а A – постоянная, равная

$$A = 8,85 \omega \varepsilon.$$

Исходя из технологических соображений и учитывая оптимальное значение q , отношение толщины обкладок к толщине диэлектрика принимается равным 1,5 (рис.4).

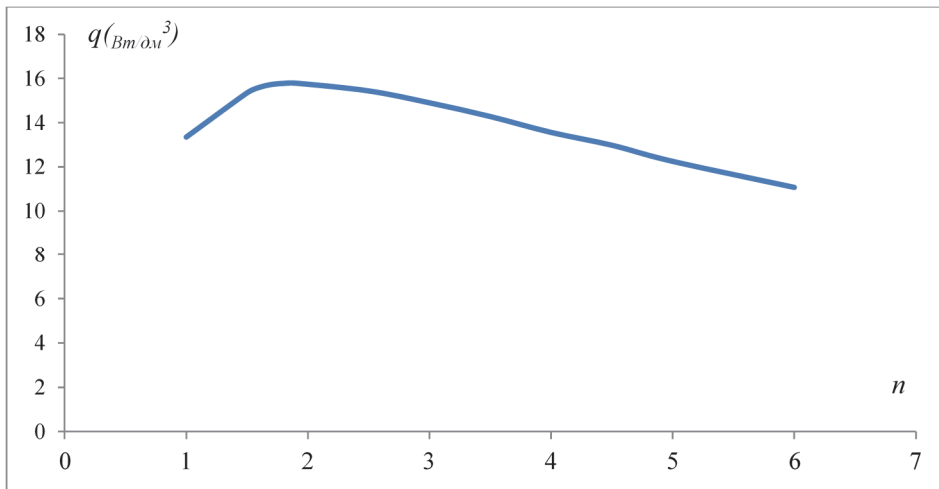


Рис.4. Зависимость q от отношения $n = d_0/d$

Таким образом, в результате проведенных теоретических исследований электрического поля между обкладками конденсатора, имеющего определенную толщину обкладок и закругления краев, получено новое выражение, позволяющее рассчитать и оптимально проектировать конденсаторы с минимальным превышением напряженности поля у краев обкладок.

Показано, что как прямое следствие этой закономерности, при минимальном заданном превышении напряженности у краев обкладок конденсатора с отношением $d_0/d = 1,5$ получается максимальная удельная мощность.

Выводы

1. Полученные общие аналитические выражения хорошо согласуются с существующими в литературе эмпирическими выражениями для расчета превышения напряженности поля на краю обкладки.
2. Однослойный диэлектрик с минимально возможной толщиной можно применять благодаря свойству самовосстановления конденсатора.
3. Применение ПП минимально возможной толщины позволяет резко увеличить удельные параметры конденсатора с комбинированными обкладками.
4. Применение комбинированных обкладок и ПП при наличии двух охлаждающих змеевиков дает возможность увеличить частоту конденсатора до 100 кГц и выше.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. “Dielectrics” каталог фирмы “BOLLORÉ TECHNOLOGIES”, 2006.
2. Արտոնագիր №3224A. Ջրային հովացումով կոնդենսատոր / **Լ.Ա. Վարդանյան, Ս.Զ. Բաղդասարյան, Պ.Հ. Խաչատրյան, Է.Վ. Կուրդիյան**. - Հրատարակված է 01.10.2018թ.
3. **Кучинский Г.С.** Высоковольтные импульсные конденсаторы.- М.: Энергия, 1973.- 176 с.
4. **Бабаджанян А.С., Хачатрян П.О., Кургиян Э.В., Мартикян Э.Х.** Конденсаторы для высокочастотной силовой электроники // Вестник ГИУА: Сборник научных и методических статей.- 2010.- Т.2, №1.- С. 133-137.
5. **Хачатрян П.О., Акопян В.А., Сараджев В.А., Чатинян Ю.С.** Исследование электрического поля на краю обкладки с учетом ее толщины и закругления кромки // Межвуз. сб. науч. тр. Сер. XIII “Электротехника”.- Ереван, 1976.- Вып. 3.- С. 176-191.
6. **Хачатрян П.О., Кургиян Э.В., Варданян Л.А.** Новая конструкция секции самовосстанавливающегося конденсатора // Вестник НПУА: Сб. научн. ст.- Ереван, 2017.- Часть 1.- С. 56-66.
7. Техника высоких напряжений / Под ред. **М.В. Костенко**.- М.: Высш. школа, 1973.- 528 с.

Национальный политехнический университет Армении. Материал поступил в редакцию 10.10.2018.

Պ.Հ. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ, Լ.Ա. ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ

ԿՈՍՄՔԻՆԱՑՎԱԾ ՇՐՋԱՊԻՐՆԵՐՈՎ ԵՎ ՋՐԱՅԻՆ ՀՈՎԱՑՈՒՄՈՎ ԿՈՆԴԵՆՍԱՏՈՐՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ

Ուսումնասիրվում են պոլիպրոպիլենային դիէլեկտրիկով և կոմբինացված շրջադիրներով սեկցիաներ, որոնք հովացվում են երկու գալարախողովակի միջոցով՝ զոդված սեկցիայի փաթեթին ճակատային մասերում: Փոքր դիէլեկտրիկական կորուստների անկյան տանգենսով պոլիպրոպիլենային դիէլեկտրիկի և երկու գալարախողովակի միջոցով ջրային հովացման կիրառման դեպքում հաջողվում է կոնդենսատորի հաճախությունը մեծացնել մինչև 100 կՀց և ավելի:

Առանցքային բառեր. կոնդենսատոր, կոմբինացված շրջադիրներ, պոլիպրոպիլենային դիէլեկտրիկ, հովացնող գալարախողովակներ, հաճախություն, փոքր դիէլեկտրիկական կորուստներ, բարձր էլեկտրական ամրություն, երկարատև ծառայության ժամկետ:

P.H. KHACHATRYAN, L.A. VARDANYAN

**INVESTIGATION OF CAPACITORS WITH COMBINED COATINGS
AND WATER COOLING**

The sections of capacitors with a polypropylene dielectric and combined coatings cooled with two coils soldered to the package section are studied. It is shown that by using a polypropylene dielectric with a small tangent of the dielectric loss angle and water cooling by means of two coils, it is possible to increase the frequency of the capacitor to about 100 *kHz* and higher.

Keywords: capacitor, combined coatings, polypropylene dielectric, cooling coils, frequency, low dielectric losses, high electric strength, large service life.