

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ СЕКЦИЙ КОНДЕНСАТОРОВ С БУМАЖНО-КАСТОРОВОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

Дубийчук О.Ю., Рудаков В.В., д.т.н., проф.
НИПКИ "Молния" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт"
Украина, 61013, Харьков, ул. Шевченко 47,
тел.(057) 707-62-89, факс (057) 707-61-33, E-mail:valrudakov@kpi.kharkov.ua

Приведені результати ресурсних випробувань секцій високовольтних імпульсних конденсаторів з паперово-касторовим діелектриком. Визначені залежності середнього ресурсу і середнього квадратичного відхилення для нормально-логірифічного розподілу відмов від товщини діелектрика.

Приведены результаты ресурсных испытаний секций высоковольтных импульсных конденсаторов с бумажно-касторовым диэлектриком. Определены зависимости среднего ресурса и среднего квадратического отклонения для нормально-логарифмического распределения отказов от толщины диэлектрика.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Высоковольтные импульсные конденсаторы с бумажно-касторовой изоляцией достаточно широко применяются в высоковольтной импульсной технике [1, 2]. Причем, при сроках службы $2 \cdot 10^4$ и более циклов заряд-разряд они не уступают бумажно-пленочным конденсаторам, а при больших сроках службы их преимущество становится более очевидным [3]. Поэтому определение надежности высоковольтных импульсных конденсаторов с бумажно-касторовой изоляцией и большим сроком службы (как правило, это конденсаторы для технологических установок) является актуальной задачей. Известно [4, 5], что закон распределения отказов секций импульсных конденсаторов описывается или законом Вейбулла или нормально-логарифмическим. Выберем в качестве показателей надежности математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение нормально-логарифмического закона распределения $\sigma_{lg M}$. Определяющим показателем является математическое ожидание $(lg M)_c$, где M - ресурс в циклах заряд-разряд. Известно [1,4,6,7], что при больших значениях ресурса

$$(lg M)_c = n \cdot lg E, \quad (1)$$

где E – напряженность электрического поля между обкладками, $n = 5 \div 8$.

При этом разрушение диэлектрика наиболее интенсивно развивается у края обкладок. А число слоев бумажного диэлектрика между обкладками выбирают не менее 4, поскольку наибольшая кратковременная электрическая прочность соответствует числу слоев 5-7. При меньшем числе слоев увеличивается вероятность совпадения слабых мест и электрическая прочность уменьшается. Причем, чем меньше толщина листа бумаги, тем больше число токопроводящих включений (слабых мест) на единицу площади листа бумаги [8]. При большем числе слоев бумаги электрическая прочность падает из-за краевых эффектов. На основании этих соображений сложилась практика выбора числа слоев 6-8 для большинства конструкций конденсаторов. Редкие исследования зависимости ресурса для большей толщины диэлектрика [9], показали, что ресурс уменьшается, однако не в такой сильной степени, как ожидалось теоретически. Этот эффект связан с увеличением числа слоев диэлектрика между обкладками с увеличением расстояния между обкладками (существенное влияние барьерного эффекта). Казалось бы, что увеличение толщины диэлектрика между обкладками не является путем по-

вышения надежности конденсатора. Однако, для высоковольтных конденсаторов на напряжение более 10кВ характерны схемы с последовательно соединенными внутри группами секций. При этом при технологическом допуске на емкость секций до 20% конструкции с более толстым диэлектриком между обкладками могут оказаться более надежными [10]. Для оценки надежности конденсаторов с последовательным соединением секций необходимо знать не только среднее математическое ожидание по ресурсу, но и среднее квадратическое отклонение в зависимости от толщины диэлектрика. Поскольку такие данные отсутствуют, а имеются только зависимости среднего квадратического отклонения от напряженности электрического поля, например, для конкретной толщины диэлектрика 80 мкм [11], то в данной работе сделана попытка восполнить этот пробел.

Целью настоящей работы является экспериментальное определение показателей надежности секций импульсных конденсаторов в герметичном и негерметичном корпусах с бумажно-касторовой изоляцией в зависимости от толщины изоляции в диапазоне от 32 мкм до 120 мкм.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

1. Герметичные секции. Оценка показателей надежности герметичных секций проведена по результатам записей в рабочем журнале. Значения ресурсов герметичных секций приведены в работе [12], а итоговые выводы опубликованы в работе [9].

Секции плоско-пластинчатого типа, запрессованные под одним давлением, имели один общий вывод, размещались в металлическом бачке с изоляционной крышкой, через которую были выведены герметично вывода от каждой секции и один общий вывод. Секции прошли термовакуумную обработку и пропитаны касторовым маслом в вакууме. В качестве диэлектрика применена конденсаторная бумага КОН-2 с толщиной листа 8 и 9 мкм, обкладки выполнены из алюминиевой фольги толщиной 11 мкм.

Испытания проводились в режиме: частота следования управляемых импульсов – 3 Гц, испытательная напряженность электрического поля 140кВ/мм, частота разрядного тока 100 кГц, декремент колебаний 1,38. Напряжение на секциях контролировалось киловольтметром С196 и омическим делителем напряжения с осциллографом С8-13. В табл. 1 приведены результаты ресурсных испытаний, на основании которых определены показатели надежности.

Таблица 1

Значения $\lg M$ и $\sigma_{\lg M}$ для герметичных секций

№ п/п	Толщина изоляции, мкм				
	32	40	54	64	72
1	4,448	4,577	4,273	4,513	4,386
2	4,751	4,702	4,278	4,549	4,34
3	4,754	4,79	4,322	4,577	4,352
4	4,754	4,85	4,369	4,594	4,422
5	4,789	4,905	4,411	4,662	4,364
6	4,829	4,967	4,51	4,684	4,44
7	4,86	5,016	4,607	-	4,3
8	4,912	5,073	4,659	-	4,542
9	4,943	5,076	-	-	-
10	4,975	-	-	-	-
11	5	-	-	-	-
12	5,026	-	-	-	-
13	5,056	-	-	-	-
14	5,058	-	-	-	-
15	5,067	-	-	-	-
16	5,246	-	-	-	-
$(\lg M)_{ср}$	4,904	4,884	4,429	4,596	4,393
$\sigma_{\lg M}$	0,186	0,171	0,148	0,066	0,078

Разное число секций в эксперименте обусловлено условиями проведения эксперимента. В табл. 2 приведены значения емкости секций и число листов бумаги между обкладками для соответствующих толщин диэлектрика.

Таблица 2

Толщина диэлектрика, мкм	Среднее значение емкости, нФ	Число слоев диэлектрика
32	12.2	4
40	10.8	5
54	7.4	6
64	6.9	8
72	6.3	8

На рис. 1 представлена экспериментальная зависимость среднего ресурса в логарифмическом масштабе от толщины диэлектрика (кривая 1) и расчетно-экспериментальная зависимость (кривая 2), полученная путем введения расчетной поправки на число слоев диэлектрика к экспериментальной зависимости. Эта поправка основывается на экспериментальной зависимости ресурса M от числа слоев N [3], имеющей вид $M \sim N$. Для кривой 2 принято $N = 4$. Т.е. например, для толщины 72 мкм расчетно-экспериментальный средний ресурс составит $M = 10^{4,393} / 2 = 12359 \cdot (N_{72} / N_{32} = 8/4 = 2)$. Полагая, что зависимость ресурса от толщины диэлектрика имеет вид степенной функции

$$\lg M \sim -m(\lg d), \quad (2)$$

где d в мкм, определим значения m_1 для кривой 1 и m_2 для кривой 2 с учетом того, что вид выражение (2) соответствует линейной зависимости. Кривые 1 и 2 заменены линейными функциями (прямые 1* и 2*), построенными методом наименьших квадратов.

Значения m определены по формуле (2) и равны соответственно для прямой 1* $m_1 = 1,5$, а для прямой 2* $m_2 = 2,4$. На рис. 2 представлены зависимости среднего квадратического отклонения (кривая 1) и коэффициента вариации k , равного отношению среднего квадратического отклонения к математическому ожиданию $k = \sigma_{\lg M} / (\lg M)_{ср}$ (кривая 2), соответ-

ствующие данным табл. 1. Анализ кривых показывает (рис. 2), что среднее квадратическое отклонение и коэффициент вариации имеют минимум при толщине диэлектрика 64 мкм.

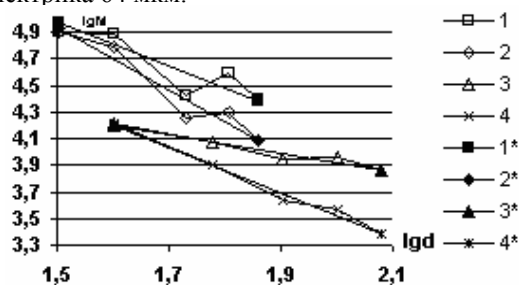


Рис. 1. Экспериментальные зависимости $(\lg M)_{ср}$ от толщины диэлектрика $\lg d$ для герметичных (1) и негерметичных (3) секций и приведенные к постоянному числу слоев диэлектрика (2) и (4) при $N=4$

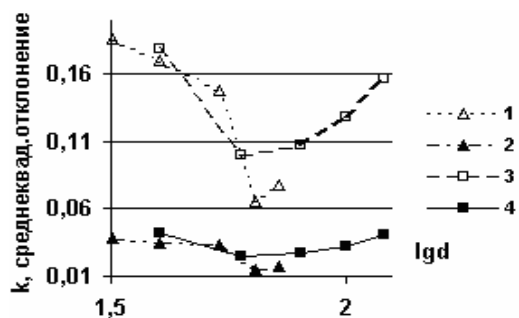


Рис. 2. Зависимости среднего квадратического отклонения $\sigma_{\lg M}$ для герметичных (1) и негерметичных (3) секций и коэффициента вариации k от толщины диэлектрика

2. *Негерметичные секции.* В конструктивном плане негерметичные секции отличались от герметичных толщиной одного листа диэлектрика, которая составила 10 мкм, и толщиной фольги 9 мкм.

Кроме того, общая толщина диэлектрика секций составила 40, 60, 80, 100 и 120 мкм. Верхняя часть бака, в котором испытывались секции, была открыта для доступа атмосферного воздуха помещения. Также увеличено число испытываемых секций до 20 штук для каждой толщины диэлектрика. Испытания проводились в режиме: частота следования управляемых импульсов – 2 Гц, испытательная напряженность электрического поля 130 кВ/мм, частота разрядного тока 125 кГц, декремент колебаний 1,38. Для однородности проведения опытов секции испытывались поочередно для каждой толщины по 5 штук в каждой партии. Результаты ресурсных испытаний приведены в таблице 3, а зависимости ресурса от толщины диэлектрика (кривые 3, 4, и 3*, 4*), приведены на рис. 1. Соответственно на рис. 2 представлены зависимости среднего квадратического отклонения и коэффициента вариации (кривые 3, 4). Здесь также наблюдается минимум среднего квадратического отклонения и коэффициента вариации при толщине 60 мкм.

Значения m в выражении (2) для негерметичных секций определены для линейных аппроксимаций кривых 3 и 4 и равны соответственно для прямой 3* $m_1 = 0,72$, а для прямой 4* $m_2 = 1,72$.

В таблице 4 приведены средние значения емкости испытываемых секций и число слоев диэлектрика. Площадь обкладок одинакова.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Зависимость среднего ресурса от толщины диэлектрика. В диапазоне изменения толщины диэлектрика 32-64 мкм среднее квадратическое отклонение существенно уменьшается при увеличении толщины диэлектрика как для герметичных так и для негерметичных секций (рис. 2). Физически это связано с уменьшением вероятности совпадения слабых мест слабых из-за увеличения числа слоев диэлектрика между обкладками и уменьшением разброса по ресурсу. При увеличении толщины диэлектрика свыше 64 мкм среднее квадратическое отклонение снова возрастает.

Таблица 3

Значения $I_g M$ и $\sigma_{I_g M}$ для негерметичных секций

№ п/п	Толщина изоляции, мкм				
	40	60	80	100	120
1	3,692	3,795	3,67	3,636	3,526
2	3,835	3,918	3,702	3,742	3,611
3	4,043	3,982	3,857	3,827	3,647
4	4,1	3,982	3,871	3,843	3,659
5	4,131	3,998	3,905	3,857	3,719
6	4,193	4,057	3,905	3,865	3,76
7	4,2	4,062	3,954	3,93	3,82
8	4,213	4,066	3,954	3,948	3,85
9	4,258	4,075	3,96	3,966	3,879
10	4,283	4,079	3,96	3,971	3,885
11	4,289	4,1	3,966	3,993	3,899
12	4,289	4,1	3,982	4,019	3,924
13	4,294	4,109	3,982	4,024	3,943
14	4,317	4,136	3,982	4,048	3,96
15	4,325	4,14	3,993	4,048	3,964
16	4,337	4,14	3,998	4,052	3,966
17	4,339	4,173	4,019	4,075	3,982
18	4,356	4,176	4,052	4,079	4,05
19	4,36	4,189	4,057	4,113	4,054
20	4,363	4,193	4,105	4,121	4,066
$(I_g M)_c$	4,211	4,074	3,944	3,958	3,858
$\sigma_{I_g M}$	0,179	0,1	0,107	0,129	0,157

Здесь преобладающим физическим эффектом является так называемый "краевой эффект", приводящий при равных значениях средней напряженности электрического поля к увеличению размеров "напряженного объема" на краях обкладок [11].

Таблица 4

Толщина диэлектрика, мкм	Среднее значение емкости, нФ	Число слоев диэлектрика
40	39,7	4
60	26,21	6
80	19,7	8
100	16,42	10
120	11,95	12

В результате увеличивается роль случайных факторов и вероятность разброса по ресурсу увеличивается. Значение показателя степени m для герметичных секций определено практически для падающего участка среднего квадратического отклонения, а для негерметичных секций во всем диапазоне толщины диэлектрика, т.е. для падающего и нарастающего участков. Имеет смысл определить m отдельно для каждого из участков. Необходимые вычисления дают значение показателя степени $m=1,87$ для падающего участка среднего квадратического отклонения. Для нарастающего участка значение показателя степени практически не отличается от m , определенного для всего диапазо-

на толщин диэлектрика - $m=1,72$. Учитывая, что для герметичных секций число опытов не превышает 10 в большинстве опытов, а для негерметичных - 20, то целесообразно в качестве усредненного значения принять $m=2,14$ при толщине диэлектрика менее 80 мкм и $m=1,41$ при толщине диэлектрика более 80 мкм.

Если минимальное значение толщины диэлектрика ограничено приемлемым количеством листов бумаги (практически $N_{\min}=4$), то верхнее значение толщины диэлектрика ограничено кратковременной электрической прочностью, обусловленной краевым эффектом [13]. Так, если электрическая прочность бумажно-касторовой изоляции толщиной 100 мкм из 10 листов бумаги составляет 200 кВ/мм, а толщиной 190 мкм - 156 кВ/мм, т.е. уменьшается пропорционально $d^{0,5}$ [13], то для практически приемлемого значения электрической прочности 130 кВ/мм максимальная толщина диэлектрика составит 240 мкм. При коэффициенте запаса 1,5 возможный максимальный рабочий градиент при толщине 240 мкм может составить 85 кВ/мм. При этом ресурс не превысит 1000 циклов заряд-разряд.

Таким образом, ресурс секций с бумажно-касторовым диэлектриком имеет следующую зависимость от толщины диэлектрика при условии постоянства числа слоев диэлектрика между обкладками ($N=const$)

$$M \sim d^{-m}, \quad (3)$$

где $m=2,14$ при $d < 80$ мкм, $m=1,41$ при $240 > d \geq 80$ мкм. Использование толщины диэлектрика больше 240 мкм в практическом плане нецелесообразно из-за низкой электрической прочности. Кроме того, при больших значениях d необходимо учитывать увеличение длины закраины вдоль поверхности диэлектрика у края обкладок, что в конечном итоге может привести к некоторому уменьшению удельной энергии. Полученные результаты позволяют скорректировать рекомендации по выбору схемы соединения секций внутри конденсаторов, изложенные в работе [10].

Оценка среднего квадратического отклонения. Рассмотрим характер поведения коэффициента вариации в зависимости от числа испытываемых негерметичных образцов по мере фактического набора ими ресурса, т.е. в хронологическом порядке поступления информации. На рис. 3 приведены зависимости коэффициента вариации от числа испытываемых секций. Анализ кривых показывает, что количество секций до 10 штук недостаточно, чтобы достоверно судить об установившемся значении коэффициента вариации (практически среднего квадратического отклонения) при увеличении числа секций. Поэтому в качестве более достоверных значений среднего квадратического отклонения и коэффициента вариации следует использовать данные для негерметичных секций.

Нетрудно заметить, что минимальное значение среднего квадратического отклонения составляет $\sim 0,1$ для толщины диэлектрика 60-80 мкм при испытательном градиенте 130 кВ/мм и, вероятно, не может быть меньше (рис.2). Близкое минимальное значение среднего квадратического отклонения получено в работе [14] для плоско-пластинчатых секций $\sigma_{I_g M} = 0,128$, но для числа образцов менее 10. В работе [12] при испытании секций большой емкости 13 мкФ при испытательной напряженности поля 114 кВ/мм и толщине диэлектрика 70 мкм из семи листов

бумаги КОН-3М получено значение $\sigma_{lgM} = 0,0995$ для числа секций, равном 13. Таким образом, для толщины диэлектрика 60-68 мкм при напряженности электрического поля менее 130 кВ/мм значение σ_{lgM} постоянно и составляет 0,1.

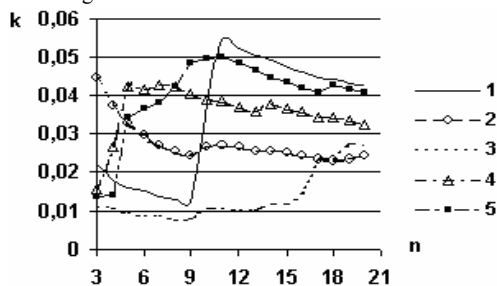


Рис. 3. Зависимости коэффициента вариации k от числа испытываемых негерметичных секций. 1- $d=40$ мкм, 2- $d=60$ мкм, 3- $d=80$ мкм, 4- $d=100$ мкм, 5- $d=120$ мкм

Анализ поведения зависимости σ_{lgM} от d показывает (рис. 2), что с уменьшением толщины диэлектрика при $d < 60$ мкм $\sigma_{lgM} \sim (60/d)^{1,5}$, а при $d > 80$ мкм $\sigma_{lgM} \sim (d/80)$ при условии, что $E=130$ кВ/мм.

Как изменяется σ_{lgM} от напряженности электрического поля? На рис. 4 приведена зависимость среднего квадратического отклонения от напряженности электрического поля, построенная по результатам работы [4]. В работе [4] приведены функции распределения по ресурсу плоско-мотанных секций с толщиной диэлектрика 80 мкм из 8 слоев бумаги КОН-2, пропитанной касторовым маслом при напряженностях поля 80,100,125,140,160 и 180 кВ/мм. Режим испытаний: частота следования импульсов – не более 1 Гц, частота разрядного тока 125 кГц, декремент колебаний 1,38. Число испытываемых образцов – не менее 20 для каждого значения напряженности электрического поля.

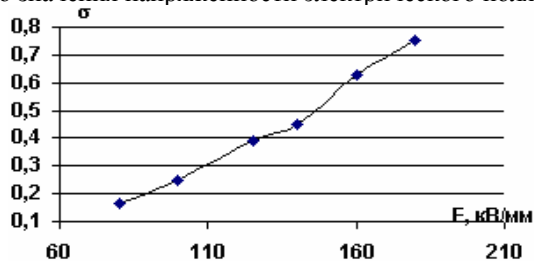


Рис. 4. Зависимость среднего квадратического отклонения (нормально-логарифмический закон распределения) от напряженности поля, построенная на основании результатов работы [4]

Значения σ_{lgM} отличаются в 3–4 раза по сравнению с полученными в данной работе результатами. Так, например, для напряженности электрического поля 125 кВ/мм $\sigma_{lgM} = 0,388$, а для плоскопластинчатых секций при напряженности электрического поля 130 кВ/мм $\sigma_{lgM} = 0,107$ (табл. 3) для такой же толщины диэлектрика 80 мкм.

Столь существенное отличие вызвано, в большей степени, наличием в плоско-мотанных секциях вкладных выводов. Доказательство этого факта находим в работе [12]. Наряду с испытаниями плоскопластинчатых секций большой емкости в работе [12]

проведены испытания плоско-мотанных секций с вкладными выводами. Секции обеих конструкций прошли одинаковый цикл сушки и пропитки. В результате испытаний средний ресурс секций отличался незначительно (~21000 и ~22000 импульсов), а среднее квадратическое отклонение плоско-мотанных секций в 3,36 раза превысило среднее квадратическое отклонение плоско-пластинчатых. При анализе мест пробоев, обнаружено, что около 30% разрушения изоляции плоско-мотанных секций произошло в местах расположения вкладных выводов.

Если абсолютные значения среднеквадратичных отклонения обеих типов секций отличаются существенно, то характер поведения зависимости σ_{lgM} от напряженности электрического поля не должен существенно отличаться. Анализ поведения зависимости показывает (рис. 4), что $\sigma_{lgM} \sim E^2$ при $d = 80$ мкм. Такой же характер зависимости σ_{lgM} от E будет наблюдаться при применении плоско-пластинчатых секций, но с меньшими абсолютными значениями среднего квадратического отклонения.

Характер поведения σ_{lgM} от E и от d имеет одну и ту же физическую природу и обусловлен краевыми эффектами. Известно, что напряженность электрического поля в равноудаленных от края обкладок точках пропорциональна \sqrt{d} [4, 11]. Если разрушение диэлектрика происходит на краях обкладок, то такие зависимости должны проявляться. Поэтому, если $\sigma_{lgM} \sim E^2$, то σ_{lgM} должно быть прямо пропорционально d , что и наблюдается при анализе результатов при $d > 80$ мкм (рис. 2).

На основании приведенных рассуждений построим зависимости среднего квадратического отклонения от толщины диэлектрика при $80 < d < 240$ мкм для различных уровней напряженности электрического поля (рис. 5).

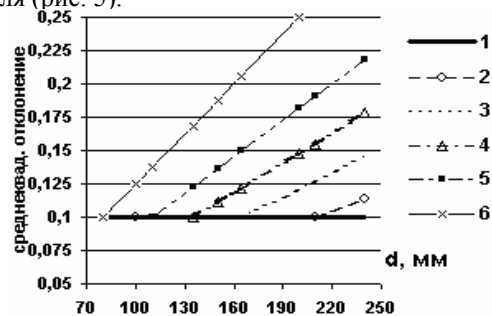


Рис. 5. Расчетно-экспериментальные зависимости σ_{lgM} от толщины диэлектрика: 1- $E=75$ кВ/мм, 2- 80 кВ/мм, 3- 90 кВ/мм, 4- 100 кВ/мм, 5 – 110 кВ/мм, 6 – 130 кВ/мм

В случае, когда $d < 60$ мкм, примем в первом приближении, что среднее квадратическое отклонение не зависит от напряженности электрического поля, поскольку разброс по ресурсу определяется числом токопроводящих включений в слое бумаги и вероятностью их совпадения при малом числе слоев. Левую ветвь кривой σ_{lgM} при $d < 60$ мкм (рис. 2) можно аппроксимировать следующим выражением

$$\sigma_{lgM} = 0,1 \cdot (60/d)^{1,5}, \quad (4)$$

где d в мкм.

Таким образом, полученные результаты позволяют уточнить полученные в работе [10] формулы для оценки ресурса конденсаторов с последовательно соединенными секциями с учетом технологического разброса по емкости.

Формула по определению отношения средних ресурсов двух конденсаторов с различными последовательной схемой включения и толщиной диэлектрика, приведенная в работе [10], уточняется при $d < 80$ мкм путем изменения показателя степени при сомножителе, представляющем отношение толщин диэлектрика,

$$\frac{M_1}{M_2} = \left(\frac{\eta_2}{\eta_1} \right)^{6,5} \cdot \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^{2,14} \cdot \left(\frac{N_1}{N_2} \right) \cdot \left(\frac{1+\gamma_2}{1+\gamma_1} \right)^{3,25}, \quad (5)$$

где $\eta = \frac{n \cdot (1 + 0,01 \cdot k_1)}{(n-1) \cdot (1 - 0,01 \cdot k_2) + 1 + 0,01 \cdot k_1}$ - коэффициент, показывающий во сколько раз напряжение на секции с минимальным значением емкости превышает номинальное; k_1 - превышение (положительный допуск) значения ёмкости каждой из $(n-1)$ последовательно включенных и равных между собой емкостей секций конденсатора относительно номинального значения, (%); k_2 - занижение (отрицательный допуск) номинального значения ёмкости n -й секции, (%); $M_1, M_2, d_1, d_2, \gamma_1, \gamma_2, N_1, N_2$ - соответственно ресурс, толщина диэлектрика, отношение толщины обкладки к толщине диэлектрика, число слоев бумаги между обкладками 1-го и 2-го конденсаторов.

При этом среднее квадратическое отклонение по ресурсу нормально-логарифмического закона распределения будет определяться по формуле (4) при $d \leq 60$ мкм, а при $60 < d < 80$ мкм $\sigma_{lg M} = 0,1$.

Для $d \geq 80$ мкм выражение (5) будет иметь вид

$$\frac{M_1}{M_2} = \left(\frac{\eta_2}{\eta_1} \right)^{6,5} \cdot \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^{1,72} \cdot \left(\frac{N_1}{N_2} \right) \cdot \left(\frac{1+\gamma_2}{1+\gamma_1} \right)^{3,25}, \quad (6)$$

а среднее квадратическое отклонение определяется в зависимости от напряженности электрического поля и толщины диэлектрика по рис. 5.

Следует отметить, что если вычисленные значения M_1/M_2 будут меньше единицы при $d_2 < d_1$, то необходимо провести дополнительную проверку с учетом того, что в формулах (5) и (6) при расчете m не учтено различие в величине запасаемой энергии испытанных секций. Рассмотрение вариантов выбора оптимальной конструкции конденсатора с использованием полученных формул с учетом экспериментально определенных показателей надежности является предметом отдельной статьи.

ВЫВОДЫ

1. Уточнены значения показателя степени в формуле степенной зависимости ресурса от толщины диэлектрика. При толщине диэлектрика менее 80 мкм показатель степени равен $m = 2,14$ и при толщине диэлектрика более 80 мкм $m = 1,72$ при условии равенства числа слоев диэлектрика.

2. Среднее квадратическое отклонение нормально-логарифмического закона распределения по ресурсу имеет минимум, равный 0,1 при толщине диэлектрика 60-80 мкм. При уменьшении толщины диэлектрика среднее квадратическое отклонение растет пропорционально $(60/d)^{1,5}$, а при увеличении толщины диэлектри-

ка может оставаться постоянным или увеличиваться в зависимости от напряженности электрического поля пропорционально $(d/80)$ в соответствии с рис. 5.

3. Показано, что среднее квадратическое отклонение, определенное по результатам испытаний числа образцов, менее 10, может существенно отличаться от аналогичных значений, определенных при числе образцов, равном 20.

4. При толщине изоляции менее ~70 мкм ресурс герметичных секций превышает ресурс негерметичных секций в 2,5-3,5 раза.

5. Уточнены формулы для сравнительного анализа ресурсов конденсаторов с последовательным соединением секций.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Техника высоких напряжений: Учебник для вузов/ И.М. Богатенков, Ю.Н. Бочаров, Н.И. Гумерова, Г.М. Иванов и др.; Под ред. Г.С. Кучинского.- С.Пб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отделение, 2003.-608 с.
- [2] Онищенко Л.И., Гулько В.И., Гребенников И.Ю. Высоковольтные импульсные конденсаторы для генераторов импульсных токов и напряжения//Электротехника. - 2000. -№12. -С. 58-59.
- [3] Кравченко В.П., Рудаков В.В. Пути улучшения удельных характеристик высоковольтных импульсных конденсаторов // Вісник НТУ "ХПИ". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика.- Харків. НТУ "ХПИ" 2001.-№16.-С. 102-105.
- [4] Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. - Л.: Энергия, 1979. -224 с.
- [5] Рудаков В.В., Бондина Н.Н., Альбова И.М., Козлов Ю.Г. Статистическая обработка результатов ресурсных испытаний электрической изоляции конденсаторов // Техническая электродинамика. -1998. -Спецвыпуск. - С.106-112.
- [6] Справочник по электрическим конденсаторам/Берзан В.П., Геликман Б.Ю. и др./Под ред. Ермуратского В.В. -Кишнев.: Штиица, 1982. -310 с.
- [7] Расчет эксплуатационных характеристик и применение электрических конденсаторов /Беленький Б.П., Бондаренко П.Н. и др. -М.: Радио и связь, 1988. -240 с.
- [8] Бойко Н.И., Рудаков В.В. Проблема чистых помещений в силовом конденсаторостроении. Доклады международной конференции АСИНКОМ. - Киев. -1996.-С.
- [9] Rudakov V.V. Service live of pulsed capacitors operated under increased gradients of electrical field // Proc. 10-th Intern. Symp. H.V.E. -Montreal, Quebec (Canada). -1997. - v.2. Rep. №3497.
- [10] Дубийчук О.Ю., Рудаков В.В., Рудаков С.В. Влияние технологического допуска по емкости на схему соединения секций высоковольтных импульсных конденсаторов. Вісник НТУ "ХПИ".-Харків:НТУ "ХПИ", 2004.- №35.-С. 136-143.
- [11] Рудаков В.В. Механизм разрушения конденсаторной изоляции // Техническая электродинамика. -1998. -№6. - С. 10-15.
- [12] Рудаков В.В. Сильные электрические поля в конденсаторных конструкциях и усовершенствование высоковольтных силовых конденсаторов. Дис. ... докт. техн. наук., 05.09.13 – Харьков, 1999.-426с.
- [13] Рудаков В.В. Эффективность экранирования конденсаторной обкладки // Электричество. -1985. -№1. -С. 71-73.
- [14] Беспалов В.Д., Конотоп В.В. Ресурсные испытания конденсаторов в импульсном режиме// Электротехника.- 1974.-№1.-С. 51-54.

Поступила 24.06.2004