

В. В. РУДАКОВ, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»;
В. П. КРАВЧЕНКО, НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»;
О. Ю. ДУБИЙЧУК, канд. техн. наук, НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ КОНДЕНСАТОР С ОГРАНИЧЕННЫМ РЕСУРСОМ

Разработан высоковольтный импульсный конденсатор с небольшим ресурсом напряжением 33кВ с содержанием 85 % полипропиленовой пленки и 15 % конденсаторной бумаги.

Ключевые слова: конденсатор, импульс напряжения, высоковольтная изоляция.

Вступление. Для проведения физических экспериментов исследования накопления электростатической энергии в малых объемах при ограниченном ресурсе менее 100 импульсов в высоковольтной импульсной конденсаторной технике широко применяется комбинированная изоляция с процентным содержанием пленки менее 50 %. Однако, в настоящее время, в связи с прогрессом, достигнутым в создании новых качественных конденсаторных полимерных пленок (в частности, отечественной полипропиленовой) появилась возможность создания чисто пленочных импульсных конденсаторов.

Анализ основных достижений и литературы. Полипропиленовая пленка уже завоевала прочные позиции при создании силовых конденсаторов переменного напряжения [1,2]. В тоже время применение пленки для импульсных конденсаторов практически не исследовано. Имеющиеся экспериментальные данные [3,4] в одном случае [3] свидетельствуют об эффективности применения пленочной изоляции для импульсных конденсаторов, в другом [4] – при пропитке полипропиленовой изоляции касторовым маслом, обладающим большой вязкостью – получены весьма низкие значения ресурса. Поэтому логично применить для пропитки диэлектрическую жидкость с меньшей вязкостью и меньшим углом смачивания. Из широко распространенных и доступных жидких диэлектриков наиболее подходящим является нефтяное масло.

Целью работы является оценка возможности создания высоковольтного импульсного конденсатора с ограниченным ресурсом менее 10^2 импульсов, но с большой удельной энергией даже при работе в режиме колебательного разряда, при номинальном напряжении 33кВ, емкостью 0,8мкФ.

Для обоснования конструкции использованы результаты ресурсных испытаний пленочной изоляции. Были изготовлены секции из односторонне шероховатой полипропиленовой пленки типа TERFILM RER толщиной 12 мкм с различным количеством слоев: 2, 3, 4 и 5 слоев (24, 36, 48 и 60 мкм со-

ответственно). В ходе проведения эксперимента секции испытывались на кратковременную электрическую прочность и на ресурс в стандартном режиме (частота разрядного тока контура 100 кГц и декремент колебаний 1,38). Испытание образцов на кратковременную электрическую прочность производилось путем скачкообразной подачи на испытуемый образец напряжения, соответствующего уровню напряженности для данного количества слоев пленки $E = 250$ кВ/мм. Далее подъем напряжения осуществлялся с шагом по времени $\Delta t = 30$ с и по напряженности с шагом $\Delta E = 25$ кВ/мм.

Ресурсные испытания образцов (длительная электрическая прочность) проводились с использованием генератора поджигающих импульсов, который генерировал импульсы с частотой $f = 2$ Гц. Подаваемое на образец напряжение контролировалось при помощи электростатического киловольтметра С196.

Результаты испытаний. Результаты испытания секций на кратковременную электрическую прочность приведены в табл. 1:

Таблица 1 – Кратковременная электрическая прочность образцов

Толщина изоляции, мкм	Количество испытанных образцов, ед.	Среднее напряжение пробоя, кВ	Средняя напряженность пробоя, кВ/мм
24	15	12,77	531,94
36	16	19,11	530,73
48	19	21,15	440,57
60	19	27,17	452,89

Следует отметить, что из испытанных на кратковременную прочность образцов ни на одном из них напряженность пробоя не составила менее 350 кВ/мм.

Результаты ресурсных испытаний на 6 уровнях напряженности для образцов с различной толщиной пленочного диэлектрика даны в табл. 2. Анализ результатов. Анализ результатов ресурсных испытаний (табл. 2) показывает, что при напряженностях электрического поля более 200 кВ/мм не наблюдается закономерности уменьшения ресурса с увеличением толщины диэлектрика. Это свидетельствует об изменении механизма разрушения изоляции и ослаблении «краевого эффекта».

На рис. 1 представлены зависимости удельной энергии активной зоны диэлектрика при вероятности наработки 0,5 по результатам эксперимента, а также приведена известная зависимость для бумажно-касторовой изоляции.

При создании специальных малогабаритных конденсаторов с рабочей напряженностью электрического поля более 150 кВ/мм и небольшим ресурсом применение бумажно-касторовой изоляции практически невозможно из-за большой доли отказов при первом же подъеме напряжения [6]. Поэтому при $E_p > 150$ кВ/мм (и ресурсе менее 10^3 импульсов) применение пленочного

диэлектрика является оправданным.

Таблица 2 – Средние значения наработки образцов с различными толщинами пленочного диэлектрика и различных значениях напряженности электрического поля

Толщина изоляции, мкм	Средний ресурс при различных уровнях напряженности, импульсов					
	$E, \text{кВ/мм}$					
	125	150	175	200	225	250
24	252244	11465	2800	938	426	132
36	7543	2212	1459	958	662	400
48	8774	3076	1662	900	406	190
60	4472	1720	884	492	378	227

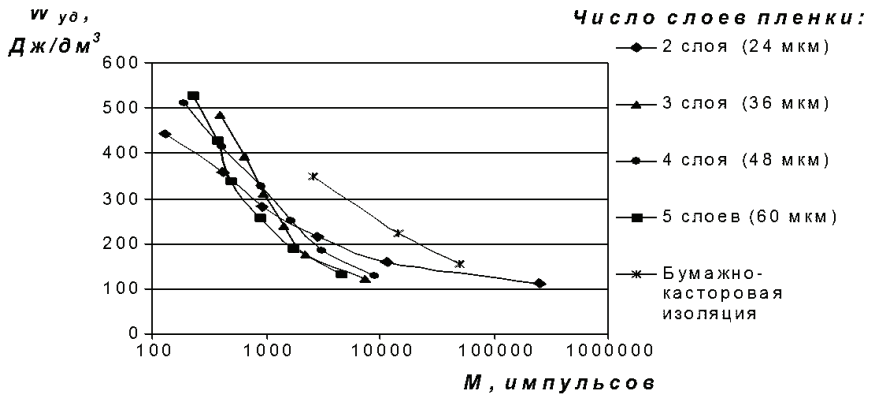


Рисунок 1 – Удельная энергия образцов с пропитанной полипропиленовой изоляцией и с бумажно-касторовой изоляцией

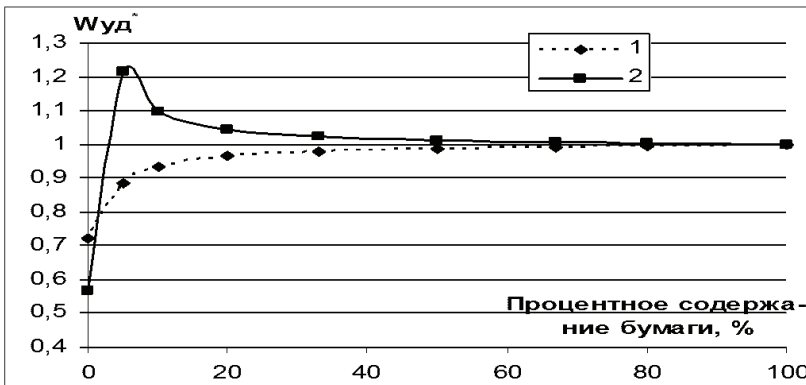


Рисунок 2 – Расчетное значение $W_{уд}'$, рассчитанное по значению напряженности на скошенной грани (1) и на горизонтальной части электрода (2)

На рис. 2 приведена зависимость относительной удельной энергии $W_{уд}'$

для рассмотренной конструкции с комбинированным диэлектриком в зависимости от процентного содержания бумаги, рассчитанная по теории «напряженного объема» [2]. Учитывая, что процессы на горизонтальной части электрода являются определяющими величину ресурса, то повышение удельной энергии возможно при повышенном процентном содержании пленки по сравнению с бумагой, основной задачей которой является обеспечение качественной пропитки. Для увеличения удельной энергии на 20 % необходимо уменьшить содержание бумаги до 5-20 %.

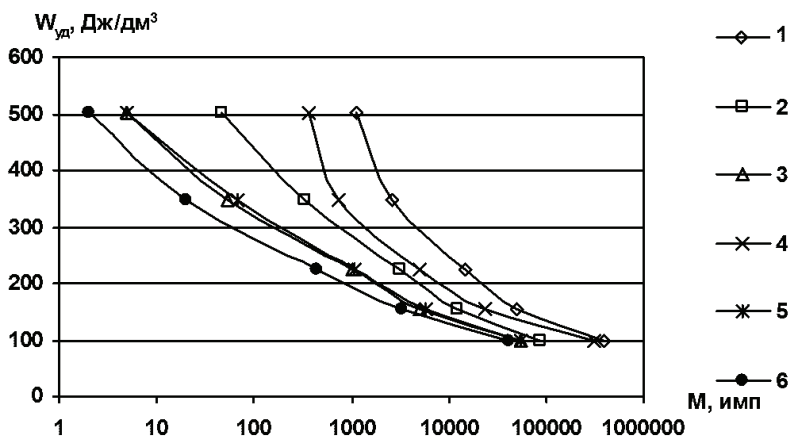


Рисунок 3 – Расчетные зависимости удельной энергии от ресурса:
 1 – $W = 50$ Дж, $P = 0,5$; 2 – $W = 50$ Дж, $P = 0,9$; 3 – $W = 50$ Дж, $P = 0,999$;
 4 – $W = 5000$ Дж, $P = 0,5$; 5 – $W = 5000$ Дж, $P = 0,9$; 6 – $W = 5000$ Дж, $P = 0,999$

Это возможно выполнить применив относительно толстые слои пленки 40мкм и тонкую бумагу 5 мкм.

С увеличением толщины пленки ее электрическая прочность как показывают эксперименты остается на уровне не менее 350кВ/мм.

А на рис. 3 представлены вероятностные оценки удельной энергии комбинированной изоляции с 50 % и менее содержанием пленки в активном диэлектрике в зависимости от полной запасаемой энергии и вероятности безотказной работы по данным [5].

Таким образом при создании конденсатора с ограниченным ресурсом, чтобы получить максимальную удельную энергию необходимо:

- иметь наибольшее значение напряженности электрического поля, что возможно только при применении пленочных диэлектриков;
- прокладывать между слоями пленки пористый диэлектрик (бумагу) для улучшения качества пропитки и ослабления напряженности электрического поля на краях обкладок, причем процентное содержание бумаги не должно превышать 10 %. Для этого толщина слоя пленки должна быть на порядок больше толщины бумажной изоляции при минимально возможной

общей толщине изоляции между обкладками;

– понимать, что применение толстых слоев пленки, имеющих практически ту же кратковременную электрическую прочность, что и тонких слоев, существенно не уменьшит ресурс при ограниченном числе импульсов;

– уйти от необходимости последовательного соединения секций внутри пакета для избегания перекоса напряжения на последовательно соединенных секциях внутри пакета вследствие технологического допуска разброса по величине емкости;

– обеспечить длину закраины по изоляции из расчета не более 1 кВ/мм, то есть более 30 мм.

Конструкция конденсатора. Разработан высоковольтный импульсный конденсатор КИМ-157 напряжением 33 кВ емкостью 0,8мкФ с ограниченным сроком службы. Технические характеристики конденсатора: номинальное напряжение 33 кВ, испытательное напряжение 35кВ, номинальная емкость 0,8мкФ±0,1мкФ, тангенс угла диэлектрических потерь, не более 0,002, ресурс, циклы заряд-разряд, не менее 1,0 и не более 10^2 , габариты, диаметр х длина, мм -140х300.

Внешний вид конденсатора в сборе со стороны торца представлен на рис.4.

Активным диэлектриком является изоляция из 3 слоев полипропиленовой пленки общей толщиной 120мкм и 4 слоев пятимикронной бумаги КОН-2-5. Средний рабочий градиент составляет 230 кВ/мм. Удельная энергия в активной части изоляции достигает значений 450 Дж/дм³. Пакет намотан на цилиндрический изоляционный стержень. С каждого из торцов пакета выведены по 32 вывода параллельно соединенных секций), при этом длина пути возможного разряда вдоль поверхности изоляции составляет 35 мм. Вывода соединены с помощью прижимных контактов, причем прижим осуществляется за счет стяжки элементов конденсатора вдоль оси с помощью центрального металлического (высоковольтного) стержня, расположенного внутри изоляционной втулки, на которую намотан пакет. Герметизация конденсатора осуществляется с помощью изоляционных фланцев из оргстекла, металлических колец и 12 стяжных болтов, расположенных по периметру фланцев. Активная часть пакета (рабочая изоляция) составляет 30 % объема конденсатора (если не учитывать объем обкладок, закраин, прижимных устройств, герметизирующих фланцев и наружных выводных шпилек и центрального стержня. Поэтому удельная энергия конденсатора, отнесенная к объему конденсатора составит около 150 Дж/дм³.

Результаты испытаний конденсатора. Изготовленные 3 макета образцов конденсаторов (внешний вид представлен на рис. 1) испытаны в однократном импульсном колебательном режиме при номинальном напряжении. Декремент колебаний составил 1,7. Ресурс составил соответственно 3,9 и 15 импульсов. По сравнению с данными табл. 2 уменьшение ресурса на 1,5-2

порядка связано с увеличением толщины диэлектрика до 140мкм, увеличением площади обкладок на 2 порядка по сравнению с образцами для испытаний, эффектом увеличения разброса по ресурсу при рабочих напряженностях электрического поля, близких к пробивным значениям, а также использование упаковочной полипропиленовой пленки.



Рисунок 4 – Макет конденсатора

Выводы

1. Показана возможность создания высоковольтного импульсного конденсатора на основе комбинированного бумажно-полипропиленового диэлектрика с ограниченным ресурсом (около 10 импульсов в режиме колебательного разряда) при рабочей напряженности электрического поля 230 кВ/мм, удельной энергии в активной части 450 Дж/дм³ и общей запасаемой энергии 400 Дж.

2. Для получения ресурса более десятков импульсов, но менее 1000, для данного типа изоляции необходимо уменьшить рабочий градиент до 165кВ/мм.

Список литературы: 1. Г.С. Кучинский, Н.И. Назаров, Г.Т. Назарова, И.Ф. Переселенцев Силовые электрические конденсаторы. – М.: Энергия, 1975 – 248 с. 2. Бржезицкий В.О., Исакова А.В., Рудаков В.В. та ін. // Техніка і електрофізика високих напруг: Навч. посібник / За ред. В.О.Бржезицького, В.М.Михайлова. – Х.: НТУ «ХП»-Торнадо, 2005. – 930 с. 3. Гребенников И.Ю. Гунько В.И., Дмитришин А.Я. и др. Прогнозирование ожидаемого среднего ресурса высоковольтных импульсных конденсаторов с пленочным диэлектриком в зависимости от режимов эксплуатации // Физика импульсных разрядов в конденсированных средах: Материалы XII Межд. науч. школы. – Николаев: КП «Николаевская областная типография», 2005. – С. 125-126. 4. В.В.Рудаков, Ю.В.Кравченко, Д.А.Доценко Ресурс пленочной полипропиленовой изоляции, пропитанной касторовым маслом, в импульсном режиме // Вісник НТУ «ХП». Збірник наукових праць. Тем. випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП». – 2006. – № 37. –

С. 113-118. **5. В.В.Рудаков, О.Ю.Дубийчук, В.П.Кравченко** Предельные удельные характеристики высоковольтных импульсных конденсаторов // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Тем. випуск. Електроенергетика і перетворююча техніка. – Х.: НТУ «ХПІ», 2004. – № 7. – С. 142-147.

6. Дубийчук О.Ю., Рудаков В.В. Экспериментальное определение показателей надежности секций конденсаторов с бумажно-касторовой изоляцией // Електротехніка і електромеханіка. – 2006. – № 1. – С.71-75.

Поступила в редколлегию 22.10.2012

УДК 621.319.4

Высоковольтный импульсный конденсатор с ограниченным ресурсом / В. В. Рудаков, В. П. Кравченко, О. Ю. Дубийчук // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2012. – № 52 (958). – С. 154-160. – Бібліогр.: 6 назв

Розроблено високовольтний імпульсний конденсатор з невеликим ресурсом напругою 33кВ з вмістом 85% поліпропіленової плівки та 15% конденсаторного паперу.

Ключові слова: конденсатор, імпульс напруги, високовольтна ізоляція.

A high-voltage impulsive capacitor is developed with a small resource by high voltage of 33kv with maintenance 85% polypropylene film and 15% capacitor paper.

Keywords: capacitor, impulse of voltage, high-voltage insulation.