

В.В.РУДАКОВ, д-р техн. наук, проф., гл. науч.сотр., НТУ «ХПИ»;
В.П.КАСАТКИН, студент, НТУ «ХПИ»

УДЕЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ С ЛАВСАНОВЫМ ДИЭЛЕКТРИКОМ

Наведені результати ресурсних випробувань секцій високовольтних імпульсних конденсаторів з лавсановим діелектриком, що просочений трансформаторним маслом, в імпульсному режимі. Проведено оцінку питомої енергії.

The results of the resource test of high-tension section of pulsed capacitor with lamsan dielectric, imbued with transformer mask in pulsed mode are shown. The estimation of specific energy are made.

Приведены результаты ресурсных испытаний секций высоковольтных импульсных конденсаторов с лавсановым диэлектриком, пропитанным трансформаторным маслом в импульсном режиме. Проведена оценка удельной энергии.

Постановка задачи. Наряду с исследованиями по улучшению конструкций конденсаторов с бумажно-касторовым диэлектриком интенсивно развиваются работы по созданию чисто пленочных конденсаторов [1,2].

Прогресс в области создания пленочных импульсных высоковольтных конденсаторов привел к сокращению доли выпуска конденсаторов с бумажно-касторовой пропиткой. В тоже время приводимые в соответственных литературных источниках данные по ресурсу образцов секций пленочных импульсных конденсаторов дают завышенные значения по отношению к декларируемому ресурсу, изготовленных на основе таких секций конденсаторов [2,3]. Лучшие показатели по удельной энергии достигнуты для конденсаторов с полиэтилентерефталатным диэлектриком (лавсаном), пропитанным ксиллфенилэтаном [1]. Однако, эта пропитывающая жидкость может вызывать аллергические реакции, а из традиционно применяемых касторового масла и нефтяного масла лучшей представляется трансформаторное масло, что отражено в работах при исследовании пропитанной полипропиленовой изоляции [2,4].

Цель работы. Проведение поисковых исследований и определение ресурса секций импульсных высоковольтных конденсаторов с лавсановым диэлектриком, пропитанным трансформаторным маслом, и предназначенных для использования в составе генераторов передвижных электролабораторий для определения мест повреждения кабелей.

Конструкция секций и методика проведения испытаний. Проведены ресурсные испытания секций импульсных конденсаторов с двухслойным, трехслойным и четырехслойным лавсановым диэлектриком (толщина одного слоя пленки ПЭТ 15 мкм). Общая толщина диэлектрика составила соответст-

венно 30мкм, 45 мкм и 60мкм. Обкладки выполнены из алюминиевой фольги длиной 2 м, толщиной – 9 мкм и шириной активной части в секции 160 мм. Образцы, залиты в вакууме сушенным трансформаторным маслом Т-1500 без предварительной сушки лавсанового диэлектрика. Испытания в импульсном режиме проводились по схеме, моделирующей условия работы импульсного конденсатора в установке для обнаружения мест повреждения кабелей (рис.1).

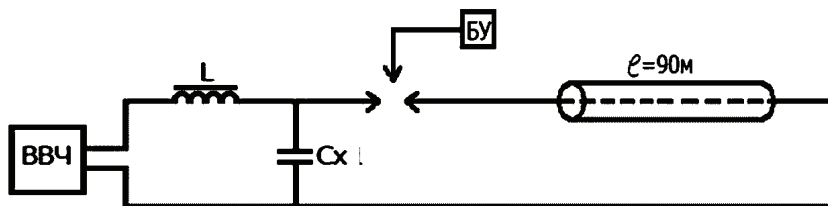


Рисунок 1 – Электрическая схема испытаний установки: ВВЧ – высоковольтный блок заряда; L – дроссель; P – разрядник; Cx – испытываемый образец; L = 90 м – высоковольтный кабель ПВВВВ-60-3.5 длиной 90 м; БУ – блок управления

На рис. 2 приведен экспериментальный испытательный стенд, включающий испытательную ячейку 1 с образцами секций, измерительный трансформатор 2, делитель напряжения 3, испытательный высоковольтный кабель 4, механический разрядник 5, высоковольтный трансформатор 6, блок управления 7.

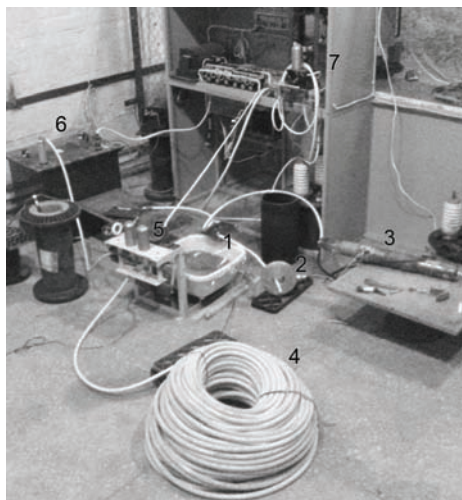


Рисунок 2 – Экспериментальный испытательный стенд

Секции для испытаний выполнены плоскомотанными. После намотки секции набраны в группы таким образом, чтобы емкость каждой группы находилась в диапазоне $0,5 \div 1$ мкФ, залиты трансформаторным маслом в вакууме без предварительной термовакуумной обработки. Испытаны 6 групп образцов: одна группа (А) из двухслойных секций емкостью 0,73 мкФ, 2 группы емкостью 0,8 мкФ каждая (В1 и В2) из трехслойных секций, двух групп четырехслойных секций емкостью 0,49 мкФ каждая (Д1 и Д2), и группы (Д3) емкостью 1,08 мкФ четырехслойных секций из двух подгрупп, содержащих параллельно соединенные секции каждая, но включенных при испытаниях последовательно. Частота следования импульсов составила $f = 0,8$ Гц, а частота разрядного тока $F = 20$ кГц. При испытаниях контролировалось зарядное напряжение на емкости C_x с помощью делителя напряжения и разрядный ток с помощью трансформатора тока и осциллографа. Декремент колебаний составил $\Delta = 1,7 \div 2$. Группа А1 испытывалась при напряженности электрического поля 166 кВ/мм. Ресурс составил 2330 циклов заряд-разряд. Группа В1 испытывалась в режиме подъема зарядного напряжения ступенями таким образом, чтобы уровни напряженности на каждой ступени составили: 130 кВ/мм в режиме аperiodического разряда (2300 циклов заряд-разряд), в основном режиме при декременте колебаний 1,7 при 130 кВ/мм (10600 циклов), 140 кВ/мм (4420), 150 кВ/мм (700 циклов), и пробой при подъеме напряженности до 180 кВ/мм. Вторая группа В2 испытывалась в режиме: 110 кВ/мм, 130 кВ/мм, 140 кВ/мм, 150 кВ/мм (по 700 циклов на каждой ступени), 160 кВ/мм (5600 циклов), 170 кВ/мм (330 циклов и пробой). Группа Д1 и Д2, соединенные параллельно, выдержали 3240 циклов при напряженности 140 кВ/мм и 2800 циклов при напряженности 150 кВ/мм, после чего группа Д1 пробилась. Группа Д2 после этого проработала 6721 циклов при напряженности 140 кВ/мм, затем 1410 циклов при напряженности 150 кВ/мм и далее после 2585 циклов при напряженности 140 кВ/мм пробилась. Средний срок службы, приведенный к напряженности поля 110 кВ/мм при показателе степени в «формуле жизни», равно 6, для всех групп секций приведен в таблице.

Средний срок службы, приведенный к напряженности поля 110 кВ/мм

Тип группы	Ресурс, циклы заряд-разряд ($E_{расч} = 130$ кВ/мм)	Ресурс, циклы заряд-разряд ($E_{расч} = 110$ кВ/мм)
А	8100	22070
В1	19140	52150
В2	24810	67600
Д1	11690	31850
Д2	29540	80485
Д3	25510	69500

Перед испытаниями измерены емкость C_x и тангенс угла диэлектриче-

ских потерь образцов $\operatorname{tg} \delta$. Выборочно определены зависимости измерения тангенса угла диэлектрических потерь и емкости от напряжения U (50 Гц) с помощью устройства ИПИ-10-МИ в процессе проведения испытаний [5]. При измерении испытания прерывались на период измерения. Емкость при изменении напряжения U практически не изменялась. Значения тангенса угла диэлектрических потерь зависели только от уровня напряжения, при котором производились измерения, но не зависели от времени старения вплоть до пробы. Так при измерении $\operatorname{tg} \delta$ группы ДЗ в процессе испытаний после наработки ресурса при напряженности электрического поля 130 кВ/мм значения $\operatorname{tg} \delta$ составили при подаче напряжения 1кВ, 2 кВ и 3кВ соответственно 0,00205; 0,00233; 0,00301. После последующей наработки в импульсном режиме при 140 кВ/мм значения $\operatorname{tg} \delta$ составили 0,00201; 0,0022; 0,00335. А при 150 кВ/мм – 0,00235; 0,00252; 0,0039. Перед испытаниями значения $\operatorname{tg} \delta$ составили 0,0011; 0,00117; 0,00192. Таким образом, по величине тангенса угла диэлектрических потерь, измеренному при уровнях действующего напряжения до 3кВ, невозможно оценить степень старения данного вида изоляции.

Анализ таблицы показывает, что при сроке службы $1 \cdot 10^4$ и более циклов заряд-разряд удельная энергия 3-4 слойных (при толщине 45-60мкм) конденсаторов составят 240 Дж/дм³ ($0,5\epsilon\epsilon_0 E^2$, для лавсана $\epsilon=3,2$). Так как в реальных конструкциях объем активного диэлектрика составляет в среднем 50% объема конденсатора, то значение удельной энергии конденсатора ожидается на уровне 120 Дж/дм³. Это значение соответствует удельной энергии лучших образцов конденсаторов, выпускаемых серийно и предназначенных для работы в режиме слабозатухающих колебательных разрядов при ресурсе $2 \cdot 10^4$ циклов заряд-разряд. Положительным является значительное сокращение цикла изготовления конденсаторов за счет исключения цикла сушки, а также применение дешевого широко распространенного трансформаторного масла.

Проведены также определительные испытания на переменном напряжении 3-х слойных секций при напряженности электрического поля, не превышающей значения, соответствующего началу интенсивного роста тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$. Данное значение испытательной напряженности электрического поля определено экспериментально с помощью измерителя $\operatorname{tg} \delta$ ИПИ-10 [2], а результаты измерений $\operatorname{tg} \delta$ представлены на рис. 3. Измерения проведены на частоте переменного тока 50 Гц. .

Кривая 1 получена при проведении замеров $\operatorname{tg} \delta$ в начале каждого 20 минутного интервала нахождения образца под переменным напряжением, а кривая 2 – в конце каждого 20 минутного интервала. Рабочая напряженность на каждом временном интервале измерений увеличивалась по отношению к значению напряженности на предшествующем временном интервале. При $E = 125$ кВ/мм произошел пробой образца через 3 минуты после подачи напряжения. Рост $\operatorname{tg} \delta$ начинается с напряженности 110 кВ/мм. Как правило, резкое увеличение $\operatorname{tg} \delta$ связано с развитием ионизационных процессов. По-

этому принимаем, что при $E \leq 110$ кВ/мм показатель степени n будет равен 6 в формуле обратной степенной зависимости ресурса от напряженности электрического поля, что справедливо для силовых конденсаторов, работающих при относительно низких рабочих напряженностях электрического поля. При дальнейшем увеличении E показатель степени n может увеличиваться до $8 \div 10$ [6].

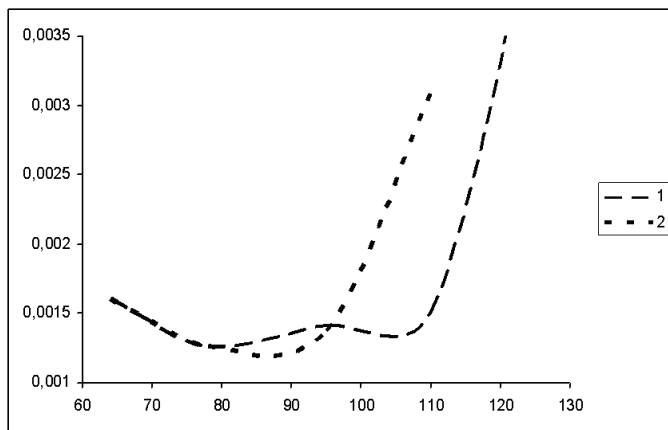


Рисунок 3 – Зависимость $\text{tg} \delta$ от амплитудного значения напряженности электрического поля

Выводы.

1. Результаты пробных испытаний на ресурс показывают, что возможно создание конденсаторов с лавсановым диэлектриком из 3-4 слоев пятнадцатимикронной пленки, пропитанным трансформаторным маслом.

2. Заметное увеличение $\text{tg} \delta$ происходит при напряженности поля 110 кВ/мм, выше которого необходимо учитывать возможное увеличение показателя степени в формуле «жизни» более 6.

3. Удельная энергия конденсаторов, соответствующая ресурсу 10^4 циклов заряд-разряд, может достигать значений 120 Дж/дм^3 при 50 % заполнения объема конденсатора активным диэлектриком.

Список литературы: 1. *Ермилов И.В.* Высоковольтные импульсные конденсаторы с полимерной изоляцией // *Электричество*. – 2009. – № 9. – С. 73-79. 2. *Рудаков В.В., Кравченко Ю. В.* Ресурс пленочной полипропиленовой изоляции, пропитанной нефтяным маслом, в импульсном режиме // *Вісник НТУ «ХПІ» «Техніка і електрофізика високих напруг»*. – Х.: НТУ «ХПІ», 2007. – № 20. – С. 167-174. 3. *Гребенников И.Ю., Гуноко В.И., Дмитришин А.Я. и др.* Исследования зависимости ресурса высоковольтных импульсных конденсаторов с пленочным диэлектриком от режима эксплуатации // *Электротехника*. – 2006. – № 6. – С. 38-41. 4. *В.В.Рудаков, Ю.В.Кравченко, Д.А.Доценко* Ресурс пленочной полипропиленовой изоляции, пропитанной касторовым маслом, в импульсном режиме // *Вісник НТУ «ХПІ» «Техніка і електрофізика високих напруг»*. – Х.: НТУ «ХПІ», 2006. – № 37. – С. 113-118. 5. *Бутко С.М., Кравченко В.П., Рудаков В.В., Свиридок С.Н.*

Электрическая прочность конденсаторной изоляции с повышенным содержанием полипропиленовой пленки // Вестник НТУ «ХПИ». – Х.: НТУ «ХПИ». – № 16. – 2011. – С. 35-39. 6. Кучинский Г.С. Высоковольтные импульсные конденсаторы. – Л.: Энергия. Ленинградское отделение, 1979. – 224 с.

Поступила в редколлегию 04.04.2012.