

Processes of Self-Healing in Film Capacitors in Overload Modes

Belko V.O., Emelyanov O.A., Ivanov I.O.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The advantage of modern metallized film capacitors is high reliability caused by so-called ability to self-healing. Application of such capacitors in overload modes (at short lifetimes) can significantly improve their technical and volumetric characteristics. In spite of the fact that self-healing had been investigated over the last decades, the existing theoretical notions and the reported experimental results did not led to the commonly accepted model of the process of self-healing. Moreover, there is no information on film capacitors performance in overload modes in the literature. In this paper, we present the results of experimental and theoretical study on processes of self-healing of film capacitors in overload modes. The capacitors' testing method is proposed. The method allows to record events of self-healing over a wide range of voltages and times. It is shown that capacitors are able to operate at voltages 4-6 times higher than nominal value. The capacitors' degradation mechanism is caused by multiple self-healing events that lead to the gradual accumulation of highly conducting zones near the breakdown channels. Model of single event of self-healing is developed. This allows estimating the energy of self-healing for different levels of applied voltage. It is suggested to use the value of cumulative energy of self-healing as a parameter for estimating the rate of degradation and predicting the film capacitor's lifetime.

Keywords: electrical capacitors, dielectric breakdown, self-healing, overload modes.

Procesele de auto-vindecare a condensatoarelor cu dielectric din mase plastice în regimuri forțate

Belko V.O., Emelyanov O.A., Ivanov I.O.

Universitatea Politehnică Sankt-Petersburg în numele lui Petru cel Mare
Sankt-Petersburg, Federația Rusă

Rezumat. Articolul prezintă rezultatele investigațiilor experimentale și teoretice ale proceselor de auto-vindecare în condensatoarele cu pelicule metalizate în regimuri forțate. Se propune o metodă de testare a condensatoarelor, care permite să se înregistreze actele de auto-vindecare într-o gamă largă de tensiuni și timp. Se demonstrează posibilitatea de asigurare a robusteții condensatoarelor cu electrozi metalizați și dielectric din pelicule de mase plastice în condiții de multiple depășiri a sarcinii admisibile (de 4-6 ori) în caz de forțare a sarcinii electrice. S-a propus mecanismul de degradare al condensatoarelor, ca urmare a derulării a mai multor procese de auto-vindecare, ceea ce duce la acumularea treptată a zonelor cu conductivitate ridicată lângă canale de degradare. S-a propus un model al procesului caracteristic unui act de auto-vindecare, care vă permite să se evalueze puterea de auto-vindecare pentru diferite nivele de tensiune aplicate. Ca parametru pentru a estima rata de degradare și prognozarea a duratei de viață a condensatoarelor cu auto-vindecare cu dielectric din peliculă metalizată în regim forțat de sarcină se propune să se utilizeze energia totală a proceselor de auto-vindecare.

Cuvinte-cheie: condensatoare electrice, străpungerea dielectricului, auto-vindecare, regimuri forțate.

Процессы самовосстановления пленочных конденсаторов в форсированных режимах

Белько В.О., Емельянов О.А., Иванов И.О.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. В статье приводятся результаты экспериментальных и теоретических исследований процессов самовосстановления металлопленочных конденсаторов в форсированных режимах. Предложена методика испытаний конденсаторов, позволяющая регистрировать акты самовосстановления в широких диапазонах напряжений и времен. Показана возможность сохранения работоспособности металлопленочных конденсаторов в условиях многократного (4 - 6 раз) форсирования электрической нагрузки. Предложен механизм деградации конденсаторов, обусловленный развитием множественности процессов самовосстановления, приводящий к постепенному накоплению высокопроводящих зон вблизи каналов пробоя. Создана модель единичного процесса самовосстановления, позволяющая оценивать энергию самовосстановления для разных уровней прикладываемого напряжения. В качестве параметра для оценки скорости деградации и прогнозирования ресурса металлопленочных конденсаторов в форсированном режиме предложено использовать величину суммарной энергии самовосстановления.

Ключевые слова: электрические конденсаторы, пробой диэлектрика, самовосстановление, форсированные режимы.

Введение

В различных устройствах электротехники широкое применение нашли металлопленочные конденсаторы (МПК), где обычные электрические режимы их эксплуатации характеризуются уровнем приложенного напряжения не превышающем 1 кВ (обычно - 300-600 В), а рабочие частоты составляют десятки герц - единицы килогерц. В этом диапазоне конденсаторы с пленочным диэлектриком имеют достаточно высокие значения удельной реактивной мощности. В технических условиях (ТУ) на серийно выпускаемые электрические конденсаторы допустимые параметры режимов эксплуатации определяются исходя из сроков службы ($\tau_{сл}$) на уровне единиц - десятков тысяч часов [1-4]. Основными факторами, определяющими работоспособность конденсаторов, являются величины напряженности электрического поля E в диэлектрике, частоты приложенного напряжения f , максимальной рабочей температуры T_{max} (как правило - в центре конструкции), а также - действующее значение тока через конденсатор I_p . Наряду с традиционной областью использования МПК, в последние годы достигнут значительный успех в конструировании новых типов конденсаторов, которые предназначены для использования в микросекундном и миллисекундном диапазонах устройств импульсной энергетики [5, 6]. При этом амплитуда приложенного напряжения может составлять единицы-десятки киловольт, а срок службы таких конденсаторов лежит в диапазоне сотен-тысяч циклов заряд-разряд. Указанные параметры актуальны для различных применений в системах электромагнитного оружия, бортовой аппаратуры, микроволновых источников питания и характеризуются ограниченными сроками службы, зачастую не превышающими нескольких единиц-десятков минут. Для указанных разновидностей аппаратуры, исходя из практических соображений, можно резко увеличить (форсировать) режим нагрузки на конденсатор за счет существенного сокращения его $\tau_{сл}$ относительно значений, предусмотренных в ТУ. Оптимальный выбор конденсаторов для работы в таких форсированных режимах (ФР) с учетом малых сроков службы позволяет существенно

повысить технико-экономические и снизить массо-габаритные характеристики конденсаторов и аппаратуры в целом. Для МПК предельно допустимое рабочее напряжение определяется, исходя из соображений запаса по кратковременной электрической прочности $E_{кр}$ диэлектрика и деградации параметров конденсатора. В современных пилотных конструкциях величина рабочей напряженности электрического поля вплотную приблизилась к значениям электрической прочности полимерных диэлектриков на уровне 450-600 кВ/мм [7-10]. При этом, особенности конструкции МПК обеспечивают его работоспособность вследствие так называемого эффекта самовосстановления (СВ), в англоязычной литературе известного как self-healing (SH). В случае локального пробоя диэлектрика в местах пониженного значения электрической прочности (что неизбежно связано с неоднородной структурой рабочего диэлектрика и большой площадью электродов) возникает значительная величина плотности тока пробоя. В зоне пробоя диэлектрика выделяется энергия, достаточная для частичного уничтожения некоторой области тонкого металлизированного электрода (толщиной 10-20 нм) вблизи канала пробоя за счет электрического взрыва металлизированного электрода с последующим развитием микродугового разряда. Образующая таким образом зона деметаллизации изолирует место пробоя от остальной части электрода и конденсатор восстанавливает свою работоспособность (Рис.1).



Рис.1. Зона деметаллизации электрода конденсатора после пробоя диэлектрика.

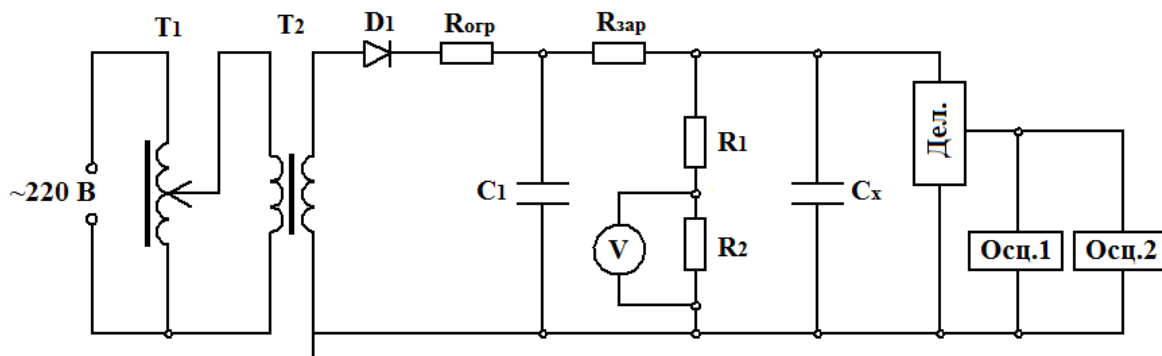


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для исследования СВ в МПК.

Качество самовосстановления зависит от конструкции конденсатора и энергии, выделившейся в зоне пробоя W_{SH} (имеющей характерные значения десятков-сотен мДж). Площадь зоны деметаллизации S_{SH} может составлять единицы квадратных миллиметров, что соответствует значению ее среднего радиуса на уровне десятых–единиц миллиметров [11-14,20]. Длительность протекающего процесса τ_{SH} обычно составляет единицы–десятки микросекунд [18]. При охлаждении плазмы дугового разряда на участках деметаллизации и в канале пробоя осаждаются продукты разложения диэлектрика, в первую очередь – свободный углерод, который может обеспечить достаточно высокую проводимость поврежденного места и ухудшить характеристики конденсатора в целом. На практике обычно критерием параметрического отказа конденсатора служит величина снижения емкости на уровне 5-10 % [19], в то время как остальные параметры обычно не рассматриваются.

Таким образом, МПК могут успешно функционировать даже на пределе своей электрической прочности, однако такое форсирование нагрузки не может быть бесконечным.

В силу обсуждаемой специфики малых сроков службы в литературе по существу отсутствуют данные для прогнозирования работоспособности МПК в форсированных режимах, поэтому проведение соответствующих экспериментальных и теоретических исследований представляется актуальным, а ожидаемые результаты – отличающимися научной новизной.

I. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе исследовались коммерческие образцы МПК типов К73 и К78 на основе пленок политэтилентерефталата (PET) и полипропилена (PP), соответственно. Диапазон напряжений и емкостей исследуемых конденсаторов составлял 63 – 250 В и 0.22 – 1 мкФ, соответственно.

Конденсаторы испытывались по специально разработанной методике. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 2. Автотрансформатор T_1 и высоковольтный повышающий трансформатор T_2 (НОМ-10) выполняют роль регулируемого высоковольтного источника питания. Высоковольтный диод D_1 , ограничительное сопротивление $R_{огр} = 24$ кОм и фильтрующая емкость $C_1 = 2$ мкФ формируют однополупериодный выпрямитель. Сопротивление $R_{огр}$ необходимо для ограничения тока через диод D_1 . Сопротивление $R_{зар} = 2$ МОм обеспечивает плавную зарядку исследуемого конденсатора C_x . Сопротивления $R_1 = 150$ МОм и $R_2 = 150$ кОм формируют резистивный делитель напряжения (1:1000). Контроль напряжения на исследуемом конденсаторе осуществлялся с помощью вольтметра V .

В основе испытаний использовалась методика ступенчатого подъема напряжения на конденсаторе с шагом 10-30 В и выдержкой не менее 30 секунд на каждой ступени. При напряжении близком к пробивному напряжению полимерной пленки и выше в конденсаторе начинали происходить процессы СВ. Каждый акт СВ приводит к снижению напряжения на конденсаторе, после чего напряжение восстанавливается до уровня текущей

ступени испытательного напряжения. Измерение напряжения на исследуемом конденсаторе осуществлялось двумя цифровыми осциллографами с разной временной разверткой. Использование двух осциллографов позволяет одновременно измерять быстрый процесс изменения напряжения на конденсаторе в процессе СВ и медленный процесс заряда конденсатора после СВ.

Подъем испытательного напряжения продолжался до тех пор, пока вследствие множественных актов СВ эквивалентное параллельное сопротивление конденсатора R_p не уменьшалось до уровня, при котором заряд конденсатора в указанной схеме становился невозможным.

Использование сегментированной памяти цифровых осциллографов позволяло непрерывно сохранять все осциллограммы напряжения, и использовать их в дальнейших расчетах. Энергия СВ определялась по формуле

$$W_{SH} = \frac{C_X (U_{BD}^2 - U_{RES}^2)}{2}, \quad (1)$$

где C_X – емкость исследуемого конденсатора, U_{BD} – напряжение пробоя диэлектрика конденсатора, U_{RES} – остаточное напряжение на конденсаторе после завершения процесса СВ.

Предполагается, что за один акт СВ емкость конденсатора меняется незначительно. Однако, после нескольких десятков СВ падение емкости становится заметным. Поэтому после каждых 20 – 50 актов СВ осуществлялось измерение емкости и диэлектрических потерь испытуемого конденсатора в диапазоне частот $10-10^6$ Гц с помощью измерителя импеданса Hioki IM3570.

По полученным осциллограммам напряжения на конденсаторе U_{SH} определялась длительность процесса СВ τ , а также временная зависимость тока через конденсатор в процессе СВ I_{SH} . Ток СВ определялся как

$$I_{SH} = -C_X U_{SH}'_t, \quad (2)$$

где $U_{SH}'_t$ – производная по времени экспериментальной зависимости напряжения на конденсаторе.

По завершению измерений исследуемые конденсаторы разматывались и проводился микроскопический анализ зон СВ: определение диаметра канала пробоя $d_{пр}$ и площади деметаллизации S_{SH} .

II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Работоспособность МПК в форсированных режимах.

В результате испытаний МПК повышенным напряжением было установлено, что в зависимости от уровня напряжения на конденсаторе процессы СВ можно разделить на 3 типа (см.рис.3а):

- I тип – единичные акты СВ (до 3 – 4 U_n);
- II тип – СВ с повторными актами (4 – 6 U_n);
- III тип – многократные акты СВ (более 6 U_n).

При I типе СВ после пробоя диэлектрика происходит быстрый спад напряжения на 10 – 50 % от исходного, после чего напряжение на испытуемом конденсаторе восстанавливается за время $\tau_{зар} \sim R_{зар} C_X$. II тип СВ характеризуется наличием 2 – 4 повторных актов СВ, а в случае III типа СВ происходит неконтролируемая серия пробоев диэлектрика, характеризующаяся многократными актами СВ.

На рис. 3а представлена качественная зависимость напряжения на конденсаторе в процессе испытаний. При достижении уровня напряжения выше $\sim 6-8 U_n$ происходил быстрый выход из строя испытуемых конденсаторов, который характеризовался значительным снижением сопротивления диэлектрика до такого уровня, что саморазряд конденсатора происходил за единицы секунд. Типичные осциллограммы напряжения на конденсаторе, соответствующие различным типам СВ, представлены на рис. 3б.

В результате акта СВ основное количество энергии W_{SH} превращается в тепло, которое отводится к холодным областям диэлектрика за счет теплопроводности. Такое локальное тепловыделение за короткие промежутки времени не влияет на устойчивость теплового состояния конденсаторов, работающих в режимах эксплуатации, не превышающих 2-3 U_n . С другой стороны, понятно, что в случае значительных электротепловых нагрузок, локальный импульс тепла, возникающий в зоне СВ, вполне способен «запустить»

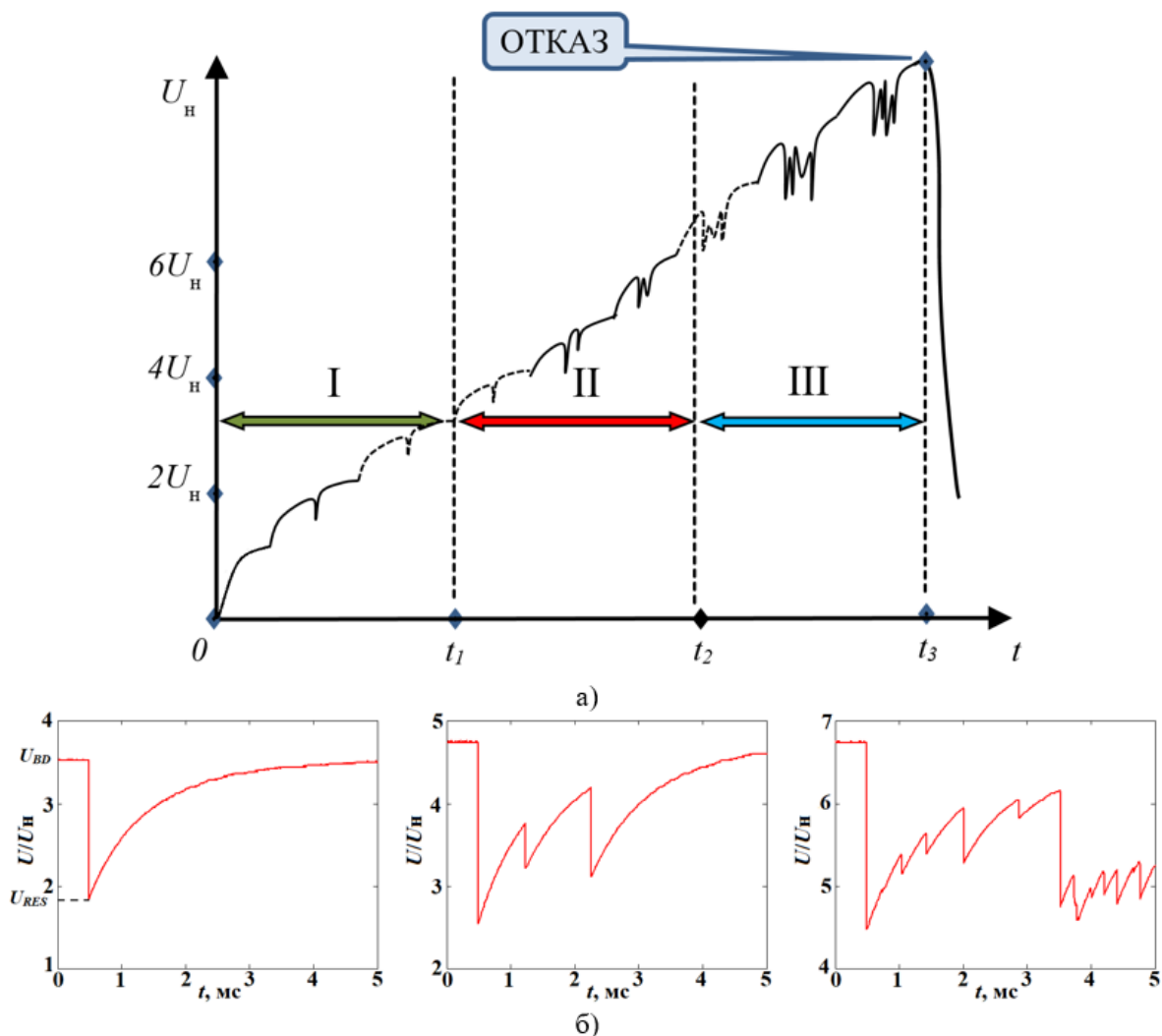


Рис.3. а) - три характерные области развития процессов самовосстановления конденсатора при ступенчатом подъеме напряжения выше номинального U_H и б) - соответствующие осциллограммы импульсов напряжения.

процесс развития пробоя соседних слоев диэлектрика. В литературе анализ возможности развития указанного процесса был предложен в [15]. При существенном уровне приложенного напряжения возрастает уровень выделившейся энергии W_{SH} , при этом возможно глубокое распространение термоактивационной волны проводимости в пленке диэлектрика и значительное усиление поля в его холодной части. Пробой, однако, может произойти и в толще диэлектрика, если температурная зависимость электрической прочности существенно снижается с ростом температуры. Временной масштаб распространения тепловой волны от зоны пробоя в соседние слои τ_T в первую очередь определяется теплофизическими характеристиками полимерной пленки и по порядку величины составляет

$$\tau_T \sim \frac{d^2 \rho C_p}{\lambda} \sim 0,5-1 \text{ мс}, \quad (3)$$

где ρ , C_p , λ , d – соответственно плотность, теплоемкость, коэффициент теплопроводности и толщина диэлектрика. Указанный временной масштаб вполне соответствует характерным временам возникновения последующих пробоев, приведенных на осциллограммах рис.3. Такой цепной механизм пробоя соседних слоев вполне объясним на основе изложенных соображений.

Работоспособность МПК в условиях СВ III типа сохраняется, но ограничена относительно небольшими временными интервалами. При этом необходимо отметить, что даже при столь высоком уровне

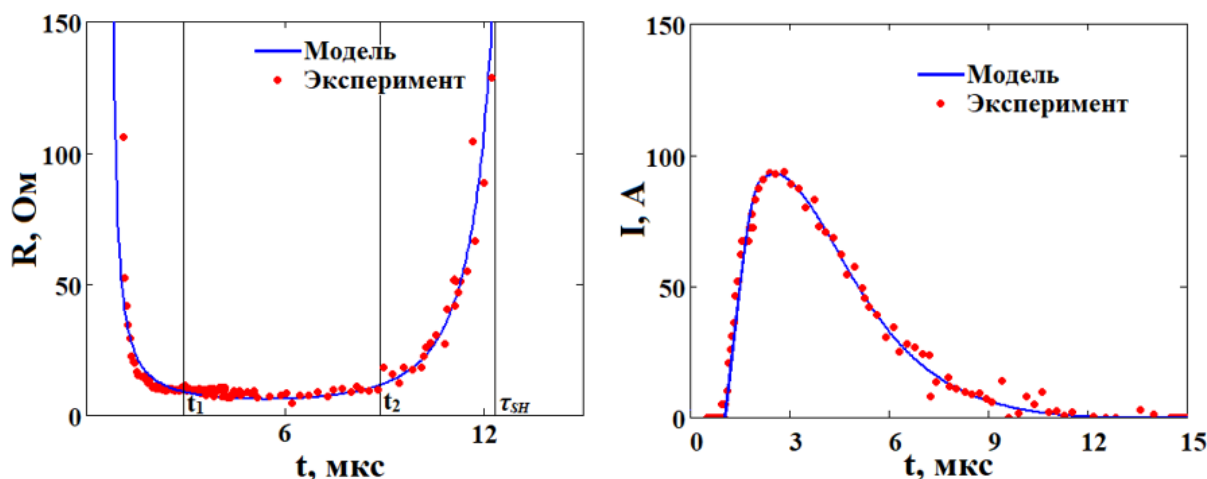


Рис.4. а) динамика импульсного сопротивления зоны СВ; б) импульс тока СВ (красные точки – значения, полученные на основе дискретного набора данных, зарегистрированных осциллографом).

приложенного напряжения не происходит катастрофического отказа изделия – конденсатор лишь теряет способность накапливать заряд из-за существенного снижения эквивалентного параллельного сопротивления. Количественные оценки указанного явления представлены в следующих частях работы.

Модель единичного процесса СВ.

В ходе экспериментов были зарегистрированы осциллограммы напряжения на конденсаторе в процессе пробоя диэлектрика и последующего процесса СВ электрической прочности. Высокая частота дискретизации регистрируемого сигнала (20 МВ/б/с) позволила с высокой степенью точности описать изменение напряжения на конденсаторе, а также восстановить импульс тока самовосстановления I_{SH} , который невозможно зафиксировать во внешней цепи (так как во время СВ конденсатор разряжается сам на себя). Зная напряжение и ток нетрудно оценить импульсное сопротивление конденсатора, которое главным образом определяется динамикой сопротивления зоны СВ:

$$R_{SH} = \frac{U_{SH}}{I_{SH}} = \frac{U_{SH}}{C \cdot U_{SH}'_t}, \quad (4)$$

На рис. 4а представлена динамика импульсного сопротивления зоны СВ,

рассчитанная на основе экспериментальных осциллограмм напряжения. Процесс, отраженный на рис.4а,б, является кратковременным и на рис.3б виден как мгновенный спад напряжения на конденсаторе.

На временной зависимости импульсного сопротивления можно выделить несколько характерных этапов развития процесса СВ:

$0-t_1$ – инициация – включает в себя несколько кратковременных стадий: пробой пленочного диэлектрика (единицы нс), электрический взрыв металла вследствие чрезвычайно высокой плотности тока вблизи места пробоя (десятки нс), зажигание дугового разряда и формирование устойчивого канала дуги (десятые доли – единицы мкс), шунтирующей противоположные электроды конденсатора. Ввиду малой длительности каждой стадии их практически невозможно различить на левой ветви зависимости R_{SH} ;

t_1-t_2 – рост зоны СВ в результате выгорания металлизации вокруг места пробоя и соответствующее удлинение канала дуги (единицы – десятки мкс);

$t_2-\tau_{SH}$ – завершение СВ вследствие погасание дугового разряда (единицы мкс).

Для описания зависимости R_{SH} можно воспользоваться следующей модельной аналитической функцией:

$$R(t) = \frac{R_0 \cdot t_1}{t \left(1 - \left(\frac{t}{\tau_{SH}}\right)^2\right)^\alpha}, \quad (5)$$

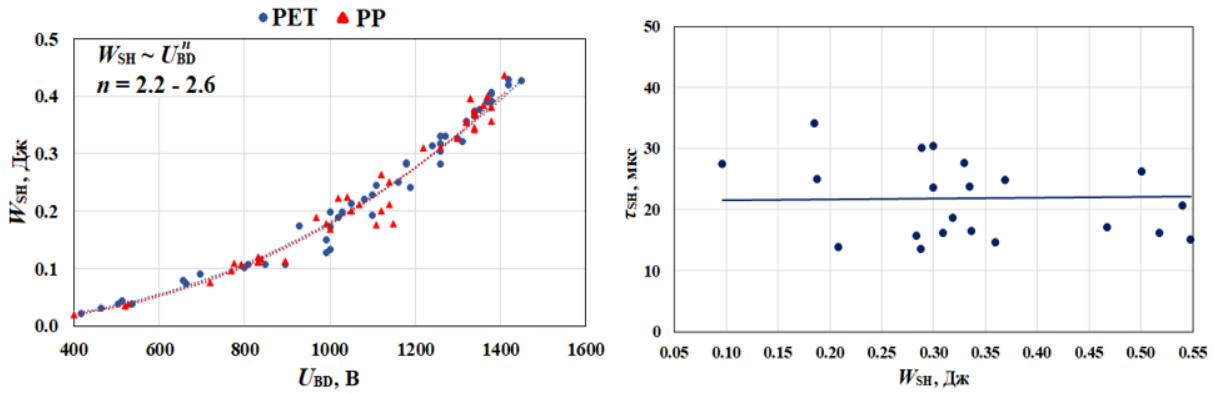


Рис.5. Энергетические и временные характеристики процесса СВ.

где τ_{SH} – длительность процесса СВ (экспериментально установлено значение длительности процесса СВ для одного конденсатора почти не зависит от напряжения пробоя и в модели будет приниматься постоянной величиной); t_1 – время формирования устойчивого канала дуги (для исследуемых конденсаторов не превышало 1.5 мкс); R_0 – минимальное значение импульсного сопротивления зоны СВ (как было показано в [17] это значение определяется эквивалентным сопротивлением металлизированных электродов току, подтекающему к месту пробоя, и составляет $\sim 1.3-1.5R_0$ (где R_0 – поверхностное сопротивление металлизации порядка 3-10 Ом); α – параметр модели.

Тогда в результате решения дифференциального уравнения, описывающего разряд конденсатора на изменяющееся во времени сопротивление $R(t)$, получим аналитические выражения для напряжения и тока в конденсаторе:

$$U(t) = U_{BD} \exp \left[\frac{1}{t_1 R_0 C} \times \left(\frac{\tau_{SH}^2}{2(\alpha + 1)} \left(\frac{\tau_{SH}^2 - t^2}{\tau_{SH}^2} \right)^{\alpha + 1} - 1 \right) \right], \quad (6)$$

$$I(t) = U(t) / R(t), \quad (7)$$

На рис.4б наблюдается удовлетворительное согласие экспериментального и модельного значений токов СВ.

Энергия, рассеиваемая в ходе единичного акта СВ, может быть рассчитана как:

$$W_{SH} = \int_0^{\tau_{SH}} \frac{U^2(t)}{R(t)} dt, \quad (8)$$

Расхождение между энергиями СВ, рассчитанными на основе экспериментальных данных и на основе предлагаемой модели, составляет не более 3-5%.

Тогда, зная уровень напряжения, при котором конденсатор работает в форсированном режиме, можно определить количество энергии, выделяемой в конденсаторе при СВ, и оценить негативное влияние этого фактора как на ухудшение характеристик конденсатора (эквивалентное параллельное сопротивление, тангенс угла потерь), так и на вероятность его катастрофического отказа. Также необходимо отметить, что знание импульсного сопротивления конденсатора во время СВ позволяет корректным образом выбрать параметры питающих цепей аппаратуры во избежание повреждения ее элементов.

Характеристики процесса СВ.

Основными характеристиками процесса СВ являются энергия СВ и длительность процесса. В ходе испытаний более 100 конденсаторов с различными типами диэлектрика (полипропилен, полиэтилентерефталат) было установлено (см. рис. 5а), что энергия СВ не зависит от типа полимерной пленки и имеет степенную зависимость от напряжения пробоя с показателем степени $n = 2.2-2.6$. Про степенную зависимость $W_{SH} \sim (U_{BD})^n$ давно известно из литературы, однако у большинства авторов показатель степени n лежит в интервале 4-7, что не согласуется с полученными результатами. По-видимому,

указанное расхождение связано с тем, что ранее (в том числе и в нашей лаборатории) эксперименты проводились на модельных образцах металлизированных пленок (в основном - в свободном состоянии на воздухе). То есть в таком случае модельный эксперимент не позволяет должным образом имитировать условия, при которых процесс СВ происходит в реальном конденсаторе. На основе измеренных площадей зон демультипликации S_{SH} , образующихся в результате СВ, и значений энергии СВ W_{SH} были получены линейные зависимости вида $S_{SH} = k \cdot W_{SH}$. Для исследованных типов конденсаторов значение k лежало в пределах 35-45 мм²/Дж.

На рис.5б показана зависимость времени процесса СВ от выделившейся энергии. Важным моментом здесь является то, что время протекания СВ практически не зависит от энергии W_{SH} (или напряжения пробоя), что также не согласуется с литературными данными. Например, в [11] отмечается прямопропорциональная зависимость $\tau_{SH} \sim U_{BD}$ и лишь в одной работе была отмечена слабая зависимость $\tau_{SH} \sim \ln U_{BD}$ [16]. По всей видимости, выявленное несоответствие также объясняется различием условий протекания процессов СВ в модельных образцах и реальных конструкциях. Что касается постоянства времени СВ от энергии, то объяснить этот эффект можно следующим образом. При СВ в зоне пробоя образуется область повышенных температуры и давления. В этих условиях происходит горение микродугового разряда, который выжигает часть металлизации вокруг места пробоя. При увеличении напряжения пробоя локально высвобождается большее количество энергии, что приводит к более высоким значениям давления, а соответственно и другим условиям существования микродуги. Как известно, повышенное давление является ограничивающим фактором для существования дугового разряда. Таким образом, происходит саморегуляция длительности процесса СВ – чем больше энергия СВ и, соответственно, давление в зоне пробоя, тем лучше условия для погасания дуги – что и приводит к некому постоянству времени протекания процесса СВ конденсатора.

Кроме энергетических и динамических характеристик СВ в ходе испытаний

регистрировались параметры самого конденсатора – с определенной периодичностью измерялись его емкость и тангенс угла диэлектрических потерь. На основе этих величин рассчитывалось эквивалентное параллельное сопротивление конденсатора. На рис.6 представлено изменение емкости и эквивалентного параллельного сопротивления конденсатора в относительных единицах от суммарной энергии СВ W_{Σ} , представляющей собой сумму всех предшествующих измерению энергий единичных процессов СВ.

Как видно из рис.6, к завершению испытаний значение R_p падает в ~10 раз (тангенс угла потерь на 10 кГц при этом увеличивается в 11 раз), в то время как снижение емкости относительно исходного значения составляет лишь ~10-15%. Известно, что в номинальных режимах работы параметрическим отказом конденсатора считается снижение его емкости на ~10%, при этом про другие его параметры ничего не говорится. Однако мы видим, что в форсированном режиме работы даже незначительное снижение емкости (единицы процентов) может сопровождаться существенным (десятки раз) снижением его эквивалентного параллельного сопротивления (или увеличением тангенса угла потерь), что, разумеется, может самым негативным образом сказаться на характеристиках оборудования, в составе которого работает конденсатор.

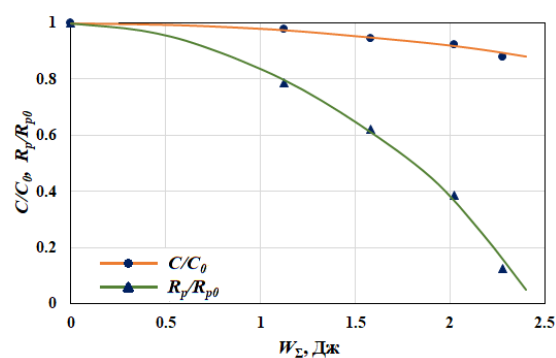


Рис.6. Изменение емкости и эквивалентного параллельного сопротивления МПК в ходе испытаний.

Также можно заключить, что величина суммарной энергии СВ W_{Σ} может использоваться для оценки скорости деградации и прогнозирования ресурса МПК в форсированном режиме.

Выводы

1. Экспериментально показана возможность сохранения работоспособности МПК в условиях многократного (4-6 раз) форсирования электрической нагрузки относительно номинальных значений в течении кратковременных сроков службы.

2. Предложен механизм деградации конденсаторов, обусловленный развитием множественности процессов СВ, приводящий к постепенному накоплению высокопроводящих зон вблизи каналов пробоя, что существенно влияет на снижение эквивалентного параллельного сопротивления и рост тангенса угла диэлектрических потерь конденсатора. При этом, снижение емкости испытанных конденсаторов остается незначительным.

3. Предложена модель единичного процесса СВ, позволяющая оценивать энергию СВ для разных уровней прикладываемого напряжения, а также описывающая динамику изменения сопротивления МПК в ходе СВ для учета его влияния на остальные элементы оборудования. Минимальное значение импульсного сопротивления зоны СВ составляет 1.3-1.5 поверхностного сопротивления металлизированного электрода.

4. В ходе испытаний реальных конденсаторов получены характеристики процесса СВ, отличающиеся от литературных данных исследований на моделях конденсаторов. В частности, показано, что показатель степенной зависимости энергии СВ от напряжения пробоя лежит в пределах 2.2-2.6, время СВ практически не зависит от напряжения пробоя (энергии СВ), предложены объяснения указанных фактов.

5. В качестве параметра для оценки скорости деградации и прогнозирования ресурса МПК в форсированном режиме предложено использовать величину суммарной энергии СВ.

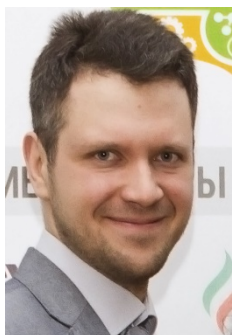
Литература

- [1] Berzan V.P., Gelikman B.Yu., Guraevskiy M.N., Ermuratskiy V.V., Ermuratskiy P.V., Kuchinskiy G.S., Mezenin O.L., Nazarov N.I., Rimskiy V.K., Smirnov B.K., Stepina K.I. *Spravochnik po elektricheskim kondensatoram. [Handbook of electric capacitors]*. Chisinau, 1982. 310 p. (In Russian)
- [2] <http://www.ga.com>. (accessed 20.06.2017)

- [3] <https://en.tdk.euq>. (accessed 01.07.2017)
- [4] <http://www.elcod.spb.ru>. (accessed 05.07.2017)
- [5] Jow T.R., MacDougall F.W., Ennis J.B., Yang X.H., Schneider M.A., Scozzie C.J., White J.D., MacDonald J.R., Schalnat M.C., Cooper R.A., Yen S.P.S. Pulsed Power Capacitor Development and Outlook. *IEEE Pulse Power Conference*. Austin, 2015, pp. 1-7.
- [6] Li H., Huang X., Li Z., Li H., Wang W., Wang B., Zhang Q., Lin F. Modeling of ESR in metallized film capacitors and its implication on pulse handling capability. *Microelectronics Reliability*, 2015, vol. 55, no. 7, pp. 1046-1053.
- [7] Rabuffi M., Picci G. Status Quo and Future Prospects for Metallized Polypropylene Energy Storage Capacitors. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2002, vol. 30, no. 5, pp. 1939-1942.
- [8] Kerrigan R.M. Metallized Polypropylene Film Energy Storage Capacitors for Low Pulse Duty. *27th Symposium for Passive Components*. Albuquerque, NM, 2007, pp. 97-104.
- [9] MacDougall F.W., Ennis J.B., Yang X.H., Cooper, R.A., Gilbert, J.E., Bates, J.F., Naruo, C., Schneider, M., Keller, N., Joshi, S., Jow, T., Ho, J., Scozzie, C.J., Yen, S.P.S. High Energy Density Capacitors for Pulsed Power Applications. *17th IEEE International Pulsed Power Conference*. Washington, DC, 2009. pp. 774-778.
- [10] Schneider, M.A., Macdonald, J.R., Schalnat, M.C., Ennis J.B. Electrical breakdown in capacitor dielectric films: Scaling laws and the role of self-healing. *IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference*. San Diego, CA, 2012. pp. 284–287.
- [11] Kammermaier J., Rittmayer G., Birkle S. Modeling of plasma-induced self-healing in organic dielectric. *Journal of Applied Physics*, 1989, vol. 66, no. 4, pp. 1594-1609.
- [12] Li H., Chen Y., Lin F., Peng B., Li F., Zhang M., Li Z. The Capacitance Loss Mechanism of Metallized Film Capacitor under Pulsed Discharge Condition. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2011, vol. 18, no. 6, pp. 2089-2094.
- [13] Belko V.O., Emelyanov O.A. Self-healing in segmented metallized film capacitors: Experimental and theoretical investigations for engineering design. *Journal of Applied Physics*, 2016, vol. 119, no. 2, 024509, pp. 1-7.
- [14] Belko V.O., Bondarenko P.N., Emelyanov O.A. The dynamic characteristics of self-healing processes in metal film capacitors. *Russian Electrical Engineering*, 2007, vol.78, no. 3, pp. 138-172.

- [15] Emelyanov O.A., Electrodinamic Thermal Breakdown of a Capacitor Insulator. *Technical Physics*, 2011, vol. 56, no. 11, pp. 1685-1688.
- [16] Tortai J-H., Denat A., Bonifaci N. Self-healing of capacitors with metallized film technology: experimental observations and theoretical model. *Journal of Electrostatics*, 2001, vol. 53, no. 2, pp. 159-169.
- [17] Belko V.O., Emelyanov O.A. Rabotosposobnost' segmentirovannykh elektrodov sovremennykh metalloplenochnykh kondensatorov [Performance of modern metal-film capacitors' segmented electrodes]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU – St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Science and Technology*, 2007, vol. 3. pp. 32-40. (In Russian)
- [18] Li H., Li H., Li Z., Lin F., Wang W., Wang B., Huang X., Guo X. Temperature dependence of self-healing characteristics of metallized polypropylene film. *Microelectronics Reliability*, 2015, vol. 55, no. 12, pp. 2721-2726.
- [19] Makdessi M., Sari A., Venet P. Metallized polymer film capacitors ageing law based on capacitance degradation. *Microelectronics Reliability*, 2014, vol. 54, no. 9-10, pp. 1823-1827.
- [20] Rytöluoto I., Lahti K. New Approach to Evaluate Area-dependent Breakdown Characteristics of Dielectric Polymer Films. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2013, vol. 20, no. 3, pp.937-946.

Сведения об авторах:



Белько Виктор Олегович.

Кандидат технических наук, доцент каф. «Техника высоких напряжений, электроизоляционная и кабельная техника» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Область научных интересов: импульсная техника, накопители энергии, металлопленочные конденсаторы.

E-mail: vobelko@gmail.com



Емельянов Олег Аннатольевич, Кандидат технических наук, доцент каф. «Техника высоких напряжений, электроизоляционная и кабельная техника» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Область научных интересов: электрический взрыв проводников, электрические разряды, электрические конденсаторы.

E-mail: oaemel2@gmail.com



Иванов Иван Олегович

Аспирант каф. «Техника высоких напряжений, электроизоляционная и кабельная техника» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Область научных интересов: металлопленочные конденсаторы, компьютерное моделирование в электротехнике.

E-mail:

ivanov.eicc@yandex.ru