

Научная статья

УДК 621.319.4

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29207>



И.О. Иванов ✉, *Д.Ю. Гливенко*,
А.В. Печников, *А.А. Ходжамов*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

✉ ivanov.eicc@yandex.ru

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ И КАТАСТРОФИЧЕСКИЙ ОТКАЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТАЛЛОПЛЕНОЧНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ В УСЛОВИЯХ ПРЕДЕЛЬНЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ НАГРУЗОК

Аннотация. В данной работе предложена автоматизированная методика испытаний металлопленочных конденсаторов. Для реализации методики была разработана экспериментальная установка и разработано программное обеспечение для обработки полученных данных. Согласно предложенной методике были исследованы ПЭТФ и ПП конденсаторы различной конструкции и определены условия их отказов при работе в режимах с высокой электрической нагрузкой. Установлено, что в конденсаторах со сплошной металлизацией наблюдался параметрический отказ, связанный с ростом диэлектрических потерь или катастрофический отказ, обусловленный коротким замыканием обкладок. Параметрический отказ конденсаторов с сегментированной металлизацией связан со значительным снижением емкости вследствие интенсивного уменьшения площади электродов. Предложенный метод испытаний позволяет проводить "мягкую" тренировку конденсаторов для увеличения их энергоэффективности за счет повышения рабочей напряженности электрического поля.

Ключевые слова: металлопленочный конденсатор, самовосстановление, предельные эксплуатационные нагрузки, параметрический и катастрофический отказ, "мягкая" тренировка.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда проект № 19-79-10075

Для цитирования:

Иванов И.О., Гливенко Д.Ю., Печников А.В., Ходжамов А.А. Параметрический и катастрофический отказ современных металлопленочных конденсаторов в условиях предельных эксплуатационных нагрузок // Глобальная энергия. 2023. Т. 29, № 2. С. 117–128. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29207>



I.O. Ivanov ✉, D.Y. Glivenko,
A.V. Pechnikov, A.A. Hojamov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia

✉ ivanov.eicc@yandex.ru

PARAMETRIC AND CATASTROPHIC FAILURE OF METALLIZED FILM CAPACITORS IN ULTIMATE LOAD OPERATION CONDITIONS

Abstract. In this paper the automated ramp voltage test method for metallized film capacitors was suggested. This method was used to investigate the causes of capacitors failure under high electric load. For this purpose, experimental setup and software for experimental data processing were developed. The experimental investigation method was based on high voltage testing of different metallized film capacitor types. It was found that in the case of high electric load, capacitors failure is related to dielectric resistance decreasing due to multiple breakdown events. The conditions of parametric and catastrophic failures of the tested capacitors were revealed. The suggested test method also allows “soft” treatment of metallized film capacitors.

Keywords: metallized film capacitor, self-healing, ultimate load conditions, parametric and catastrophic failure, “soft” treatment.

Acknowledgements: The study was financially supported by the Russian Science Foundation Project No. 19-79-10075

Citation:

I.O. Ivanov, D.Y. Glivenko, A.V. Pechnikov, A.A. Hojamov, Parametric and catastrophic failure of metallized film capacitors in ultimate load operation conditions, *Global Energy*, 29 (02) (2023) 117–128, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29207>

Введение. Металлопленочные конденсаторы (МПК) широко являются ключевыми компонентами различного высоковольтного импульсного оборудования: генераторы импульсных напряжений и токов, генераторы перенапряжений, лазерные установки, ускорители частиц и других [1–5]. Широкое применение конденсаторов данного типа объясняется высоким значением удельной запасаемой энергии и высокой надежностью. Особенностью МПК является способность к самовосстановлению (СВ) – восстановлению работоспособности после электрического пробоя диэлектрика. В случае пробоя диэлектрика некоторая часть металлизации вблизи канала пробоя испаряется за счет протекающего разрядного тока, образуя зону деметаллизации площадью несколько десятков мм². Таким образом происходит изолирование места пробоя и восстановление работоспособности конденсатора [6–8]. Отдельным подвидом можно выделить МПК с сегментированными обкладками. В этом случае изолирование канала пробоя осуществляется за счет исключения поврежденного сегмента вместе с каналом пробоя. Схематическое изображение процесса самовосстановления и фотографии мест пробоя в МПК со сплошной и сегментированной металлизацией представлены на рис. 1 и 2.

В современных МПК в качестве диэлектрика используются металлизированные пленки из полипропилена (ПП), полиэтилентерефталата (ПЭТФ), полифениленсульфида (ПФС) и других. Металлизация, выполняющая роль обкладок конденсатора, имеет толщину 5 – 30 нм и выполне-

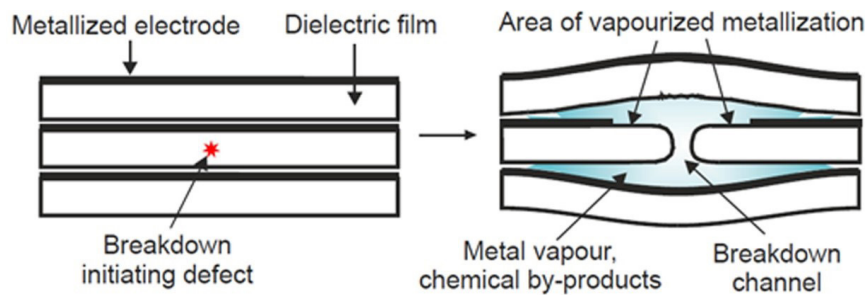


Рис. 1. Схематическое изображение процесса самовосстановления [9]

Fig. 1. Schematic representation of self-healing process [9]

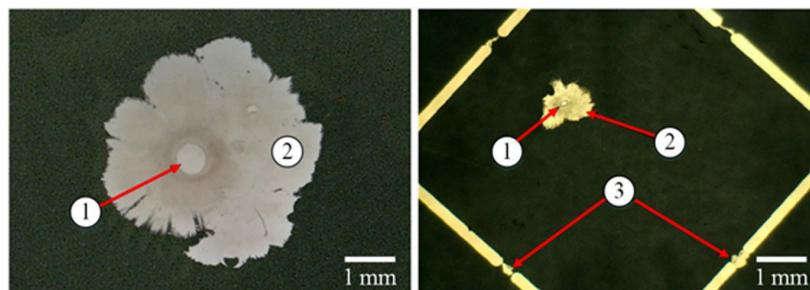


Рис. 2. Фотографии мест пробоя для МПК со сплошной (слева) и сегментированной (справа) металлизацией:

1 – канал пробоя; 2 – зона деметаллизации; 3 – соединительные мостики после перегорания

Fig. 2. Photographs of all-over (left) and segmented (right) metallization after self-healing:

1 – breakdown channel, 2 – demetallized zone, 3 – destroyed gates

на из алюминия, цинка или их комбинации. Более подробно о конструкции МПК и технологии производства можно узнать из публикаций отечественных и зарубежных авторов [8, 10–13].

Технологический процесс производства МПК заканчивается операцией «тренировки» – выдержки готовых изделий при напряжении, превышающим номинальное рабочее значение $U_{\text{ном}}$. Целью данной операции является устранение слабых или дефектных мест в конденсаторе за счет пробоя диэлектрика и последующего процесса самовосстановления. Согласно стандарту МЭК 61071 величина напряжения тренировки составляет $1.5 - 2.5 U_{\text{ном}}$, а параллельно тренируемому МПК должна подключаться дополнительная емкость, величина которой значительно больше емкости тренируемого МПК. В некоторых случаях, когда емкость тренируемого МПК достаточно велика (сотни мкФ), операция тренировки осуществляется без подключения дополнительной емкости [14]. Кроме этого, на этапе тренировки происходит отбраковка МПК, получивших критические повреждения.

Можно выделить 2 типа отказов МПК: параметрический и катастрофический. В первом случае критерием отказа является значимое изменение одного из параметров конденсатора. Как правило, значимым изменением емкости считается снижение на 5 % (в некоторых случаях 10 %) или увеличение тангенса угла диэлектрических потерь в 2 раза при заданной частоте (обычно 1 кГц). Производители МПК также указывают в технической документации гарантированное значение сопротивления изоляции изделия. Снижение сопротивления ниже указанного значения также можно считать параметрическим отказом. Во втором случае отказ МПК связан с коротким замыканием обкладок или нарушением контакта между обкладками и внешними выводами. Короткое замыкание обкладок происходит в результате множественных пробоев диэлектрика и

последующего образования проводящих каналов в результате самовосстановления. Нарушение контакта между обкладками и внешними выводами происходит по причине отгорания места соединения с металлизацией вследствие высокой токовой нагрузки [15–16].

Целью данной работы является определение типа отказа различных современных МПК при работе в режимах повышенной напряженности электрического поля.

Методика исследования

Объекты исследования

В экспериментальных исследованиях были использованы МПК из ПЭТФ и ПП пленок, толщиной 4 – 8 мкм. Номинальное рабочее напряжение исследуемых конденсаторов составляло 250 – 630 В, а емкость 0.1 – 1 мкФ. Конденсаторы имели сплошную или сегментированную металлизацию с сопротивлением $R_{\square} = 3 - 10$ Ом. В исходном состоянии исследуемые конденсаторы имели значение сопротивления изоляции $R_{ins0} = 40 - 100$ ГОм и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta = 3 \cdot 10^{-3}$ (ПЭТФ) и $4 \cdot 10^{-4}$ (ПП) при частоте 1 кГц. В табл. 1 представлены параметры исследуемых МПК.

Таблица 1

Параметры исследуемых конденсаторов

Table 1

Parameters of investigated capacitors

Номинальное напряжение, В	Емкость, мкФ	Вид пленки и ее толщина	Тип металлизации
250	0.22	ПП, 4 мкм	Al, сплошная
250	1	ПП, 4 мкм	Al, сплошная
250	1	ПЭТФ, 4 мкм	Al, сплошная
400	0.1	ПП, 6 мкм	Zn, сегмент.
400	0.47	ПП, 6 мкм	Zn, сегмент.
630	0.1	ПЭТФ, 8 мкм	Al, сплошная
630	0.47	ПЭТФ, 8 мкм	Al, сплошная
630	1	ПЭТФ, 8 мкм	Al, сплошная

Экспериментальная установка и методика эксперимента

Блок-схема экспериментальной установки изображена на рис. 3. Генератор сигналов и высоковольтный источник питания обеспечивали линейно-нарастающее напряжение на тестируемом конденсаторе. Резистор R с сопротивлением 2 Мом использовался для ограничения зарядного тока. Измерение напряжения на исследуемом конденсаторе осуществлялось с помощью цифрового осциллографа (Rohde & Schwarz RTB2004 2.5 Gs/s) и высоковольтного делителя напряжения (Keysight 10076C, 4 kVpk, 500 MHz). Использование функции сегментированной памяти обеспечивало непрерывную запись всех актов самовосстановления. Для измерения параметров исследуемых конденсаторов использовался цифровой анализатор импеданса (Hioki IM3570). Измерение емкости и диэлектрических потерь осуществлялось в частотном диапазоне 10 Гц – 1 МГц. Значение сопротивления изоляции конденсаторов измерялось с помощью тераомметра E6-13M, позволяющего проводить измерения в диапазоне 10 кОм – 10 Том при напряжении до 1 кВ.

Напряжение на тестируемом конденсаторе поднималось до начального испытательного значения, как правило составляющее $2 U_{ном}$, после чего осуществлялась выдержка под напряжением

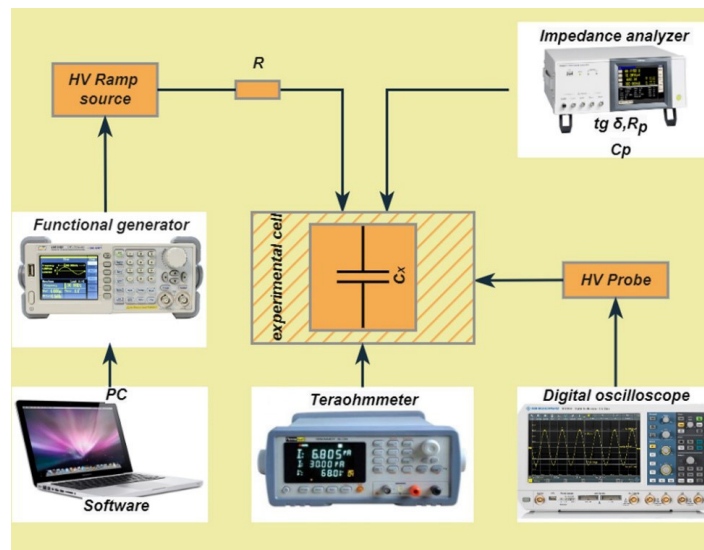


Рис. 3. Блок-схема экспериментальной установки

Fig. 3. Block diagram of the experimental setup

в течение 2 мин. Далее происходило отключение напряжения и разрядка исследуемого конденсатора, после чего осуществлялось измерение электрических параметров. Данный испытательный цикл повторялся при более высоком напряжении до наступления параметрического или катастрофического отказа. Главным отличием данного метода от стандарта МЭК является отсутствие дополнительной емкости, подключаемой параллельно тестируемому конденсатору.

Для каждого акта определялась энергия СВ – часть запасенной энергии конденсатора, которая рассеивается в канале пробоя. Энергия СВ определяется выражением

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

где C_X – емкость исследуемого конденсатора, U_{BD} – начальное напряжение СВ (напряжение пробоя диэлектрика), U_{RES} – конечное напряжение СВ (напряжение завершения СВ). Пример осциллограммы напряжения представлен на рис. 4.

Зависимость импульса тока в процессе самовосстановления рассчитывалась из осциллограммы напряжения $U(t)$ с помощью выражения

$$I_{SH}(t) = C_X \frac{dU(t)}{dt}. \quad (2)$$

Обработка экспериментальных данных

Полученные осциллограммы и частотные спектры параметров конденсаторов обрабатывались с использованием специально разработанного программного обеспечения на базе языка программирования Python. Программа позволяет рассчитывать зависимость тока и энергию СВ для каждого зарегистрированного акта самовосстановления.

Блок-схема, поясняющая работу программы изображена на рис. 5. Согласно формуле (1) для расчета энергии СВ необходимо определить начальное и конечное напряжения СВ. Для этого используются осциллограммы напряжения с периодом дискретизации $\Delta t = 10^{-5} - 10^{-3}$ с в формате CSV. Следует отметить, что каждая записанная осциллограмма может содержать несколь-

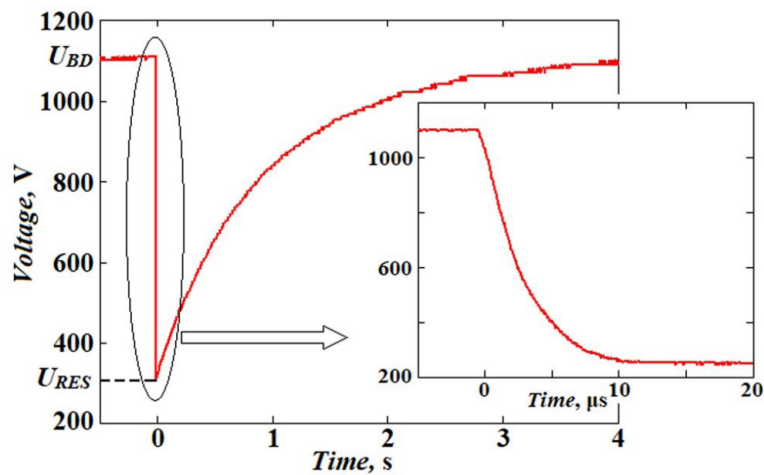


Рис. 4. Пример осциллограммы напряжения [17]

Fig. 4. The example of voltage waveform [17]

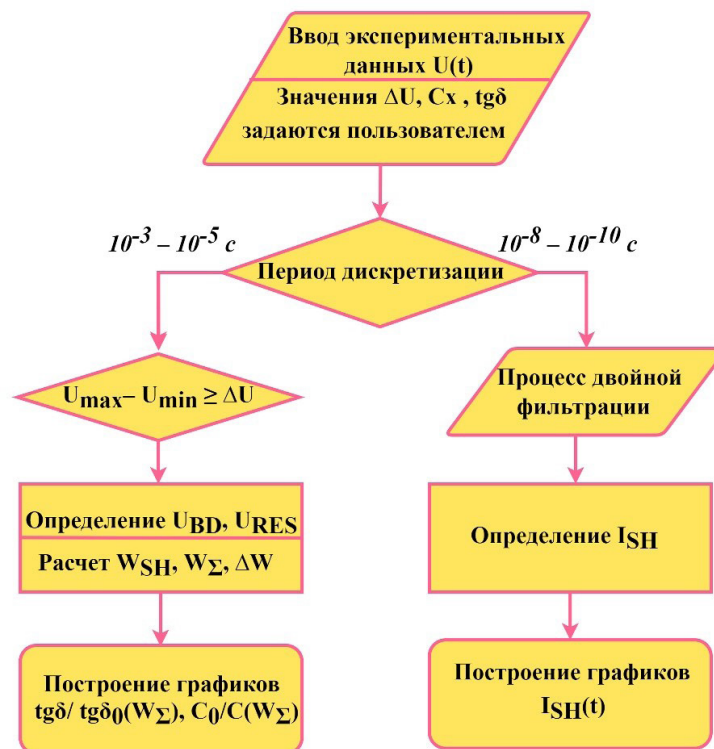


Рис. 5. Блок-схема программы для обработки экспериментальных данных

Fig. 5. Блок-схема программы для обработки экспериментальных данных

ко актов самовосстановления. Для нахождения локальных экстремумов используется функция *signal.find_peaks* из библиотеки *SciPy*. Для корректного определения точек пробоя на записанных осциллограммах пользователь задает минимальное значение разности напряжения $\Delta U = U_{BD} - U_{RES}$. Изменение напряжения на величину менее, чем величина ΔU не учитываются при определении значений U_{BD} и U_{RES} . После обработки набора осциллограмм происходит

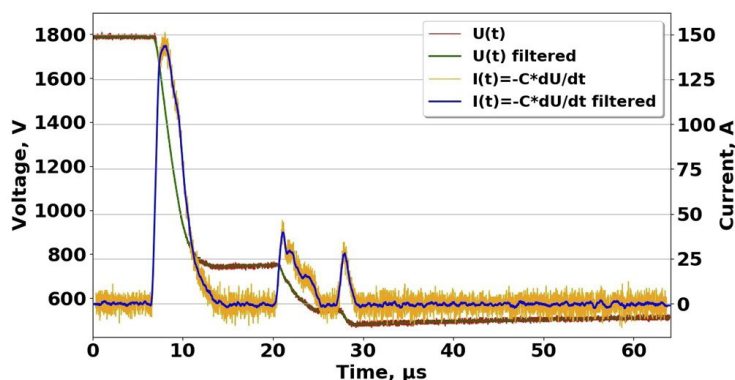


Рис. 6. Пример обработки экспериментальных данных

Fig. 6. The example of experimental data processing

построение зависимости энергии СВ от величины пробивного напряжения $W_{SH}(U_{BD})$. Значения емкости и диэлектрических потерь, измеренные на каждом шаге экспериментального исследования, используются для построения зависимостей данных параметров от величины суммарной энергии СВ (энергии всех актов СВ на момент измерения параметра конденсатора) $C_x(W_\Sigma)$ и $\text{tg } \delta(W_\Sigma)$. Для расчета зависимостей тока СВ $I_{SH}(t)$ по формуле (2) используются осциллограммы напряжения с периодом дискретизации $\Delta t = 10^{-10} - 10^{-8}$ с.

Для качественной визуализации записанных осциллограмм напряжения и рассчитанных зависимостей тока СВ используется сглаживание полученных данных с помощью фильтра Савицкого-Голея. Данная операция выполняется функцией *signal.savgol_filter* из библиотеки *SciPy*. Зависимости $I_{SH}(t)$ получаются путем дифференцирования сглаженных зависимостей напряжения $U(t)$ с помощью функции *gradient* из библиотеки *NumPy*. Максимальное значение тока СВ из зависимости $I_{SH}(t)$ определяется также с помощью функции *signal.find_peaks*. Для графической визуализации полученных результатов и сохранения их в виде документа MS Excel, а также в виде изображения в формате JPEG используется библиотека *Matplotlib*. Пример обработки экспериментальных данных представлен на рис. 6.

Результаты экспериментальных исследований

Для определения работоспособности МПК в режимах с высокой напряженностью электрического поля и сравнения различных моделей МПК используются зависимости энергии СВ от величины пробивного напряжения, изменения емкости и диэлектрических потерь от суммарной энергии СВ. Графики зависимостей $W_{SH}(U_{BD})$, $C_x(W_\Sigma)$ и $\text{tg } \delta(W_\Sigma)$ для одного из исследуемых типов МПК представлены на рис. 7–9.

Полученные зависимости $W_{SH}(U_{BD})$ имеют степенной характер с показателем степени 2.2 – 2.6. Зависимости $C_x(W_\Sigma)$ и $\text{tg } \delta(W_\Sigma)$ имеют линейный и степенной характер соответственно. Полученные результаты согласуются с ранее проводимыми исследованиями в данном направлении [7, 17].

В ходе исследований установлено, что параметрический отказ МПК со сплошной металлизацией связан со значительным увеличением диэлектрических потерь. Для исследуемых конденсаторов наблюдалось увеличение $\text{tg } \delta$ в 3 – 6 раз, при этом снижение емкости не превышало 5 %. При дальнейшем увеличении напряжения наблюдался катастрофический отказ тестируемых конденсаторов, связанный с коротким замыканием обкладок. Также установлено, что значение напряжения, при котором начинают интенсивно развиваться процессы самовосстановления, составляет 1.5 – 2 кВ для исследуемых типов МПК. При этом минимальное значение энергии СВ составляет 60 – 100 мДж для каждого акта. В экстремальных случаях, когда уровень напряжения

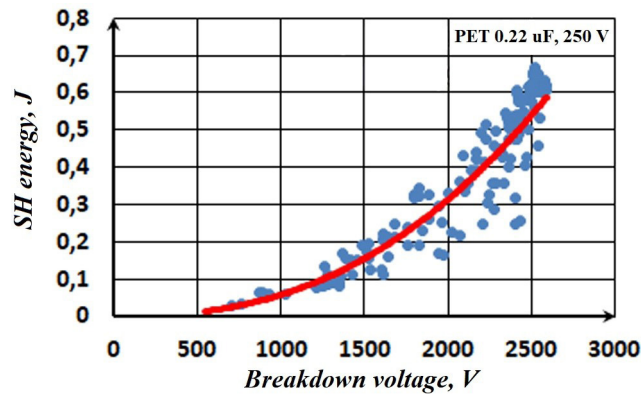


Рис. 7. Пример зависимости энергии СВ от величины пробивного напряжения
 Fig. 7. Typical dependence of SH energy versus breakdown voltage

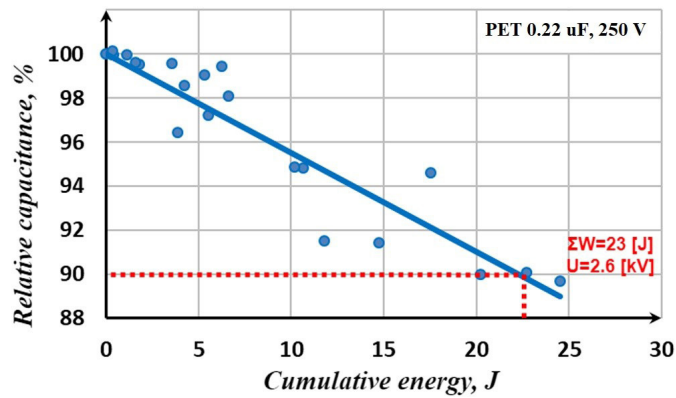


Рис. 8. Пример зависимости изменения емкости от величины суммарной энергии СВ
 Fig. 8. Typical dependence of relative capacitance changing during testing

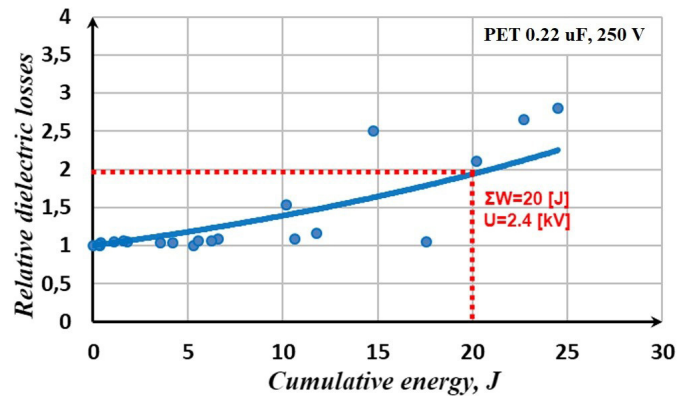


Рис. 9. Пример зависимости изменения диэлектрических потерь от величины суммарной энергии СВ
 Fig. 9. Typical dependence of relative dielectric losses changing during testing

близок к предельному значению, энергия единичного акта СВ может достигать 700 мДж, что часто приводит к критическим повреждениям конденсатора.

В случае МПК с сегментированной металлизацией параметрический отказ связан со значительным снижением емкости. При снижении емкости исследуемых конденсаторов на 10 % на-

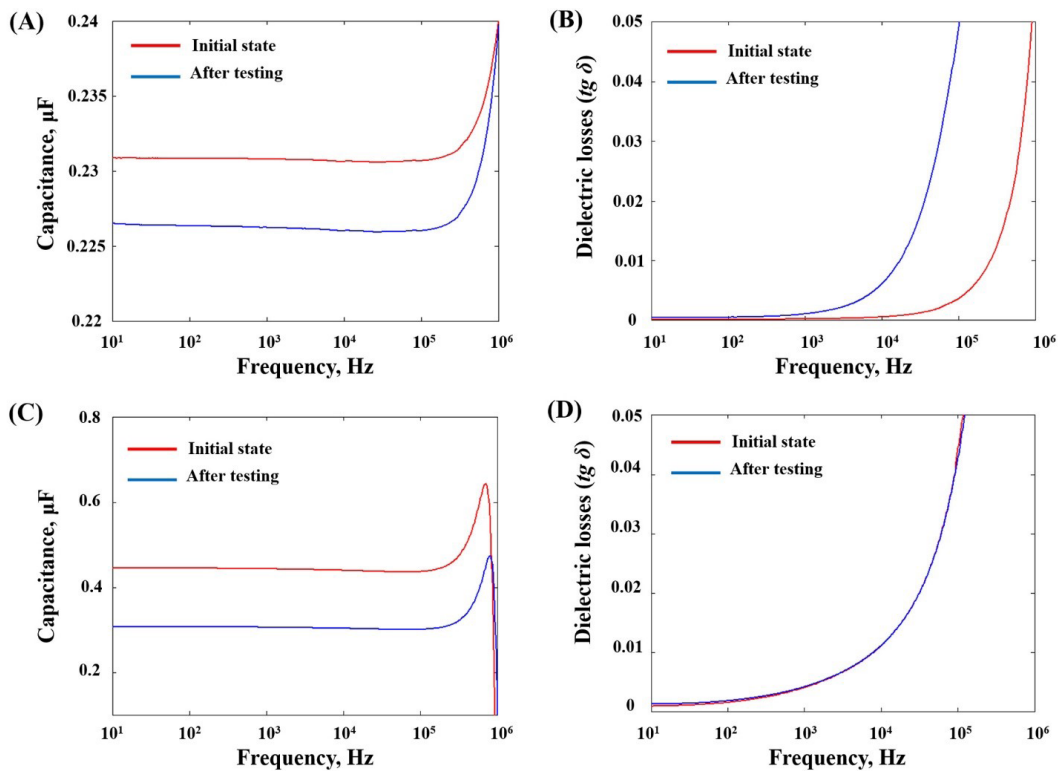


Рис. 10. Примеры измеренных частотных зависимостей емкости и диэлектрических потерь. А, В – МПК со сплошной металлизацией; С, D – МПК с сегментированной металлизацией

Fig. 10. Typical frequency dependencies of capacitance and dielectric losses.

A, B – MFC with all-over metallization; C, D – MFC with segmented metallization

блюдалось увеличение $\text{tg } \delta$ не более, чем на 20 %. При дальнейшем увеличении напряжения происходило еще большее снижение емкости при том же уровне диэлектрических потерь, а катастрофический отказ не наблюдался. При пробое диэлектрика в конденсаторах с сегментированной металлизацией энергия СВ не превышала значения 30 мДж. Таким образом, была подтверждена эффективность использования сегментированных электродов для ограничения энергии СВ.

На рис. 10 представлены примеры измеренных частотных зависимостей емкости и диэлектрических потерь. Видно, что процесс деградации в конденсаторах со сплошной металлизацией сопровождается снижением емкости и увеличением диэлектрических потерь во всем частотном диапазоне. Конденсаторы с сегментированной металлизацией имеют более интенсивное снижение емкости и практически одинаковые частотные зависимости $\text{tg } \delta$ до и после тестирования.

Исследования закономерностей отказа МПК также позволили определить допустимый уровень напряжения для тренировки, то есть такого напряжения, при котором не происходит параметрического или катастрофического отказа в течении продолжительного временного интервала. Для исследуемых типов конденсаторов данное значение напряжения составляет $2 - 3 U_{\text{ном}}$, что соответствует напряженности электрического поля в диэлектрике 80 – 120 кВ/мм. Проведение так называемой «мягкой» тренировки МПК (без использования дополнительной емкости) до установленного допустимого значения позволяет эксплуатировать изделия при повышенном напряжении и повысить их удельную энергию до уровня 0.15 – 0.3 Дж/см³. Безусловно, повышение рабочего напряжения отразится на ресурсе конденсаторов. Предварительные ресурсные испытания показали, что в течении 100 часов при данном уровне повышения рабочего напряжения в конденсаторах не происходят повреждения, приводящие к параметрическому или катастрофическому отказу.

Заключение

В данной работе была передоложена автоматизированная методика испытаний металлопленочных конденсаторов. Для реализации методики была разработана экспериментальная установка и разработано программное обеспечение для обработки полученных данных. Согласно предложенной методике были исследованы ПЭТФ и ПП конденсаторы различной конструкции.

В ходе исследований были определены типы отказа конденсаторов различной конструкции. В конденсаторах со сплошной металлизацией наблюдался параметрический отказ, связанный с ростом диэлектрических потерь или катастрофический отказ, обусловленный коротким замыканием обкладок. Параметрический отказ конденсаторов с сегментированной металлизацией связан со значительным снижением емкости вследствие уменьшения площади электродов, вызванного изолированием поврежденных сегментов. При этом в конденсаторах данного типа не наблюдался катастрофический отказ даже при потере емкости более 30 %.

Для исследуемых конденсаторов установлено допустимое максимальное напряжение «мягкой» тренировки, которое составляет $2 - 3 U_{ном}$. Показано, что после проведения данной технологической операции возможна эксплуатация изделий при повышенном напряжении, что увеличивает их энергоэффективность.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Hauschild W., Lemke E. High-Voltage Test and Measuring Techniques, 1st ed. Springer: Berlin, Germany, 2014.
- [2] Ryan H.M. High-Voltage Engineering and Testing, 3rd ed. The Institution of Engineering and Technology, London, UK, 2013.
- [3] Fazio M.V., Kirbie H.C. Ultracompact pulsed power // Proceedings of the IEEE, 92 (7) (2004) 1197–1204.
- [4] Welch D.F. A brief history of high-power semiconductor lasers // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 6 (6) (2000) 1470–1477.
- [5] Sarjeant W.J., Zirnheld J., MacDougall F.W. Capacitors // IEEE Transactions on Plasma Science, 26 (5) (1998) 1368–1392.
- [6] Li H., Li Z., Lin F., Jiang H., Fang T., Zhang Q. Threshold Current Density of Metallized Film Under Multiple Current Pulses // IEEE Transactions on Plasma Science, 48 (7) (2020) 2523–2530.
- [7] Belko V.O., Emelyanov O.A., Ivanov I.O., Plotnikov A.P. Self-Healing Processes of Metallized Film Capacitors in Overload Modes—Part 1: Experimental Observations // IEEE Transactions on Plasma Science, 49 (5) (2021) 1580–1587.
- [8] Belko V., Glivenko D., Emelyanov O., Ivanov I., Plotnikov A. Current pulse polarity effect on metallized film capacitors failure // IEEE Transactions on Plasma Science, 45 (6) (2017) 1020–1025.
- [9] Rytoluoto I., Lahti K. New approach to evaluate area-dependent breakdown characteristics of dielectric polymer films // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 20 (3) (2013) 937–946.
- [10] Gnonhoue O.G., Velazquez-Salazar A., David É., Preda I. Review of technologies and materials used in high-voltage film capacitors // Polymers, 13 (5) (2021) 766.
- [11] Tan D.Q. Review of Polymer-Based Nanodielectric Exploration and Film Scale-Up for Advanced Capacitors // Advanced Functional Materials, 30 (18) (2020) 1808567.
- [12] Ho J., Jow T.R., Boggs S. Historical introduction to capacitor technology // IEEE Electrical Insulation Magazine, 26 (1) (2010) 20–25.
- [13] Belko V.O., Emelyanov O.A., Ivanov I.O., Plotnikov A.P., Feklistov E.G. Application of Numerical Simulation for Metallized Film Capacitors Electrodes Design // IEEE Access, 9 (2021) 80945–80952.

[14] International Standard IEC 61071 “Capacitors for power electronics”. Режим доступа: https://webstore.iec.ch/preview/info_iec61071%7Bed2.0%7Db.pdf (дата обращения: 30.03.2023).

[15] **Gupta A., DeVoto D., Yadav O.P., Major J.** A review of degradation behavior and modeling of capacitors // ASME 2018 International Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Microsystems (2018) 1–10.

[16] **Lv Ch., Liu J., Zhang Y., Yin J., Cao R., Li Y., Liu X.** A Method to Characterize the Shrinking of Safe Operation Area of Metallized Film Capacitor Considering Electrothermal Coupling and Aging in Power Electronics Applications // IEEE Transactions on Industrial Electronics, 70 (2) (2023) 1993–2002.

[17] **Belko V., Ivanov I., Plotnikov A., Belanov V.** Energy characteristics of self-healing process in metallized // International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (2019) 1–4.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ИВАНОВ Иван Олегович — доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: ivanov.eicc@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6352-6187>

ГЛИВЕНКО Дмитрий Юрьевич — аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: dmitry141094@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3524-4120>

ПЕЧНИКОВ Алексей Владимирович — инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: pechnikov_av@spbstu.ru

ХОДЖАМОВ Ахмет Аннаоразович — инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: akhodzhamov@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5523-8281>

REFERENCES

[1] **W. Hauschild, E. Lemke**, High-Voltage Test and Measuring Techniques, 1st ed. Springer: Berlin, Germany, 2014.

[2] **H.M Ryan**, High-Voltage Engineering and Testing, 3rd ed. The Institution of Engineering and Technology, London, UK, 2013.

[3] **M.V. Fazio, H.C. Kirbie**, Ultracompact pulsed power // Proceedings of the IEEE, 92 (7) (2004) 1197–1204.

[4] **D.F. Welch**, A brief history of high-power semiconductor lasers // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 6 (6) (2000) 1470–1477.

[5] **W.J. Sarjeant, J. Zirnheld, F. W. MacDougall**, Capacitors // IEEE Transactions on Plasma Science, 26 (5) (1998) 1368–1392.

[6] **H. Li, Z. Li, F. Lin, H. Jiang, T. Fang, Q. Zhang**, Threshold Current Density of Metallized Film Under Multiple Current Pulses // IEEE Transactions on Plasma Science, 48 (7) (2020) 2523–2530.

- [7] V.O. Belko, O.A. Emelyanov, I.O. Ivanov, A.P. Plotnikov, Self-Healing Processes of Metallized Film Capacitors in Overload Modes—Part 1: Experimental Observations // IEEE Transactions on Plasma Science, 49 (5) (2021) 1580–1587.
- [8] V. Belko, D. Glivenko, O. Emelyanov, I. Ivanov, A. Plotnikov, Current pulse polarity effect on metalized film capacitors failure // IEEE Transactions on Plasma Science, 45 (6) (2017) 1020–1025.
- [9] I. Rytoluoto, K. Lahti, New approach to evaluate area-dependent breakdown characteristics of dielectric polymer films // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 20 (3) (2013) 937–946.
- [10] O.G. Gnonhoue, A. Velazquez-Salazar, É. David, I. Preda, Review of technologies and materials used in high-voltage film capacitors // Polymers, 13 (5) (2021) 766.
- [11] D.Q. Tan, Review of Polymer-Based Nanodielectric Exploration and Film Scale-Up for Advanced Capacitors // Advanced Functional Materials, 30 (18) (2020) 1808567.
- [12] J. Ho, T. R. Jow, S. Boggs, Historical introduction to capacitor technology // IEEE Electrical Insulation Magazine, 26 (1) (2010) 20–25.
- [13] V.O. Belko, O.A. Emelyanov, I.O. Ivanov, A.P. Plotnikov, E.G. Feklistov, Application of Numerical Simulation for Metallized Film Capacitors Electrodes Design // IEEE Access, 9 (2021) 80945–80952.
- [14] International Standard IEC 61071 “Capacitors for power electronics”, https://webstore.iec.ch/preview/info_iec61071%7Bed2.0%7Db.pdf. Accessed March 30, 2023.
- [15] A. Gupta, D. DeVoto, O.P. Yadav, J. Major, A review of degradation behavior and modeling of capacitors // ASME 2018 International Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Microsystems (2018) 1–10.
- [16] Ch. Lv, J. Liu, Y. Zhang, J. Yin, R. Cao, Y. Li, X. Liu, A Method to Characterize the Shrinking of Safe Operation Area of Metallized Film Capacitor Considering Electrothermal Coupling and Aging in Power Electronics Applications // IEEE Transactions on Industrial Electronics, 70 (2) (2023) 1993–2002.
- [17] V. Belko, I. Ivanov, A. Plotnikov, V. Belanov, Energy characteristics of self-healing process in metallized // International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (2019) 1–4.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Ivan O. IVANOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: ivanov.eicc@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6352-6187>

Dmitry Y. GLIVENKO – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: dmitry141094@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3524-4120>

Alexey V. PECHNIKOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: pechnikov_av@spbstu.ru

Ahmet A. HOJAMOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: akhodzhamov@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5523-8281>

Поступила: 29.03.2023; Одобрена: 29.04.2023; Принята: 05.05.2023.
Submitted: 29.03.2023; Approved: 29.04.2023; Accepted: 05.05.2023.