

Efficiency Investigation of Metallized Film Capacitor Electrodes Segmentation Patterns

Ivanov I.O., Belko V.O., Glivenko D.Y., Feklistov E.G., Kulbako K.A.

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

Abstract. The results of theoretical efficiency investigation of metallized film capacitor electrodes segmentation patterns are presented in this article. The aim of present investigation was the most effective patterns configuration determination using by numerical simulation method. The experimental investigation method of metallized film capacitor electrodes electrodynamic destruction was developed to reach the needed scope. This method differs from the known methods by using samples of metallized polymer film with different segmentation patterns instead of real capacitors. Based on experimental results the numerical model of segmented electrodes electrodynamic destruction was developed using by COMSOL Multiphysics software. This numerical model allows to investigate different segmentation pattern's efficiency during self-healing process (recovery of operating ability after dielectric breakdown) and to determine metallization's electrical parameters without experimental investigations. Existing and novel types of segmented electrodes for metallized film capacitors were investigated. The dependence of electrodynamic destruction energy, i.e. energy needed to breakdown channel isolating, versus destruction time was used as a criterion of segmentation pattern efficiency. Advantages and disadvantages of investigated electrodes segmentation types were determined. The most important result is the best pattern configuration determination. It was found that bridge-diamond segmentation is the most effective patterns configuration for metallized film capacitor's application. The significance of the obtained results is practical application in capacitor's manufacturing ability. The developed numerical model and investigation results can be used in design of new metallized film capacitors types with high specific characteristics.

Keywords: metallized film capacitor, segmented electrodes, self-healing, electrodynamic destruction, numerical simulation.

DOI: 10.5281/zenodo.4018908

UDC: 621.319.4

Studiul eficienței electrozilor segmentați ai condensatorilor cu film metalizat

Ivanov I.O., Belko V.O., Glivenko D.Yu., Feklistov E.G., Kulbako K.A.

Universitatea Politehnica din Sankt Petersburg Petru cel Mare
Sankt Petersburg, Federația Rusă

Rezumat. Articolul prezintă rezultatele studiilor teoretice privind eficiența electrozilor segmentați ai condensatorilor cu film metalizat. Scopul acestei lucrări a fost de a determina cea mai eficientă configurație a electrozilor segmentați folosind metode de simulare numerică. Pentru a atinge acest obiectiv, a fost dezvoltată o tehnică pentru studiul experimental al distrugerii electrodinamice a electrozilor condensatorilor de film metalizat. Metoda propusă diferă de metodele cunoscute pentru studierea electrozilor condensatorilor prin utilizarea eșantioanelor de filme din polimer metalizat cu structuri de segmentare diferite în loc de condensatori reali. Pe baza datelor experimentale obținute, a fost dezvoltat un model numeric de distrugere electrodinamică a electrozilor segmentați utilizând pachetul software COMSOL Multiphysics. Acest model face posibilă investigarea eficienței diferitelor tipuri de electrozi segmentați în procesul de auto-vindecare (restabilirea robusteții după străpungerea dielectricului), precum și determinarea parametrilor electrici ai metalizării fără efectuarea studiilor experimentale. În lucrare s-au investigat noile tipuri existente și propuse de electrozi segmentați pentru condensatori de film metalizat. Dependența energiei de distrugere electrodinamică, adică energia cheltuită pentru izolarea canalului de avarie, în funcție de durata procesului de distrugere a fost utilizată ca criteriu pentru evaluarea eficacității. Au fost identificate avantajele și dezavantajele tipurilor examinate de segmentare ale electrozilor. Cel mai semnificativ rezultat constă în determinarea celei mai eficiente configurații a electrozilor segmentați pentru utilizare în condensatoarele cu electrozi metalizați. Semnificația rezultatelor obținute constă în faptul, că modelul numeric dezvoltat, precum și rezultatele obținute în cursul cercetării, pot fi utilizate la proiectarea de noi tipuri de condensatori cu film metalizat cu caracteristici specifice majorate.

Cuvinte-cheie: condensator cu film metalizat, electrozi segmentați, auto-vindecare, defecțiune electrodinamică, simulare numerică.

Исследование эффективности сегментированных электродов металлопленочных конденсаторов**Иванов И.О., Белько В.О., Гливенко Д.Ю., Феклистов Е.Г., Кульбако К.А.**

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. В статье представлены результаты теоретических исследований эффективности сегментированных электродов металлопленочных конденсаторов. Целью данной работы было определение наиболее эффективной конфигурации сегментированных электродов с помощью методов численного моделирования. Для достижения поставленной цели была разработана методика экспериментального исследования электродинамического разрушения электродов металлопленочных конденсаторов. Данная методика отличается от известных методов исследования конденсаторных электродов использованием образцов металлизированной полимерной пленки с различной структурой сегментации вместо реальных конденсаторов. На основании полученных экспериментальных данных с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics была разработана численная модель электродинамического разрушения сегментированных электродов. Данная модель позволяет исследовать эффективность различных типов сегментированных электродов в процессе самовосстановления (восстановление работоспособности после пробоя диэлектрика), а также определять электрические параметры металлизации без проведения экспериментальных исследований. В работе были исследованы существующие и предложены новые типы сегментированных электродов для металлопленочных конденсаторов. В качестве критерия оценки эффективности была использована зависимость энергии электродинамического разрушения, то есть энергии затраченной на изолирование канала пробоя, от времени разрушения. Были определены преимущества и недостатки рассмотренных типов сегментаций. Наиболее существенным результатом является определение наиболее эффективной конфигурации сегментированных электродов для использования в металлопленочных конденсаторах. Такой конфигурацией является сегментация с квадратными элементами и соединительными мостиками. Значимость полученных результатов состоит в том, что разработанная численная модель, а также полученные в ходе исследований результаты могут быть использованы при проектировании новых типов металлопленочных конденсаторов с повышенными удельными характеристиками.

Ключевые слова: металлопленочный конденсатор, сегментированные электроды, самовосстановление, электродинамическое разрушение, численное моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Тенденция развития электрических конденсаторов направлена на увеличение их удельной энергии. Из всех типов конденсаторов наибольшим значением удельной энергии (до 4 Дж/см³) обладают металлопленочные конденсаторы (МПК). Высокое значение удельной запасаемой энергии и высокий показатель надежности определяют области применения конденсаторов данного типа от низковольтных бытовых приборов до высоковольтного и высокомоощного оборудования [1-5].

Конструкция МПК хорошо известна. В общем случае МПК представляют собой две полимерные пленки с алюминиевой или цинковой металлизацией, которые наматываются на оправку, образуя цилиндрическую секцию. На торцы секции напыляется металл (шоопировка) для создания электрического контакта с металлизацией. В качестве металла для шоопировки используются цинк, олово и сплавы на их основе. Существуют также плоско-спрессованные конденсаторные секции и, как отдельный тип МПК, пленочные чип-конденсаторы [6-8].

Известно, что удельная запасаемая энергия конденсатора пропорциональна значению относительной диэлектрической проницаемости ϵ_r и квадрату приложенного напряжения U . Первый способ увеличения удельной энергии – использование диэлектрических материалов с более высоким значением относительной диэлектрической проницаемости. В настоящее время практически все выпускаемые в мире МПК изготовлены на основе пленок из полипропилена (PP) и полиэтилен-терефталата (PET). Не смотря на сравнительно невысокое значение относительной диэлектрической проницаемости ($\epsilon_r = 2.2$ и 3.3 соответственно), данные пленки обладают низкими диэлектрическими потерями ($tg\delta=10^{-3}-10^{-4}$) и высокой электрической прочностью ($E_{BD} = 500 - 700$ kV/mm) [9-11]. Другие полимерные пленки ($\epsilon_r \geq 10$), такие как сополимеры поливинилиденфторида (PVDF) или гибридные пленки, состоящие из нескольких различных пленок, соединенных между собой методом горячего прессования с последующей протяжкой, не нашли широкого применения ввиду сложности их изготовления и высокой стоимости конечного продук-

та. Исследованию в данном направлении посвящены работы авторов *Rahimabady M., Jiang J., Liu F., Wang Y., Zhang L., Thabet A.* и других [12-17]. Другим более перспективным направлением является использование композиционных материалов. Такие материалы изготавливают из традиционных PP или PET пленок с добавлением неорганических диэлектрических материалов, таких как SiO_2 , BaTiO_3 , Al_2O_3 и других. В данном направлении выполнено много исследовательских работ и получены образцы материалов, неуступающие по своим характеристикам традиционным пленкам. Стоит отметить работы в данной области авторов *Hao X., Zhou Y., Li Q., Thabet A.* и других [17-19].

Увеличение значения рабочего напряжения конденсаторов – другой способ увеличения удельной энергии. Главным преимуществом МПК по сравнению с другими типами конденсаторов является способность к самовосстановлению (СВ), то есть восстановлению работоспособности после пробоя диэлектрика. Исследованию процессов СВ в МПК посвящены работы *Li H., Lin F., Makdessi M., Sari A., Venet P.* [20-22]. Использование сегментированных электродов позволяет увеличить рабочую напряженность электрического поля до 200 – 250 kV/mm, что в 2 и более раз выше по сравнению со сплошной металлизацией. В этом случае электроды конденсаторов разделены на маленькие сегменты, соединенные между собой узкими мостиками. При пробое диэлектрика под действием тока происходит нагрев и испарение соединительных мостиков. Такая геометрия электродов позволяет быстро изолировать канал пробоя путем исключения одного из сегментов и минимизировать повреждения конденсатора. Сегментированные электроды также обладают некоторыми недостатками: повышенная напряженность электрического поля на краю металлизации и снижение общей емкости конденсатора. Оптимизация геометрии сегментированных электродов позволяет увеличить рабочую напряженность электрического поля и повысить надёжность МПК. Эффективным инструментом для решения данной задачи является численное моделирование.

Как правило эффективность сегментированной металлизации исследуется для конденсатора в целом, что опубликовано в ряде рассмотренных работ. Отличием представленной работы является то, что в ней иссле-

дованы модельные образцы, имитирующие часть конденсатора, при этом получена большая выборка экспериментальных данных. Данные о сравнении различных типов сегментированных электродов практически отсутствуют в литературных источниках.

I. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальное исследование электротеплового разрушения проводилось на образцах полипропиленовой пленки толщиной 7 μm с Zn сегментированной металлизацией толщиной 20 nm.

Для имитации процесса СВ потенциальный электрод располагался на краю образца, а сферический заземленный электрод устанавливался в середине образца. Для соблюдения условий теплоотвода, соответствующим реальным конденсаторам, сверху закреплялась дополнительная пленка (рис. 1). С помощью генератора прямоугольных импульсов происходила имитация пробоя пленки, сопровождающаяся электротепловым разрушением соединительных мостиков. Варьируя амплитудой импульсов напряжения, создавались различные длительности электротеплового разрушения.

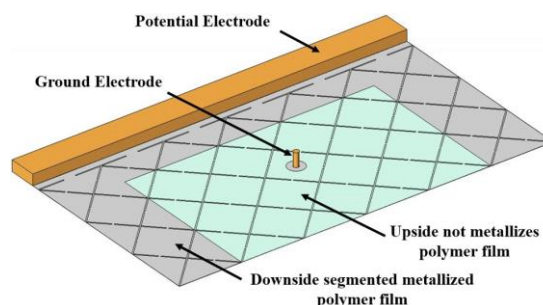


Рис. 1. Вид экспериментального образца с расположенными электродами и дополнительной пленкой. ¹

Так как в данной работе использовались модельные образцы, не было необходимости в использовании высокого напряжения для пробоя полимерной пленки. Амплитуда импульсов напряжения варьировалась в пределах 60 – 150 V, что обеспечивало плотность тока в соединительных мостиках, соответствующую реальным процессам СВ.

Результаты экспериментальных исследований представлены в работе *I. Ivanov, K. Voloshin, K. Kulbako* «Modeling of metallized film capacitors segmented electrodes electrodynamic

¹ Appendix 1

destruction» (IEEE 3rd International Conference on Dielectrics, 2020).

II. РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ

Расчетная модель электродинамического разрушения была разработана с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics. В модели были использованы модули «Electric Currents in Shells» и «Heat Transfer in Solids». Для правильного учета всех тепловых потоков во всех направлениях использовалась трехмерная геометрия модели. Для расчета были использованы уравнения поля токов и уравнение теплопроводности:

$$\begin{aligned} \nabla J &= 0 \\ E &= -\nabla \varphi, \\ J &= \gamma(T)E \end{aligned} \quad (1)$$

$$\rho(T)C(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda(T) \cdot \nabla^2 T + Q_v, \quad (2)$$

где J – плотность тока, E – напряженность электрического поля, φ – электростатический потенциал, $\sigma(T)$, $\lambda(T)$, $\rho(T)$, $C(T)$ – удельная электропроводность, удельная теплопроводность, плотность и удельная теплоемкость, T – температура, Q_v – объемное тепловыделение.

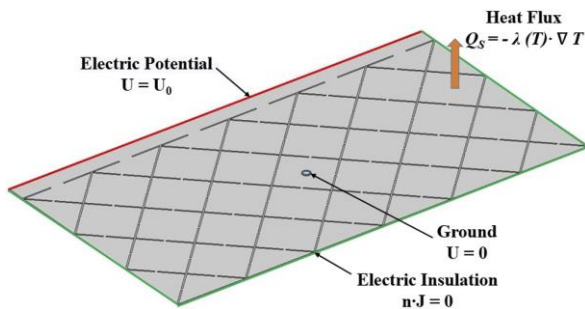


Рис. 2. Пример геометрии расчетной модели и граничные условия.²

Разработанная численная модель учитывает температурные зависимости электрических и тепловых параметров материалов, влияние толщины металлизации на значение удельной проводимости, а также скрытую теплоту плавления и испарения.

Граничные условия при расчете поля токов были электрический потенциал на одной из граней, нулевой потенциал в месте пробоя и нулевой заряд на остальных гранях, включая грани между отдельными сегментами. Пример геометрии расчетной модели и граничные условия изображены на рис. 2.

Фазовый переход и испарение металлизации рассчитывались с помощью заданного изменения физических свойств материала. При достижении температуры испарения металлизации T_{ev} , электро и теплопроводность металлизации существенно уменьшались:

$$\gamma_{Me} = \begin{cases} \gamma(T), & T < T_{ev} \\ 1 \text{ S/m}, & T \geq T_{ev} \end{cases}, \quad (3)$$

$$\lambda_{Me} = \begin{cases} \lambda(T), & T < T_{ev} \\ 10^{-2} \text{ W/(m·K)}, & T \geq T_{ev} \end{cases}. \quad (4)$$

Скрытая теплота плавления и испарения учитывались в расчетной модели с помощью добавления условия «Irreversible Transformation condition». Данное условие необходимо для исключения обратного перехода материала в твердое состояние в зоне деметаллизации.

Численный расчет электродинамического разрушения конденсаторных электродов требует значительных вычислительных ресурсов. Разработанная расчетная модель включает в себя более $5 \cdot 10^5$ дифференциальных уравнений в частных производных с нелинейными коэффициентами. Дополнительную сложность расчета создает моделирование фазового перехода, а именно быстрое изменение физических параметров материалов. Поэтому численное моделирование осуществлялось с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютерного центра «Политехнический».

В данной работе было исследовано электродинамическое разрушение четырех типов сегментированных электродов: металлизация с квадратными сегментами и соединительными мостиками (bridge-diamond), металлизация с треугольными сегментами и соединительными мостиками (bridge-triangular), гибридная металлизация с квадратными сегментами (hybrid-diamond) и гибридная металлизация с треугольными сегментами (hybrid-triangular). Металлизация с квадратными сегментами и соединительными мостиками – это традиционная сегментация, часто используемая в современных МПК. Аналогичная металлизация с треугольными сегментами используется крайне редко. В случае гибридных типов сегменты соединены между собой тонким слоем металлизации толщиной 5 нм. Данные

² Appendix 1

типы металлизации являются новыми, ранее не исследованными.

В представленных расчетах рассмотрен только один набор материалов конденсатора: полипропиленовая диэлектрическая пленка и цинковая металлизация.

Вид исследуемых типов сегментаций представлен на рис. 3: (A), (B) – металлизация с соединительными мостиками, (C), (D) – гибридная металлизация. Геометрические размеры исследуемых сегментаций указаны в таблице 1. При моделировании электродинамического разрушения использовалась только толщина металлизации 20 nm. Расчет поверхностного

сопротивления металлизации осуществлялся в более широком диапазоне (10 – 30 nm).

Таблица 1.³

Геометрические размеры исследуемых сегментаций.⁴

Параметр (Parameter)	Размер
Размер сегмента (Segment size)	8 mm
Толщина металлизации (Metallization thickness)	20 nm
Межсегментное расстояние (Intersegment distance)	200 um
Ширина мостика (Bridge width)	350 um

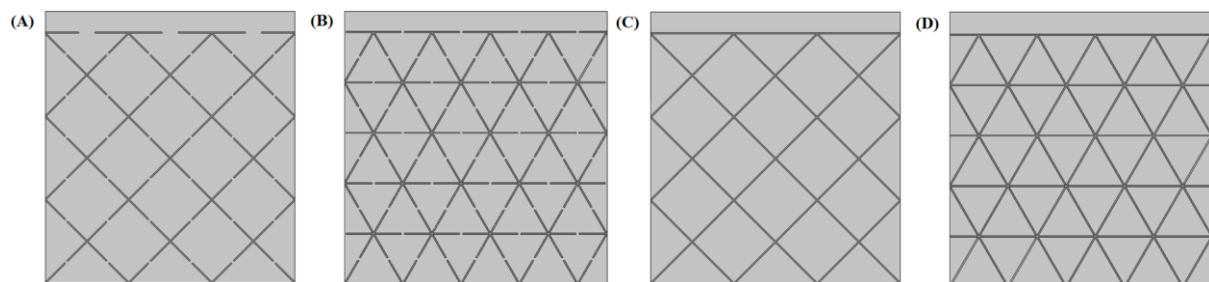


Рис. 3. Вид исследуемых типов сегментаций.⁵

III. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

A. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ МЕТАЛЛИЗАЦИИ

Расчетные зависимости поверхностного сопротивления сегментированных электродов от толщины металлизации представлены на рис. 4. Видно, что наибольшим значением поверхностного сопротивления обладает металлизация с треугольными сегментами и соединительными мостиками. Аналогичный тип металлизации, но с квадратными сегментами имеет несколько меньшее значение сопротивления. Тем не менее поверхностное сопротивление данных типов металлизации в несколько раз выше сплошной или гибридных типов. Сопротивление гибридных типов практически соответствует сопротивлению сплошной металлизации и отличается друг от друга не более, чем на 2 %. Таким образом, конденсаторы с гибридными типами металлизированных электродов могут иметь наименьшее значение эквивалентного последовательного сопротивления, а значит и меньшие потери энергии.

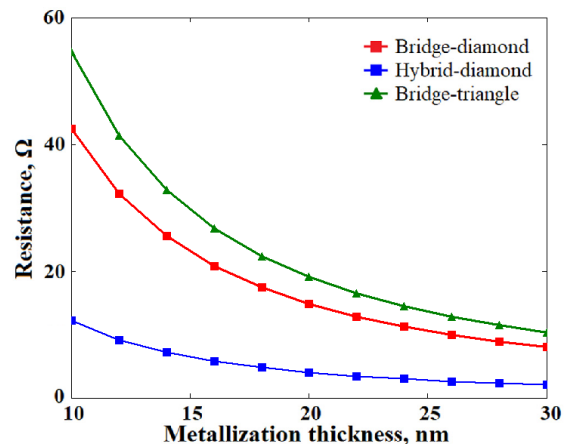


Рис. 4. Поверхностное сопротивление различных типов сегментированных электродов.⁶

Одним из недостатков сегментированной металлизации является снижение общей емкости конденсатора. Снижение емкости обусловлено наличием неметаллизированных межсегментных промежутков. Очевидно, что данный недостаток относится только типам металлизации с соединительными мостиками. Гибридные типы сегментированной металлизации, а также сплошная металлизация не имеют данного недостатка. Результаты расче-

тов снижения емкости для исследуемых типов металлизаций представлены в таблице 2.

Б. РАСЧЕТ ПЛОТНОСТИ ТОКА В МЕТАЛЛИЗАЦИИ

Распределение плотности тока в конденсаторных электродах как в нормальном режиме работы, так и в процессе СВ является очень важной характеристикой. Распределение плотности тока влияет на скорость старения металлизации и срок службы конденсатора. Локальное увеличение плотности тока в металлизации может привести к различным видам деградации: электротепловому разрушению, электромиграции и электрохимической коррозии.

Таблица 2. ⁷

Изменение емкости и плотности тока. ⁸

Тип сегментации (Segmentation type)	$C, \text{ а.у.}$	$j_{\max} / j_0$	j_{avg} / j_0
Квадратные сегменты с мостиками (Bridge-diamond)	0.95	21.8	60
Гибридная с квадратными сегментами (Hybrid-diamond)	1	1.63	1.47
Треугольные сегменты с мостиками (Bridge-triangular)	0.92	30.9	68.1
Гибридная с треугольными сегментами (Hybrid-triangular)	1	1.5	4.9

Результаты расчета плотности тока в исследуемых типах сегментированных электродов представлены в таблице 2. Величина j_0 – плотность тока вдоль границы шоопировки и металлизации, и принимает значение средней рабочей плотности тока МПК. Значительное увеличение плотности тока происходит в соединительных мостиках сегментированной металлизации, а также в углах сегментов в случае гибридной металлизации. Величина

$j_{\max}$ – значение максимальной плотности тока вблизи сегмента. Отношение $j_{\max}/j_0$ соответствует коэффициенту увеличения плотности тока в нормальном режиме работы. Величина j_{avg} – значение средней плотности тока вокруг сегмента при пробое диэлектрика. Отношение j_{avg}/j_0 показывает во сколько раз увеличивается плотность тока вокруг сегмента в случае СВ. Известно, что при пробое диэлектрика сопротивление канала пробоя меняется во времени, а также происходит электродинамическое разрушение металлизации, что обуславливает сложную форму тока через канал пробоя. Данные оценочные расчеты не учитывают изменение плотности тока, а представляют только начальный момент времени процесса СВ, когда канал пробоя еще не сформировался, разрушение металлизации еще не началось.

В. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТАЛЛИЗАЦИИ В ПРОЦЕССЕ САМОВОССТАНОВЛЕНИЯ

В качестве критерия оценки эффективности различных типов сегментаций была использована зависимость энергии разрушения от времени разрушения $W(\tau)$. Энергия электродинамического разрушения – это энергия, затраченная на нагрев и испарение соединительных элементов (мостиков или тонкого слоя металлизации), то есть изолирование канала пробоя. Энергия разрушения определяется выражением

$$W = U \int_0^{\tau} I(t) \cdot dt$$

где U – напряжение, $I(t)$ – ток, τ – время разрушения. Время разрушения зависит от геометрических параметров сегментации, неоднородностей металлизации, электро- и теплофизических параметров материалов, а также скорости ввода энергии в заданный объем. Последнее определяется интегралом действия тока. При численном моделировании геометрические параметры сегментации, электро и теплофизических параметров материалов были постоянными, а неоднородности металлизации не учитывались. Скорость ввода энергии варьировалась путем изменения величины приложенного напряжения. На практике при пробое диэлектрика скорость ввода энергии определяется общей запасенной энергией конденсатора и его эквивалентным последо-

вательным сопротивлением. Зависимости $W(\tau)$ для исследуемых типов сегментированных электродов представлены на рис. 5. В области низких значений времени и энергии разрушения значительное влияние на зависимость $W(\tau)$ оказывает скорость ввода энергии. При уменьшении данного параметра зависимость $W(\tau)$ приобретает линейный характер. Видно, что наибольшую скорость электродинамического разрушения имеют типы сегментации с мостиками. Изолирование сегмента треугольной формы происходит быстрее, чем квадратной, так как в этом случае необходимо испарение только трех мостиков вместо четырех. Изолирование сегментов в случае гибридных типов сегментации требует большей энергии и времени, что связано с большим объемом металла, который необходимо испарить. Также в случае гибридной сегментации средняя плотность тока в тонком слое вокруг сегмента в несколько десятков раз ниже, чем средняя плотность тока в соединительных мостиках традиционного типа сегментации. Таким образом, гибридные типы сегментации являются менее эффективными в сравнении с типами сегментации с мостиками.

Выбирая между металлизацией с квадратными сегментами и с треугольными, первый является лучшим, так как в данном типе сегментации 4 мостика имеют одинаковую токовую нагрузку. В случае 3 мостиков один из соединительных мостиков нагружен сильнее, что вводит некоторые ограничения на максимальную плотность тока в металлизации и, соответственно, на максимальный рабочий ток в конденсаторе.

На рис. 6 представлены типичные зависимости тока для металлизации с квадратными сегментами и соединительными мостиками и гибридной металлизации с квадратными сегментами. Видно, что в случае сегментации с мостиками зависимость имеет 2 характерных спада, что соответствует перегоранию соединительных мостиков. Так как расчетная модель не учитывает неровностей края металлизации, происходит попарное разрушение верхних и нижних мостиков. В реальной металлизации из-за наличия неровностей металлизации происходит поочередное перегорание всех 4 мостиков, что можно увидеть на экспериментальных осциллограммах.

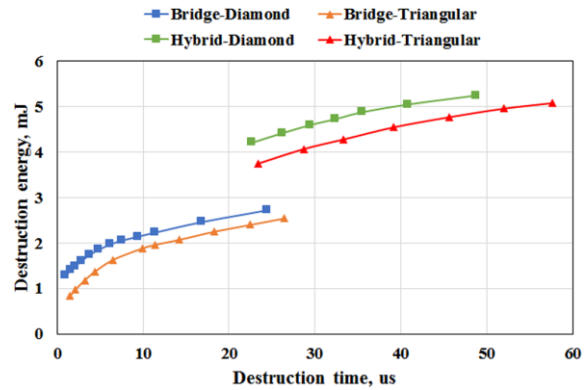


Рис. 5. Зависимости энергии электродинамического разрушения от времени разрушения.⁹

На рис. 7. представлен результат численного моделирования электродинамического разрушения металлизации с квадратными сегментами и соединительными мостиками. Данное изображение визуализирует образование деметаллизированной области в соединительном мостике и изолирование сегмента.

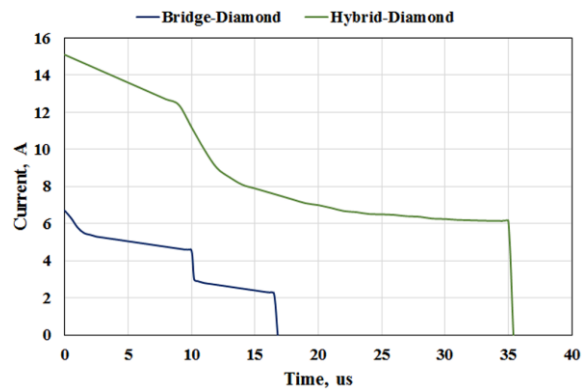


Рис. 6. Типичные зависимости тока для различных типов сегментации.¹⁰

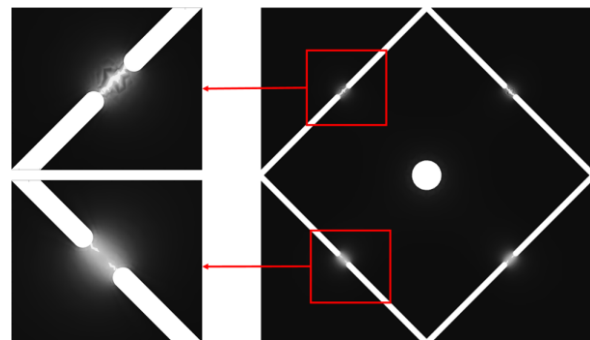


Рис. 7. Электродинамическое разрушение сегментированной металлизации.¹¹

Представленный рисунок соответствует моменту времени, когда верхние мостики уже перегорели, а нижние только в процессе разрушения. В случае гибридной металлизации испарение тонкого слоя вокруг сегмента про-

исходит непрерывно, поэтому зависимость тока имеет более гладкую форму.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были исследованы различные типы сегментированных электродов для МПК методом численного моделирования электродинамического разрушения. Полученные расчетные зависимости энергии электродинамического разрушения от времени разрушения позволили сравнить между собой различные типы сегментированных электродов.

Наиболее эффективными оказались традиционные типы металлизации с соединительными мостиками. В этом случае изолирование канала пробоя происходит за время от нескольких единиц до нескольких десятков микросекунд. При этом на разрушение соединительных мостиков затраченная энергия не превышает 3 мДж. Сегменты квадратной формы имеют некоторое преимущество, так как в случае четырех соединительных мостиков все они имеют одинаковую токовую нагрузку в отличие от трех соединительных мостиков в треугольных сегментах. Данное преимущество позволяет использовать большее значение рабочей плотности тока.

Гибридная металлизация имеет меньшее поверхностное сопротивление, что может

дать меньше значение потерь энергии в электродах конденсатора. Также данный тип металлизации не дает потерь геометрической емкости за счет отсутствия неметаллизированных межсегментных промежутков. Тем не менее гибридная металлизация не позволяет быстро изолировать поврежденный сегмент и канал пробоя. В этом случае изолирование сегмента происходит за время 25 – 60 мкс, что в 2 – 3 раза больше, чем в металлизации с мостиками. Такое различие объясняет необходимостью испарить больший объем металла. Из полученных результатов видно, что эффективность гибридной металлизации сопоставима со сплошной (однородной) металлизацией МПК. Однако, использование более тонкого слоя металла и уменьшение межсегментного промежутка смогут улучшить эффективность гибридной металлизации.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 19-79-10075.

Результаты работы были получены с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютерного центра Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (www.scc.spbstu.ru).

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

¹**Fig. 1.** The view of experimental sample with electrodes and additional polymer film.

²**Fig. 2.** The example of calculation geometry and boundary conditions.

^{3,4}**Table 1.** Geometry parameters of investigated segmentation patterns.

⁵**Fig. 3.** Investigated segmentation patterns types.

⁶**Fig. 4.** Surface resistance of investigated segmentation patterns.

^{7,8}**Table 1.** Capacitance and current density changing.

⁹**Fig. 5.** The dependences of destruction energy versus destruction time.

¹⁰**Fig. 6.** Typical current waveforms.

¹¹**Fig. 7.** Electrodynamical destruction of bridge-diamond metallization.

Литература (References)

- [1] Valentine N., Azarian M.H., Pecht M. Metallized film capacitors used for EMI filtering: A reliability review. *Microelectronics Reliability*, 2019, vol. 92, pp. 123-135.
- [2] Penven T., Martin C., Joubert C., Meuret R., Thomson D., Semard M. Optimization of Metallized Film Capacitor Connection to Reduce Stray Inductance. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2019, vol. 9, no. 2, pp. 288-295.
- [3] Guillermin C., Dujeu O., Lupin J. Metallized Film Power Capacitors End-of-Life Study through Monitored Destruction Tests. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2013, vol. 28, no. 1, pp. 368-375.
- [4] Jow T.R., MacDougall F.W., Ennis J.B., Yang X.H., Schneider M.A., Scozzie C.J. Pulsed Power Capacitor Development and Outlook. *IEEE Pulse Power Conference. Austin*, 2015, pp. 1-7.
- [5] MacDonald J. R., Schneider M.A., Ennis J.B., MacDougall, F.W., Yang, X.H. High energy density capacitors. *IEEE Electrical Insulation Conference*, Montreal, QC, 2009, pp. 306-309.
- [6] Boggs S.A., Ho J., Jow T.R. Overview of Laminar Dielectric Capacitors. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2010, vol. 26, no. 2, pp. 7-13.
- [7] Qin S., Boggs S. Limits to the Performance and Design of High Voltage Metallized Film Capacitors. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2010, vol. 17, no. 4, pp. 1298-1306.
- [8] Jiang Z., Li H.; Wang B. Fracture behavior of metallized electrode for capacitor under pulsed current. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2016, vol. 23, no. 5, pp. 2517 – 2525.

- [9] Ritamäki M., Rytöluoto I., Lahti K. Performance Metrics for a Modern BOPP Capacitor Film. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2019, vol. 26, no. 4, pp. 1229-1237.
- [10] Ritamäki M., Rytöluoto I., Lahti K. Differences in AC and DC Large-Area Breakdown Behavior of Polymer Thin Films. *IEEE 1st International Conference on Dielectrics*, Montpellier, France, 2016, pp. 1-4.
- [11] Li H., Li H., Li Z., Lin F., Wang W. Temperature dependence of self-healing characteristics of metallized polypropylene film. *Microelectronics Reliability*, 2015, vol. 55, no. 12, pp. 2721-2726.
- [12] Zhang S., Zellers B., Henrich J. High energy density film capacitors. *IEEE Pulsed Power Conference*, Washington, DC, USA, 2009, pp. 779-783.
- [13] Rahimabady M., Xu L.Q., Arabnejad S., Yao K., Lu L., Shim V., Neoh K.G. Poly (vinylidene fluoride-co-hexafluoropropylene)-graft-poly (dopaminemethacrylamide) copolymers: A nonlinear dielectric material for high energy density storage. *Applied Physics Letters*, 2013, vol. 113, no. 26 pp.1-4, 262904.
- [14] Jiang J., Shen Z., Qian J., Dan Z. Ultrahigh Discharge Efficiency in Multilayered Polymer Nanocomposites of High Energy. *Energy Storage Materials*, 2019, vol. 18, pp. 213-221.
- [15] Liu F., Li Q., Li Z., Dong L. Ternary PVDF-based terpolymer nanocomposites with enhanced energy density and high power density. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2018, vol. 109, pp. 597-603.
- [16] He D., Wang Y., Zhang L., Song S. Poly(vinylidene fluoride)-Based composites modulated via multiscale two-dimensional fillers for high dielectric performances. *Composites Science and Technology*, 2018, vol. 159, pp. 162-170.
- [17] Thabet A. Enhancing Performance of High Voltage Metallized Film Capacitors by Using New Industrial Nano-Composites. *Journal of Engineering Sciences*, 2012, vol. 40, no. 3, pp. 799-818.
- [18] Hao X. A review on the Dielectric Materials for High Energy-Storage Application. *Journal of Advanced Dielectrics*, 2013, vol. 1, no 4, pp. 1-14.
- [19] Zhou Y., Li Q. High-temperature and high-energy-density polymer dielectrics for capacitive energy storage. *IEEE 2nd International Conference on Dielectrics*, Budapest, Hungary, 2018, pp. 1-4.
- [20] Li H., Li H., Li Z., et al. Temperature dependence of self-healing characteristics of metallized polypropylene film. *Microelectronics Reliability*, 2015, vol. 55, no. 12, Part B, pp. 2721-2726.
- [21] Makdessi M., Sari A., Venet P. Metallized polymer film capacitors ageing law based on capacitance degradation. *Microelectronics Reliability*, 2014, vol. 54, no. 9, pp. 1823-1829.
- [22] Li H., Li Z., Lin F. Threshold Current Density of Metallized Film under Multiple Current Pulses. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2020, vol. 48, no. 7, pp. 2523 – 2530.

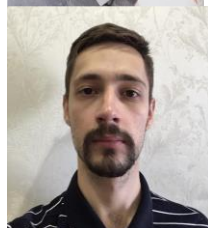
Сведения об авторах.



Иванов Иван Олегович.
Кандидат технических наук.
СПбПУ. Область научных
интересов: техника высоких
напряжений, компьютерное
моделирование.
E-mail: ivanov.eicc@yandex.ru



Белько Виктор Олегович.
Кандидат технических наук,
доцент. СПбПУ. Область
научных интересов: им-
пульсная техника, накопители
энергии, металлопленочные
конденсаторы.
E-mail: vobelko@gmail.com



**Кульбако Кирилл
Александрович.** Студент.
СПбПУ. Область научных
интересов: компьютерное
моделирование. E-mail:
kiryakulbako@gmail.com



**Гливенко Дмитрий
Юрьевич.** Аспирант. СПбПУ,
АО НИИ ГИРИКОНД.
Область научных интересов:
пленочные конденсаторы,
электрические фильтры
E-mail:
dmitry.glivenko@gmail.com



**Феклистов Ефрем
Геннадьевич.** Аспирант.
СПбПУ. Область научных
интересов: электрофизика.
E-mail:
Efrem.feklistov@mail.ru