

DOI 10.5862/JEST.254.8

УДК 621.319.4

*В.О. Белько, Д.Ю. Гливенко, О.А. Емельянов, И.О. Иванов*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ДЕГРАДАЦИИ КОНТАКТНЫХ УЗЛОВ МЕТАЛЛОПЛЕНОЧНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ**

*V.O. Belko, D.Yu. Glivenko, O.A. Emelyanov, I.O. Ivanov*

### **INVESTIGATION OF DEGRADATION IN ELECTRODE CONTACTS OF METALLIZED FILM CAPACITORS**

При работе металлопленочных конденсаторов в импульсном режиме разрушение контактного узла является основной причиной выхода их из строя. Разработана методика экспериментального моделирования электродинамического разрушения контактных узлов металлопленочных конденсаторов. Проведены эксперименты по изучению закономерностей их разрушения при воздействии импульсов тока различной амплитуды и длительности положительной и отрицательной полярностей. Установлено, что вероятность разрушения контактного узла описывается нормальным законом распределения. Определены зависимости времени жизни контактного узла от энергии импульса тока и получен степенной закон старения. Обнаружен полярный эффект разрушения контактов: время жизни меньше при воздействии отрицательных импульсов тока. Определена скорость эрозии металлизации в контактном узле.

**МЕТАЛЛОПЛЕНОЧНЫЙ КОНДЕНСАТОР; КОНТАКТНЫЙ УЗЕЛ; ПОЛЯРНЫЙ ЭФФЕКТ;  
ВРЕМЯ ЖИЗНИ; СКОРОСТЬ ЭРОЗИИ; ИМПУЛЬС ТОКА.**

Metallized film capacitors are widely used in modern equipment. When this type of capacitors work in pulse mode, electrode contact destruction is the main reason of failure. Therefore, an experimental method for modeling the electrodynamic destruction of electrode contacts of a metallized film capacitor was developed. The experiments for investigating the destruction regularities due to the impact of current pulses with different amplitude and polarity were done. It was determined, that the probability of electrode contact failure is described by the normal distribution law. The dependences of electrode contacts lifetime versus current pulse energy were determined and a power law of aging was obtained. The polarity effect of contact destruction was found: the lifetime is less under impact of negative current pulses. The erosion velocity of metallization in electrode contact was calculated.

**METALLIZED FILM CAPACITOR; ELECTRODE CONTACT; POLARITY EFFECT; LIFETIME;  
EROSION VELOCITY; CURRENT PULSE.**

#### **Введение**

Металлопленочные конденсаторы (МПК) широко применяются в современной технике: от высоковольтных импульсных систем до элементов микроэлектроники. Этот тип конденсаторов

обладает высокой рабочей напряженностью электрического поля [1, 2] и, как следствие, высокой удельной энергией (до 3 Дж/см<sup>3</sup>) [3]. Конструктивно МПК представляют собой две полимерные пленки (полипропилен, полиэтилентерефталат

и др.) с алюминиевой или цинковой металлизацией, которые наматываются на оправку и образуют цилиндрическую секцию. Толщина металлизированных электродов составляет единицы-десятки нанометров. На торцы цилиндрической секции напыляется металл (шоопировка) для создания электрического контакта с металлизацией (рис. 1). В качестве металла шоопировки используют цинк, олово или сплавы на их основе. МПК обладают способностью самовосстановления (СВ), т. е. восстановлением своей работоспособности после электрического пробоя диэлектрика. При пробое диэлектрика под действием тока высокой плотности происходит испарение части электрода и изолирование зоны пробоя [4]. Способность к СВ обуславливает высокие удельные характеристики и надежность данного типа конденсаторов [1, 3, 5–8].

При работе конденсатора в импульсном режиме амплитуда тока может достигать нескольких сотен ампер, при этом контактные узлы подвергаются электрической, тепловой и механической нагрузке [9]. Высокая электродинамическая нагрузка нарушает целостность контактных узлов и приводит к выходу конденсатора из строя [3, 5, 6].

Максимально допустимой рабочей линейной плотностью тока в МПК принято считать величину  $\sim 10$  А/м [3]. При этом данная величина зависит от конструкции конденсатора, технологии производства и его режима работы.

До сих пор нет ясного представления о законах деградации контактных узлов МПК при воздействии тех или иных факторов. Поэтому **целями нашей работы** являются эксперименталь-

ное моделирование процесса разрушения контактных узлов МПК и определение времени жизни при различных токовых нагрузках.

### Методика экспериментальных исследований

Была разработана специальная методика для ускоренных испытаний контактных узлов на электродинамическую устойчивость. Модельный образец представляет собой отрезок металлизированной полимерной пленки размером  $4 \times 5$  см. Металлизация выполнена из алюминия, ее толщина составляет 20 нм. При производстве МПК напыленный на торец секции металл (шоопировка) проникает между слоями на глубину нескольких сотен микрон, образуя контакт с одним из электродов (рис. 1, б). Поэтому для имитации контактного узла на металлизированную пленку прикреплялась цинковая или алюминиевая фольга с перекрытием в 1,5 мм. Для устранения микродуговых разрядов и имитации межслоевого давления зона контакта накрывалась полимерной пленкой и затем фиксировалась прижимным электродом. Общий вид модельного образца и экспериментальной ячейки изображен на рис. 2.

Несмотря на то, что алюминий не употребляют в качестве материала для шоопировки, в экспериментах использовалась алюминиевая фольга с целью проверки влияния материала на процесс разрушения контакта.

На экспериментальную ячейку с частотой 5 Гц подавались импульсы тока различной амплитуды и длительности до полного разрушения контакта. Для имитации импульсов положительной полярности ячейка подключалась таким образом, что фольга служила анодом, а металлизация — катодом.

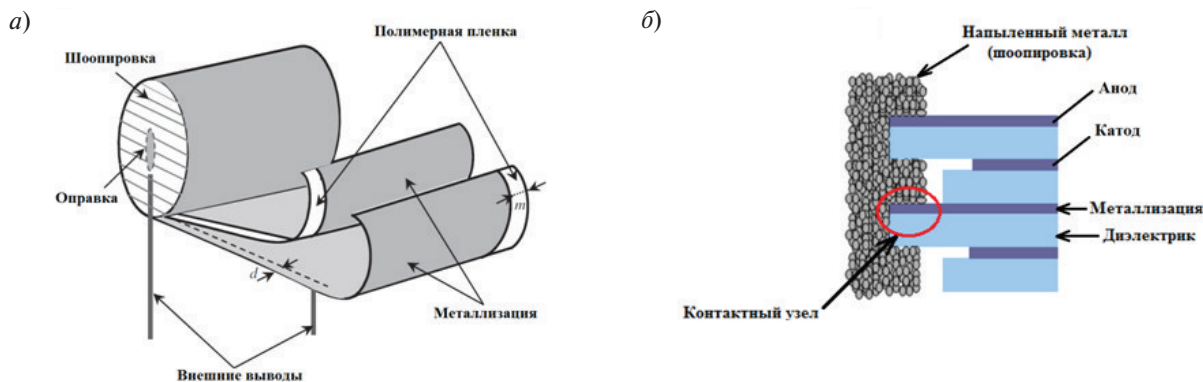


Рис. 1. Вид цилиндрической секции МПК (а) и сечение контактного узла (б) [4]

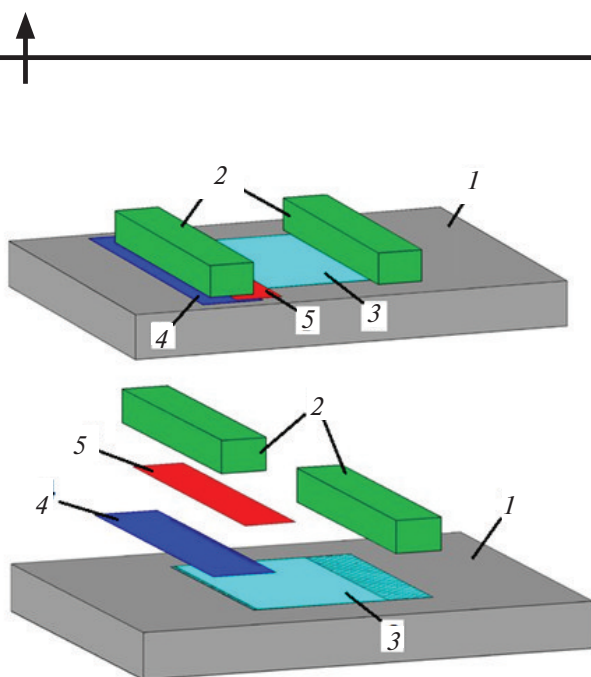


Рис. 2. Вид модельного образца контактного узла МПК: 1 – подложка из оргстекла; 2 – прижимные электроды; 3 – металлизированная пленка (объект исследования); 4 – алюминиевая или цинковая фольга; 5 – полимерная пленка.

Для отрицательных импульсов фольга была катодом, а металлизация анодом. С помощью цифрового осциллографа GW Instek GDS-72072 фиксировались формы импульса тока через образец  $I(t)$  и напряжение на нем  $U(t)$ . Количество импульсов до разрушения контакта фиксировалось с помощью счетчика импульсов. Электрическая схема экспериментальной установки и форма импульса тока представлены на рис. 3. На электрической схеме обозначены следующие элементы:  $R_{зар} = 10 \text{ кОм}$  – зарядное сопротивление;  $R_{обр}$  – исследуемый модельный образец;  $R_{ш} = 10 \text{ Ом}$  – токовый шунт.

Импульс тока создавался путем разряда конденсатора  $C$  на исследуемый образец контактного узла, который имел активное сопротивление  $R_{обр} \approx 3 \text{ Ом}$  в исходном состоянии (до начала раз-

рушения). В процессе деградации контакта происходило увеличение его активного сопротивления, что в свою очередь приводило к изменению формы импульса тока: уменьшению амплитуды и увеличению длительности. Однако при частоте следования импульсов  $f = 5 \text{ Гц}$  конденсатор  $C$  всегда полностью заряжался и разряжался, следовательно, заряд и энергия импульсов тока оставалась постоянной. Поэтому для определения режима нагрузки использовались амплитуда и длительность первого импульса тока.

Будем считать максимально допустимой линейной рабочей плотностью тока величину  $j_0 = 0,1 \text{ А/см}$ . Обозначим амплитуду импульса тока  $I_m$  (рис. 3, б). Так как ширина образца  $b = 5 \text{ см}$ , то величина  $j_m = I_m/b$  – амплитудное значение линейной плотности тока. Таким образом, величина перегрузки будет оцениваться отношением  $K = j_m/j_0$ . Меняя величину зарядного напряжения конденсатора  $C$ , можно менять значение перегрузки  $K$ . Для изменения длительности импульсов меняется емкость конденсатора  $C$  и подбирается зарядное напряжение, соответствующее необходимой перегрузке.

Заряд, прошедший через контакт за один импульс длительностью  $\tau$ , и энергия одного импульса определяются как

$$Q = \int_0^{\tau} I(t) dt; \quad (1)$$

$$W = \int_0^{\tau} U(t) I(t) dt. \quad (2)$$

Значения  $Q$  и  $W$  практически не изменяются в процессе разрушения контакта и также характеризуют режим нагрузки. Следовательно, данные параметры импульса тока могут быть использованы для оценки электродинамической нагрузки контактного узла.

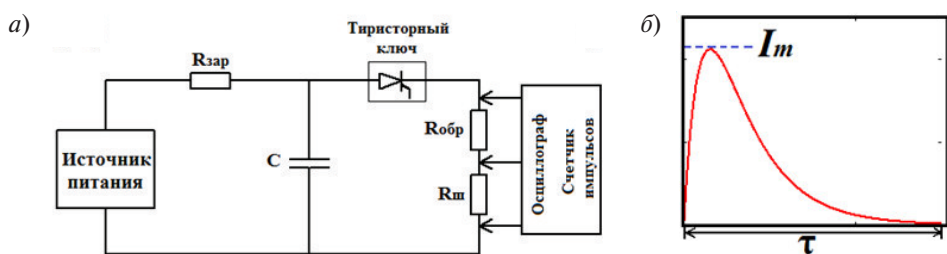


Рис. 3. Упрощенная схема экспериментальной установки (а) и форма импульса тока (б)

### Результаты экспериментальных исследований

Эксперименты по определению времени жизни модельных образцов контактного узла МПК проводились в следующих режимах:

при различной величине перегрузки ( $K = 7-32$ ) и постоянной длительности импульсов  $\tau = 15$  мкс;

при постоянной величине перегрузки  $K = 15$  и различной длительности импульсов  $\tau = 6-60$  мкс.

После проведения экспериментов были сделаны фотографии зоны контакта фольги и металлизации пленки с помощью микроскопа и цифровой камеры. Были проанализированы более ста фотографий зон деградации контактных узлов, однако какие-либо различия в деметаллизированной области при воздействии положительных импульсов или отрицательных не выявлены. Типичная фотография исследуемой металлизированной пленки после эксперимента представлена на рис. 4, где цифрами обозначены зона контакта фольги и металлизированной пленки (1) и исходная неразрушенная зона металлизации (2). На фотографии светлые области – деметаллизация, т.е. зоны, где полностью выгорел слой металлизации. Площадь деметаллизации в зоне контакта непостоянна и меняется в зависимости от параметров импульса тока.

Статистическая обработка экспериментальных данных проводилась в программном пакете Weibull++. Были проверены различные законы распределения (нормальный, логнормальный, Вейбулла, экспоненциальный) и установлено, что число импульсов до отказа лучше всего описывается нормальным распределением при любых параметрах нагрузки.

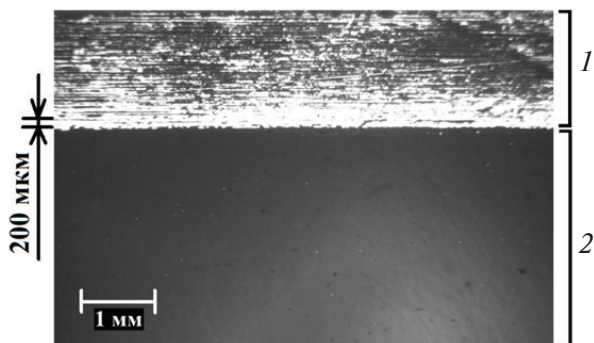


Рис. 4. Фотография металлизированной пленки после эксперимента

В ходе экспериментов было выявлено различие во времени жизни при воздействии положительных и отрицательных импульсов, которое наблюдалось во всех испытательных режимах. На рис. 5 представлены нормальные функции  $F(N)$  распределения числа импульсов до отказа при различной величине перегрузки  $K$  для положительных и отрицательных импульсов. Из распределений видно, что время жизни контакта меньше при воздействии отрицательных импульсов.

Такой полярный характер деградации может быть объяснен тем, что, кроме электротеплового разрушения в контактной зоне, происходят микродуговые разряды. Известно, что приэлектродные процессы в дуговом разряде различны, скорости эрозии металла на аноде и на катоде отличаются друг от друга.

При высоких плотностях тока может проявляться электромиграционный механизм деградации. Электромиграция – это перенос атомов металла при воздействии тока высокой плотности. Атомы перемещаются в направлении движения электронов, образуя дефекты в металлизации в виде наростов и пустот. Данный вид деградации также обладает полярным характером [10].

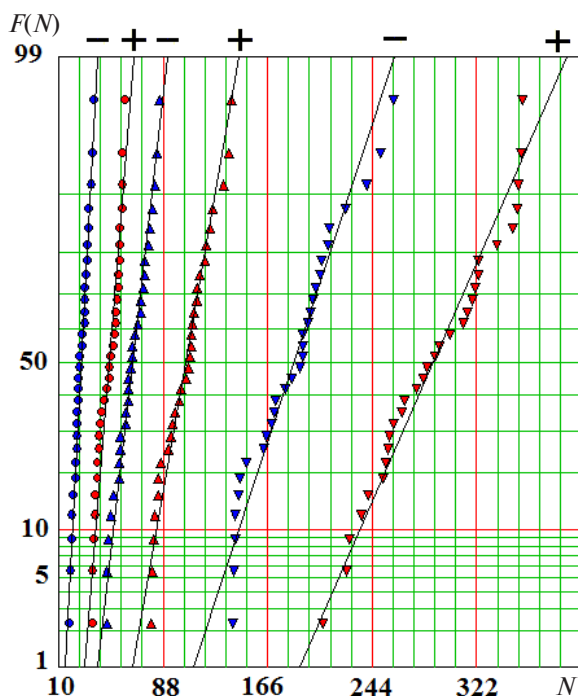


Рис. 5. Нормальные функции распределения количества импульсов до отказа при различной величине перегрузки  $K$  ( $K = 22$ ;  $K = 15$ ;  $K = 11$ )

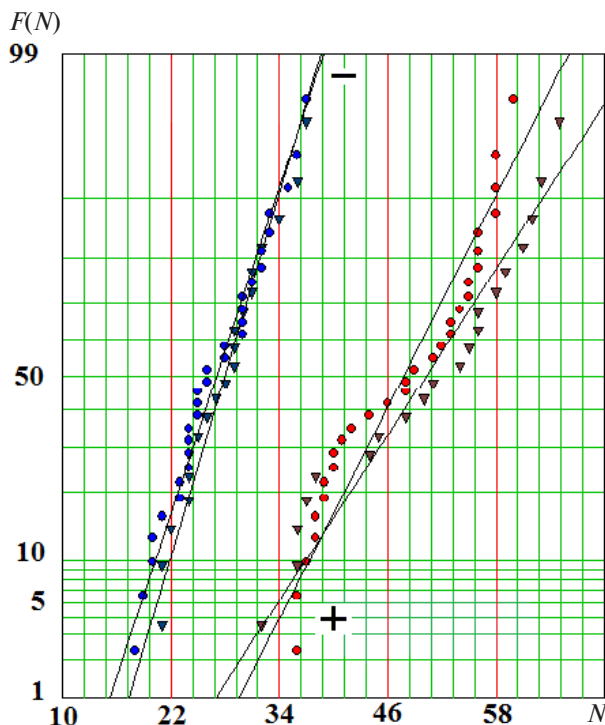


Рис. 6. Функции распределения количества импульсов до отказа при использовании Al и Zn фольги ( $K = 15$ ; Al; Zn)

Влияние материала фольги на время жизни контакта исследовалось в экспериментах с использованием алюминиевой и цинковой фольги при различных режимах нагрузки. Было установлено, что материал фольги не влияет на количество импульсов до разрушения контакта. Следовательно, время жизни контакта определяется процессами, происходящими в металлизации. Функции распределения числа импульсов до разрушения контакта для одного из режимов нагрузки при использовании алюминиевой и цинковой фольги представлены на рис. 6.

Используя заряд импульса тока  $Q$  или его энергию  $W$  как параметр нагрузки, можно определить закон старения модельного контактного узла. Было установлено, что разрушение контактного узла лучше всего описывается степенной зависимостью числа  $N$  импульсов до отказа от энергии  $W$  импульса тока (рис. 7):

$$N = N_0 W^{-\alpha}, \quad (3)$$

где  $N_0$  и  $\alpha$  – эмпирические коэффициенты закона старения. Для положительной полярности

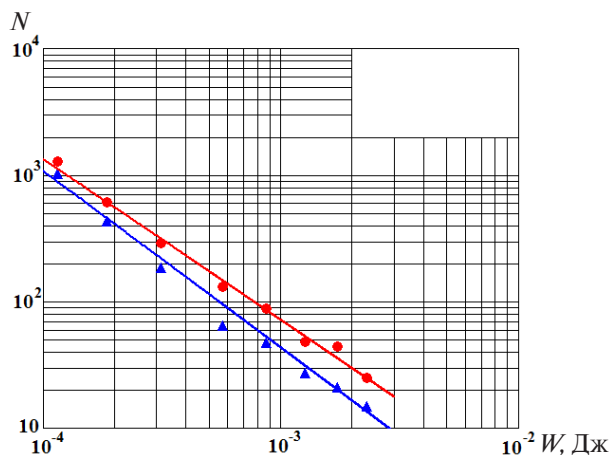


Рис. 7. Зависимость числа импульсов до отказа от энергии импульса тока  
(● – полярность "+"; Δ – полярность "-")

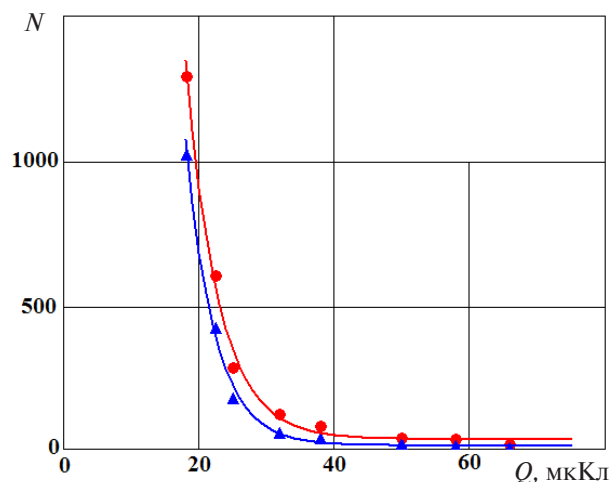


Рис. 8. Зависимость числа импульсов до отказа от заряда импульса тока  
(● – полярность "+"; Δ – полярность "-")

импульсов  $N_0 = 2,7 \cdot 10^{-3}$ ,  $\alpha = -1,27$ , а для отрицательной  $N_0 = 6 \cdot 10^{-4}$ ,  $\alpha = -1,4$ .

Зависимость числа импульсов до отказа от заряда импульса тока  $Q$  не образует линейную зависимость в каких-либо координатах, поэтому данная зависимость представлена в обычном масштабе на рис. 8.

На основе анализа фотографии зон деметаллизации модельных образцов было установлено, что процесс деградации происходит по всей площади под фольговым электродом, однако наиболее интенсивна в узкой области шириной  $\sim 200$  мкм вдоль края фольги (см. рис. 4). Будем считать разрушение этой области достаточным

условием разрушения модельного образца контактного узла. Принимая плотность алюминия при нормальных условиях  $\rho = 2,7 \text{ г/см}^3$  и зная геометрические размеры деме­таллизируемой области, получим массу испаренного металла  $m = 5,4 \cdot 10^{-7} \text{ г}$ . Тогда, зная суммарную энергию  $W_{\Sigma}$  всех импульсов тока в процессе разрушения, можно определить скорость эрозии металлизации в исследуемом контактном узле:

$$V = \frac{m}{W_{\Sigma}}. \quad (4)$$

Таким образом были получены зависимости скорости эрозии металлизации, а значит, и скорости разрушения контактного узла для различных значений энергии импульса тока (рис. 9). Видно, что с увеличением энергии импульса скорость эрозии стремится к насыщению. При увеличении энергии импульса увеличивается вклад микродугового механизма деградации. Однако интенсивность испарения металла анодным или катодным пятном имеет конечное значение. Как отмечено ранее, скорости эрозии на аноде и на катоде различны. Поэтому скорость деградации контакта зависит от полярности импульса тока и стремится к конечному значению.

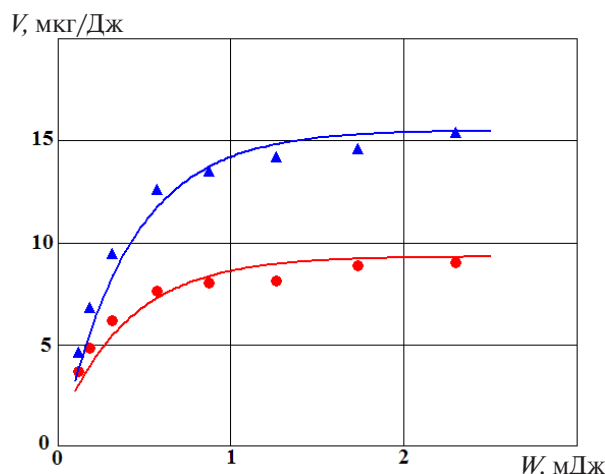


Рис. 9. Зависимость скорости эрозии металлизации от энергии импульса тока ( $\bullet$  – полярность "+";  $\Delta$  – полярность "-")

## Выводы

Разработана методика экспериментального моделирования электродинамического разрушения контактных узлов металлопленочных конденсаторов. На модельных образцах контактных узлов проведены эксперименты по изучению закономерностей их разрушения при воздействии импульсов тока различной амплитуды и длительности, а также положительной и отрицательной полярностей. По результатам экспериментальных исследований сделаны следующие выводы:

1. Вероятность разрушения контактного узла описывается нормальным законом распределения вне зависимости от параметров импульса тока.

2. Имеет место полярный эффект деградации контактного узла: время жизни (число импульсов до разрушения) контактного узла меньше при воздействии отрицательных импульсов тока. Этот эффект может быть связан с тем, что, кроме электротеплового разрушения, в зоне контакта происходят микродуговые разряды, имеющие полярный характер. Также не исключено влияние электромиграционного механизма деградации металлизированных электродов.

3. Полученные зависимости времени жизни контактного узла от энергии импульса тока описываются степенным законом старения, справедливость которого подтверждена в широком динамическом диапазоне времени жизни контакта ( $10$ – $10^3$  импульсов).

4. Определена скорость эрозии металлизации в моделируемом контактном узле в диапазоне энергий импульса тока  $1,15 \cdot 10^{-4}$  –  $2,3 \cdot 10^{-3}$  Дж. При больших значениях энергии скорость эрозии стремится к максимальному значению  $9,3 \text{ мкг/Дж}$  для положительной полярности импульсов и  $15,5 \text{ мкг/Дж}$  для отрицательной. Полученные значения скорости эрозии могут быть полезны при проектировании импульсных конденсаторов для работы в форсированных режимах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Li Z., Li H., Lin F., Chen Y, Liu D., Wang B. Lifetime investigation and prediction of metallized polypropylene film capacitors // Microelectronics Reliability. 2013. Vol. 53. № 12. P. 1962–1967.
2. Rabuffi M., Picci G. Status Quo and Future Prospects for Metallized Polypropylene Energy Storage Capacitors // IEEE Transactions on Plasma Science. 2002. Vol. 30. № 5. P. 1939–1942.

3. **Li H., Wang B., Li Z., Liu D.** Effect of Pulsed Discharge Current on Lifetime Performance of Metallized Polypropylene Film Capacitors // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2014. Vol. 21. № 3. P. 957–963.

4. **Belko V.O., Emelyanov O.A.** Self-healing in segmented metallized film capacitors: Experimental and theoretical investigations for engineering design // *Journal of Applied Physics*. 2003. Vol. 119. № 2. 024509.

5. **Makdessi M., Sari A., Venet P.** Metallized polymer film capacitors ageing law based on capacitance degradation // *Microelectronics Reliability*. 2014. Vol. 54. № 9. P. 1823–1827.

6. **Li H., Chen Y., Lin F., Peng B.** The Capacitance Loss Mechanism of Metallized Film Capacitor under Pulsed Discharge Condition // *IEEE Transactions on*

*Dielectrics and Electrical Insulation*. 2011. Vol. 18. № 6. P. 2089–2094.

7. **Li Z., Li H., Lin F., Chen Y., Liu D., Wang B., Zhang Q.** Lifetime Prediction of Metallized Film Capacitors Based on Capacitance Loss // *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2002. Vol. 41, № 5. P. 1313–1318.

8. **Qi X., Boggs S.** Electrothermal failure of metallized film capacitor endconnections – computation of temperature rise at connection spots // *Journal of Applied Physics*. 2003. Vol. 94, № 7. P. 4449–4456.

9. **Lin F., Dai X., Yao Z., Li J.** Research on Electrode-End Contact Degradation of Metallized Polypropylene Capacitors // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2003. Vol. 39. № 1. P. 353–356.

10. **Emelyanov O.A., Ivanov I.O.** Fast electromigration crack in nanoscale aluminum film // *Journal of Applied Physics*. 2014. Vol. 116. № 6. 064309.

## REFERENCES

1. **Li Z., Li H., Lin F., Chen Y., Liu D., Wang B.** Lifetime investigation and prediction of metallized polypropylene film capacitors. *Microelectronics Reliability*. 2013. Vol. 53. № 12. P. 1962–1967.

2. **Rabuffi M., Picci G.** Status Quo and Future Prospects for Metallized Polypropylene Energy Storage Capacitors. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2002. Vol. 30. № 5. P. 1939–1942.

3. **Li H., Wang B., Li Z., Liu D.** Effect of Pulsed Discharge Current on Lifetime Performance of Metallized Polypropylene Film Capacitors. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2014. Vol. 21. № 3. P. 957–963.

4. **Belko V.O., Emelyanov O.A.** Self-healing in segmented metallized film capacitors: Experimental and theoretical investigations for engineering design. *Journal of Applied Physics*. 2003. Vol. 119. № 2. 024509

5. **Makdessi M., Sari A., Venet P.** Metallized polymer film capacitors ageing law based on capacitance degradation. *Microelectronics Reliability*. 2014. Vol. 54. № 9. P. 1823–1827.

6. **Li H., Chen Y., Lin F., Peng B.** The Capacitance Loss Mechanism of Metallized Film Capacitor under Pulsed Discharge Condition. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2011. Vol. 18. № 6. P. 2089–2094.

7. **Li Z., Li H., Lin F., Chen Y., Liu D., Wang B., Zhang Q.** Lifetime Prediction of Metallized Film Capacitors Based on Capacitance Loss. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2002. Vol. 41, № 5. P. 1313–1318.

8. **Qi X., Boggs S.** Electrothermal failure of metallized film capacitor endconnections – computation of temperature rise at connection spots. *Journal of Applied Physics*. 2003. Vol. 94, № 7. P. 4449–4456.

9. **Lin F., Dai X., Yao Z., Li J.** Research on Electrode-End Contact Degradation of Metallized Polypropylene Capacitors. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2003. Vol. 39. № 1. P. 353–356.

10. **Emelyanov O.A., Ivanov I.O.** Fast electromigration crack in nanoscale aluminum film. *Journal of Applied Physics*. 2014. Vol. 116. № 6. 064309.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

**БЕЛЬКО Виктор Олегович** – кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.  
195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.  
E-mail: vobelko@gmail.com

**BELKO Viktor O.** – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.  
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.  
E-mail: vobelko@gmail.com

**ГЛИВЕНКО Дмитрий Юрьевич** – студент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.  
195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.  
E-mail: dmitry141094@gmail.com

**GLIVENKO Dmitrii Yu.** – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.  
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.  
E-mail: dmitry141094@gmail.com

**ЕМЕЛЬЯНОВ Олег Анатольевич** – кандидат технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.  
195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.  
E-mail: oaemel2@gmail.com

**EMELYANOV Oleg A.** – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.  
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.  
E-mail: oaemel2@gmail.com

**ИВАНОВ Иван Олегович** – аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.  
195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.  
E-mail: ivanov.eicc@yandex.ru

**IVANOV Ivan O.** – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.  
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.  
E-mail: ivanov.eicc@yandex.ru