

Научная статья

УДК 621.319.4

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27403>

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

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

✉ [ivanov.eicc@yandex.ru](mailto:ivanov.eicc@yandex.ru)

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА РАНДОМИЗАЦИИ В ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МЕТАЛЛОПЛЕНОЧНЫХ КОНДЕНСАТОРАХ**

*Аннотация.* Численное моделирование физических процессов является эффективным методом при проектировании новых типов энергоемких электрических конденсаторов. В современном силовом оборудовании широко используются пленочные конденсаторы, так как обладают наибольшим значением удельной запасаемой энергии. Как правило, численное моделирование использует идеальные геометрические объекты и физические условия. Данный факт объясняет некоторое отличие результатов эксперимента и моделирования. В данной работе представлено применение метода рандомизации в изучении электрофизических процессов в электродах металлопленочных конденсаторов. В качестве примера возможного применения представлена численная модель электротеплового разрушения в сегментированных конденсаторных электродах в процессе самовосстановления. Полученные результаты численного моделирования имеют статистический разброс, который коррелирует с экспериментальными данными. Предложенный метод рандомизации является дополнением к проведенным исследованиям в данном научном направлении.

*Ключевые слова:* металлопленочный конденсатор; сегментированные электроды; самовосстановление; численное моделирование; метод рандомизации.

*Для цитирования:*

Иванов И.О., Гливенко Д.Ю., Ходжамов А. Использование метода рандомизации в численном моделировании электрофизических процессов в металлопленочных конденсаторах // *Материаловедение. Энергетика.* 2021. Т. 27, № 4. С. 30–41. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27403>

Это статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Scientific article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27403>*I.O. Ivanov* ✉, *D.Y. Glivenko*, *A. Hojamov*

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

✉ [ivanov.eicc@yandex.ru](mailto:ivanov.eicc@yandex.ru)

## **RANDOMIZATION METHOD APPLICATION IN NUMERICAL SIMULATION OF ELECTROPHYSICAL PROCESSES IN METALLIZED FILM CAPACITORS**

*Abstract.* Numerical simulation of physical processes is an effective design method of new energy-intensive electric capacitor types. Polymer film capacitors are widely used in modern power equipment, because of their extremely high value of specific energy. As a rule, numerical simulation uses ideal geometric objects and physical conditions. This fact explains some difference between experimental and simulation results. This paper presents the application of randomization method in the study of electrophysical processes in metallized film capacitors' electrodes. As an example of possible application, the numerical model of segmented capacitors electrodes' electrothermal destruction during self-healing process is presented. The obtained results of numerical simulation have a statistical dispersion that correlates with the experimental data. Suggested randomization method is an addition to the research carried out in this scientific direction.

*Keywords:* metallized film capacitor; segmented electrodes; self-healing; numerical simulation; randomization method.

*Citation:*

I.O. Ivanov, D.Y. Glivenko, A. Hojamov, Randomization method application in numerical simulation of electrophysical processes in metallized film capacitors, *Materials Science. Power Engineering*, 27 (04) (2021) 30–41, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27403>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

**Введение.** Электрические конденсаторы являются важными и незаменимыми компонентами электротехники и электроэнергетики. Область применения конденсаторов достаточно обширная: от элементов микроэлектроники до высоковольтных импульсных устройств. Не менее разнообразным является ассортимент выпускаемых конденсаторов, который характеризуется многообразием используемых диэлектрических материалов, металлов электродов и вспомогательных элементов (корпуса, изоляционные выводы и т.д.) [1–4]. За период эксплуатации более 100 лет электрические конденсаторы сильно изменились. Непрерывно улучшаются материалы, из которых изготавливаются конденсаторы, совершенствуется технология их изготовления. В настоящее время методы численного моделирования широко используются при проектировании различных устройств и конструкций, а также для обработки результатов экспериментальных исследований. Конденсаторная промышленность не является исключением. На этапе проектирования осуществляется численное моделирование работы будущего изделия. При этом можно в широких пределах варьировать конструкцию конденсатора и свойства используемых материалов. Таким образом можно выбрать наилучшие варианты конструкции без изготовления пилотных образцов и проведения экспериментальных исследований [5–10].

Применительно к конденсаторной технике численное моделирование применяется для расчета электрических и магнитных полей, распределения температуры, определения эквивалентных

параметров (сопротивление, емкость и индуктивность). Моделирование также используется для определения влияния электрических, токовых и тепловых перегрузок на работу конденсаторов. Современные вычислительные ресурсы и программные пакеты позволяют проводить расчеты, связанные со старением и деградацией конденсаторов и их компонентов [11].

Основной недостаток численного моделирования связан с использованием идеальных геометрических объектов (гладкие грани и поверхности) и идеальных физических условий (совершенные электрические и тепловые контакты, равномерное распределение температуры и электрического потенциала, и т.д.). При моделировании физических процессов, имеющих статистический разброс, такие идеальные условия часто создают некоторую ошибку в полученных результатах расчета. Решением данной проблемы может быть задание статистического отклонения при построении геометрии, задании параметров среды и граничных условий. Такое статистическое отклонение должно генерироваться случайным образом, а многократное моделирование одного и того же физического процесса должно давать различный результат при каждом последующем запуске расчета.

В данной работе предложен метод рандомизации для использования в численном моделировании. Метод включает в себя генерирование случайных неровностей при построении геометрии и случайное определение ряда физических параметров численной модели.

Таким образом, **целью данной работы** является обоснование метода рандомизации в численном моделировании. Для примера расчета использована модель электротеплового разрушения сегментированных электродов металлопленочных конденсаторов в процессе самовосстановления. Металлопленочные конденсаторы (МПК) – тип пленочных конденсаторов, в которых используется тонкий слой металлизации (несколько десятков нанометров) в качестве электродов. Отличительной особенностью таких конденсаторов является способность к самовосстановлению (СВ), то есть восстановлению работоспособности после пробоя диэлектрика. Для ограничения энергии СВ и повышения надежности конденсаторов используются сегментированные электроды. В этом случае электроды разделены на сегменты, которые соединены между собой узкими мостиками. При пробое диэлектрика за счет протекающего тока происходит электротепловое разрушение мостиков и изолирование поврежденного сегмента вместе с каналом пробоя [12–15].

## Методы и материалы

### *Экспериментальные исследования*

Экспериментальное исследование электротеплового разрушения проводилось на образцах конденсаторной полипропиленовой (ПП) пленки с Zn сегментированной металлизацией. Толщина пленки составляла 7 мкм, а толщина металлизации 20 нм. Вид экспериментальной ячейки представлен на рис. 1. Для имитации процесса СВ потенциальный электрод располагался на краю образца (со стороны утолщенного края), а цилиндрический заземленный электрод устанавливался в середине образца. Для соблюдения условий теплоотвода, соответствующим реальным конденсаторам, сверху закреплялась дополнительная неметаллизированная ПП пленка. С помощью генератора прямоугольных импульсов происходила имитация пробоя пленки, сопровождающаяся электротепловым разрушением соединительных мостиков.

Экспериментальные образцы подвергались воздействию прямоугольных импульсов напряжения различной амплитуды (60 – 120 В). Длительность импульсов составляла 100 мкс, что значительно больше длительности перегорания соединительных мостиков. Изменяя амплитуду импульсов напряжения, были получены различные длительности электротеплового разрушения. Импульсы напряжения и тока регистрировались с помощью цифрового осциллографа. Упрощенная схема экспериментальной установки представлена на рис. 2.

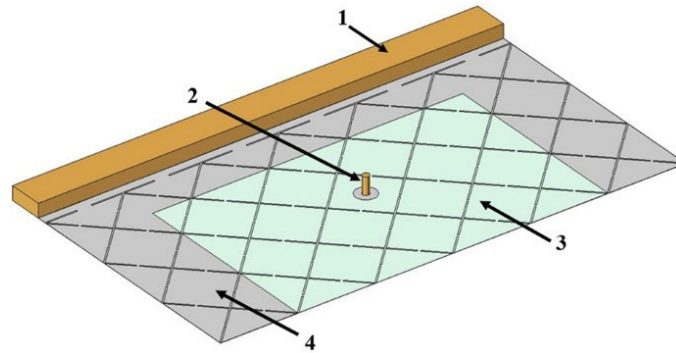


Рис. 1. Экспериментальная ячейка для исследования электротеплового разрушения сегментированной металлизации. 1 – потенциальный электрод; 2 – заземленный электрод; 3 – верхняя неметаллизированная пленка; 4 – нижняя пленка с сегментированной металлизацией

Fig. 1. Experimental cell for investigation of electrothermal destruction in segmented metallization. 1 – potential electrode; 2 – ground electrode; 3 – upside polymer film; 4 – downside polymer film with segmented metallization

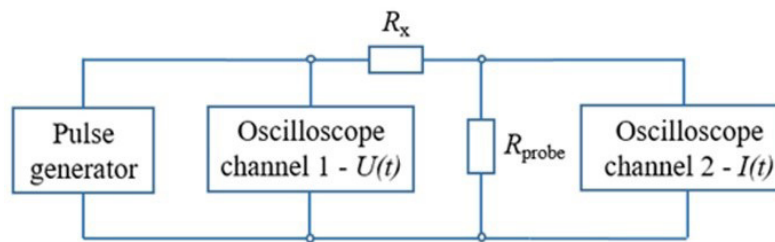


Рис. 2. Упрощенная схема экспериментальной установки.

$R_x$  – экспериментальный образец,  $R_{probe}$  – токовый шунт

Fig. 2. Simplified scheme of experimental setup.  $R_x$  – experimental sample,  $R_{probe}$  – current probe

### Расчетная модель

Для моделирования электротеплового разрушения соединительных мостиков и последующего изолирования сегментов в процессе СВ использовался программный пакет COMSOL Multiphysics. В расчетной модели были использованы следующие программные модули:

- Electric Currents in Shells – для расчета поля токов в металлизации;
- Electrical Circuit – для учета элементов внешней цепи и переходного сопротивления;
- Heat Transfer in Solids – для расчета теплового поля.

Расчет осуществлялся во временной области (тип решения Time Dependent) с использованием 3-х мерной геометрии. В расчетной модели использованы уравнения поля токов и уравнение теплопроводности:

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

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

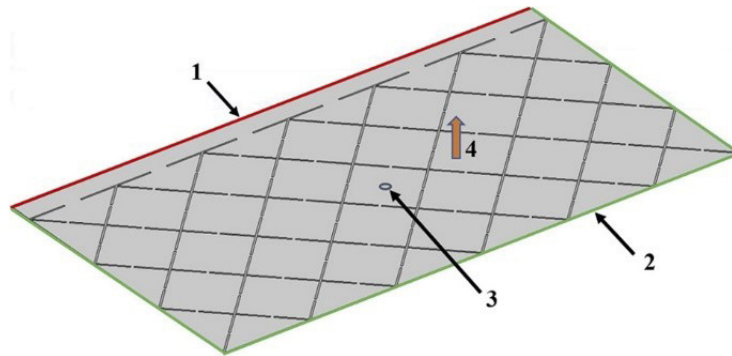


Рис. 3. Расчетная область и граничные условия. 1 – электрический потенциал; 2 – электрическая изоляция; 3 – нулевой потенциал; 4 – тепловой поток от металлизации в верхнюю пленку  
 Fig. 3. The calculation geometry and boundary conditions. 1 – electric potential; 2 – electric insulation; 3 – ground; 4 – heat flux from metallization to upside film

где  $J$  – вектор плотности тока,  $E$  – вектор напряженности электрического поля,  $\phi$  – электрический потенциал,  $\sigma(T)$ ,  $\lambda(T)$ ,  $\rho(T)$ ,  $C(T)$  – удельные электропроводность, теплопроводность и теплоемкость материалов,  $T$  – температура,  $Q_v$  – объемное тепловыделение. Данная численная модель учитывает температурные зависимости электрических и тепловых параметров материалов, зависимость электропроводности металлизации от ее толщины, а также скрытую теплоту плавления и испарения металла. Пример расчетной области и граничные условия изображены на рис. 3.

Фазовый переход и испарение металлизации в представленной численной модели реализовано с помощью изменения физических свойств материалов. При достижении температуры испарения  $T_{ev}$  происходит ступенчатое изменение электропроводности и теплопроводности:

$$\sigma_{Me} = \begin{cases} \sigma(T), T < T_{ev} \\ 1S / m, T \geq T_{ev} \end{cases}, \quad (3)$$

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

Метод рандомизации заключается в случайном генерировании неровностей при построении геометрии модели и в случайном задании физических параметров и граничных условий. В данной расчетной модели реализовано случайное построение неровности на краю металлизации в сегментированном узоре. Элементы расчетной области, которым необходимо придать случайную неровность, строятся с помощью параметрических кривых. Уравнение параметрической кривой имеет вид

$$\begin{aligned} X(r) &= r, \\ Y(r) &= Y_0(r) + S(r), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $r$  – значение координаты,  $Y_0(r)$  – координата невозмущенной кривой,  $S(r)$  – периодическая функция случайных возмущений. Данная функция определяется выражением

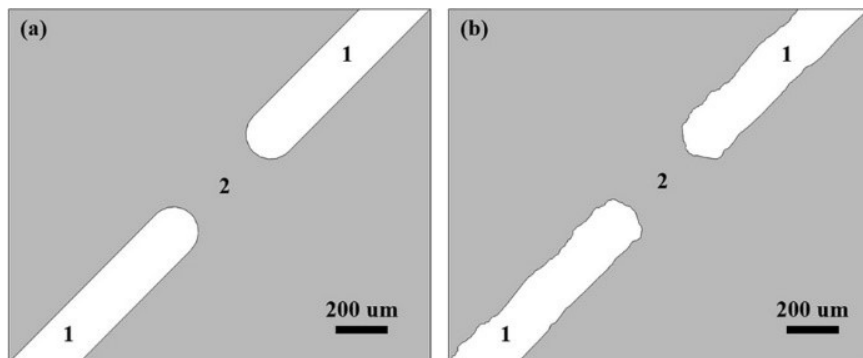


Рис. 4. Вид расчетной области без использования метода рандомизации (а) и с использованием (б). 1 – межсегментный промежуток; 2 – соединительный мостик

Fig. 4. The view of calculation geometry without random irregularities (a) and with it (b). 1 – intersegment gaps; 2 – connecting gate

$$S(r) = \sum_{i=1}^N A_i \cos(\omega_i r + \theta_i), \quad (6)$$

где  $A_i$ ,  $\omega_i$ ,  $\theta_i$  – случайные значения амплитуды, частоты и сдвига фазы периодической функции,  $N$  – число периодических функций. Далее с помощью средств построения геометрии программного пакета осуществляется поворот параметрической кривой на требуемый угол и ее сдвиг по координате. Для построения элементов окружности использовались уравнения

$$\begin{aligned} X(r) &= \cos(2\pi \cdot r)(R + S(r)), \\ Y(r) &= \sin(2\pi \cdot r)(R + S(r)). \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь  $R$  – радиус окружности,  $r$  – безразмерный параметр, который принимает значения от 0 до 1.

В данной расчетной модели используются 2 физических параметра, которые определяются случайной функцией: переходное сопротивление на границе потенциального электрода и металлизации  $R_t$  и величина теплового потока от металлизации в верхнюю пленку  $Q_{up}$ . Данные параметры варьировались в ходе экспериментальных исследований. Степень вариации была установлена при разработке численной модели и составляет  $\sim 10\%$ .

Для генерации случайных значений использовался встроенный алгоритм пакета COMSOL Multiphysics. Случайная генерация параметров  $A_i$ ,  $\omega_i$ ,  $\theta_i$  была подобрана таким образом, чтобы неоднородность границы металлизации варьировалась в пределах  $\pm 5$  мкм, что соответствует экспериментальным образцам. Переходное сопротивление принимало значение  $R_t = 1.5 \pm 0.3 \Omega$ , а величина теплового потока  $Q_{up} = (0.75 \pm 0.05) \times Q_{down}$ . Здесь  $Q_{down}$  – значение теплового потока из металлизации в нижнюю пленку. Вид расчетной области с использованием случайных неровностей и без них представлен на рис. 4. Изменяя начальный параметр функций рандомизации «Random seed», получается различная конфигурация неровностей в расчетной области и значения  $R_t$  и  $Q_{up}$  для каждого нового расчета.

### Результаты и обсуждение

#### *Энергетические характеристики процесса электротеплового разрушения*

Экспериментальные и численные исследования электротеплового разрушения сегментированных электродов МПК дают количественную оценку их эффективности в случае пробоя

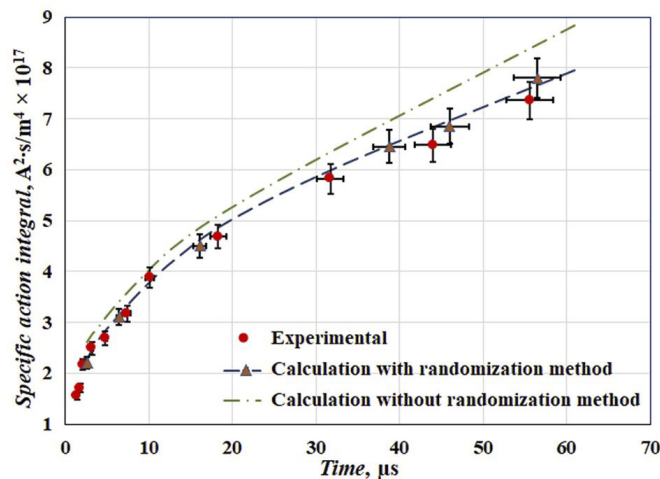


Рис. 5. Экспериментальные и расчетные зависимости интеграла действия тока от длительности разрушения  
 Fig. 5. Experimental and calculation dependencies of specific action integral versus duration of electrothermal destruction

диэлектрика и последующего процесса СВ. Процесс изолирования сегмента характеризуется значением энергии  $W$ , затраченной на испарение соединительных мостиков, и длительностью электротеплового разрушения  $\tau$ . В случаях, когда необходимо сравнить эффективность сегментированных электродов, имеющих разный металл металлизации или узор металлизации, удобно использовать значение интеграла действия тока

$$J = \int_0^{\tau} \left( \frac{I(t)}{4S_{fuse}} \right)^2 dt, \quad (8)$$

где  $I(t)$  – значение тока в цепи,  $S_{fuse}$  – площадь соединительного мостика. Так как в исследуемой металлизации сегменты соединены четырьмя мостиками, то это значение учтено в формуле выше.

Зависимости интеграла действия тока от времени разрушения  $J(\tau)$  могут быть использованы для оценки эффективности сегментированной металлизации и сравнения различных типов сегментированных электродов между собой [9–11]. На рис. 5 представлены экспериментальные и расчетные зависимости  $J(\tau)$ . Видно, что оба типа расчетных зависимостей хорошо соответствуют экспериментальным данным. Однако, численная модель без метода рандомизации дает результаты на 10 – 15 % отличающиеся от экспериментальных значений. Результаты расчета численной модели с методом рандомизации отличаются от экспериментальных на величину не более 5 %. Различие расчетных и экспериментальной зависимостей объясняется наличием неоднородностей в металлизации. Расчетная модель с методом рандомизации учитывает неоднородности на границе металлизации, но не учитывает неоднородностей толщины и возможных микроскопических дефектов на поверхности.

На рис. 6 и 7 представлены логнормальные распределения интеграла действия тока и длительности разрушения для различных значений потенциала на контактной границе. Статистические распределения также показывают различия на величину не более 5 % между экспериментальными и расчетными данными. Следует отметить, что значение потенциала не границе – это не пробивное напряжение конденсатора во время работы. Данное значение потенциала обеспечивает плотность тока в соединительных мостиках, как в случае реального СВ.

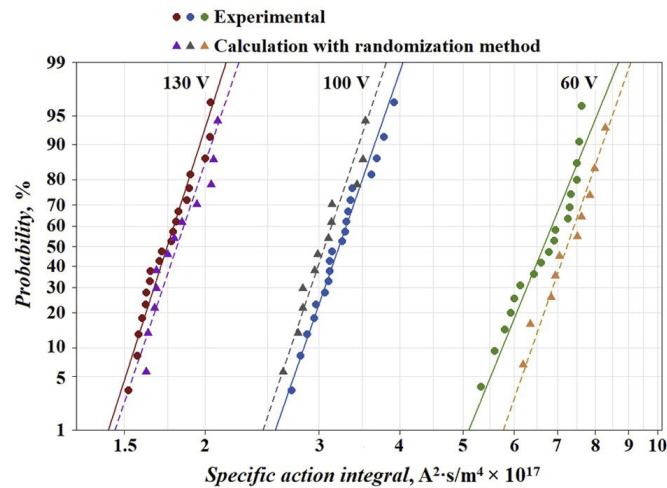


Рис. 6. Логнормальные распределения интеграла действия тока для различного значения потенциала  
 Fig. 6. Lognormal distributions of specific action integral for different value of potential on the contact boundary

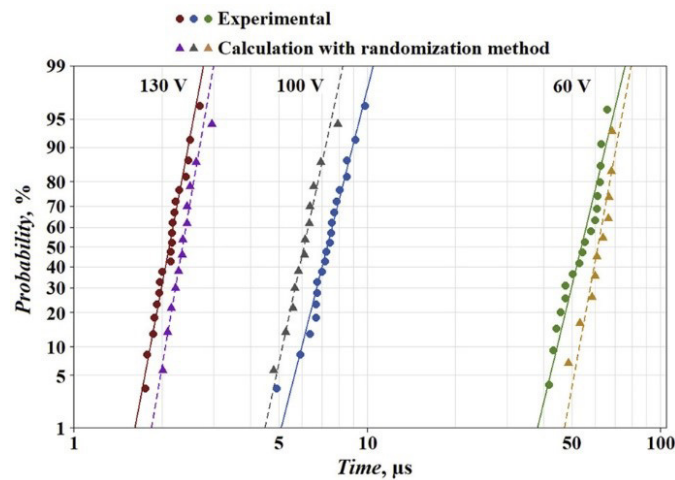


Рис. 7. Логнормальные распределения длительности электротеплового разрушения для различного значения потенциала

Fig. 7. Lognormal distributions of duration of electrothermal destruction for different value of potential on the contact boundary

### Эффективность параллельных вычислений

Представленная численная модель имеет  $\sim 6 \times 10^5$  степеней свободы и решалась с помощью суперкомпьютерного центра СПбПУ. Для повышения скорости вычислений использовалось параллельное решение нескольких задач на одном вычислительном узле. Один узел имеет 56 вычислительных ядер и 64 Гб ОЗУ. На рис. 8 представлена гистограмма относительной длительности расчета модели при различном числе параллельно вычисляемых задач, где  $N_p$  — число параллельных задач и  $t_0$  — время расчета заданного числа  $N_p$ , решаемых последовательно на 1 узле. Установлено, что для данной численной модели наиболее эффективным является запуск 7 параллельных задач. При большем значении  $N_p$  проявляется недостаток оперативной памяти, что замедляет вычисления.



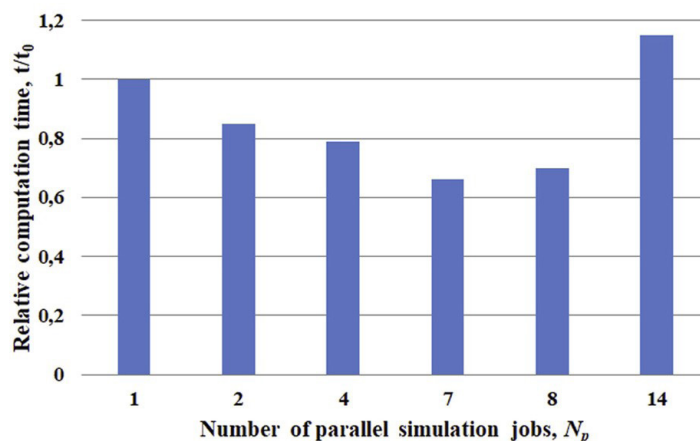


Рис. 8. Гистограмма относительного времени расчета для различного числа параллельных задач  
 Fig. 8. The histogram of relative computation time for a different number of parallel simulation jobs

### Заключение

Метод рандомизации был использован в численной модели электротеплового разрушения сегментированных электродов МПК. Метод рандомизации включает в себя генерацию случайных неровностей на границе металлизации, а также случайное вариацию переходного сопротивления на границе потенциального электрода и металлизации, и величины теплового потока в дополнительную верхнюю пленку. Данный метод дополняет разработанную ранее численную модель и позволяет получить большую сходимость экспериментальных и расчетных данных. Тем не менее, более сложная геометрия расчетной области требует более детальной сетки конечных элементов, что сильно усложняет расчет. На практике могут быть использованы оба типа численных моделей с одинаковой эффективностью, но необходимо учитывать возможное отклонение от экспериментальных данных.

Для представленной расчетной модели с методом рандомизации применен метод параллельных вычислений нескольких задач. Установлено, что для данных параметров вычислительного узла наиболее эффективным является запуск 7 параллельных задач.

Метод рандомизации также может быть использован для генерации случайных неровностей поверхностей 3-х мерных объектов. Метод также позволяет получить случайное распределение физических величин в расчетной области, что может быть использовано в численном моделировании статистически случайных процессов, например электрического пробоя диэлектриков, электрического взрыва проводников и многих других.

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ №19-79-10075.

Результаты расчетов были получены с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютерного центра Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого ([www.spbstu.ru](http://www.spbstu.ru)).

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] 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) 766–785.

- [2] **Ho J., Jow T.R., Boggs S.** Historical introduction to capacitor technology // IEEE Electrical Insulation Magazine, 26 (1) (2010) 20–25.
- [3] **Sarjeant W.J., Zirnheld J., MacDougall F.W.** Capacitors // IEEE Transactions on Plasma Science, 26 (5) (1998) 1368–1392.
- [4] **Кучинский Г.С., Назаров Н.И.** Силовые электрические конденсаторы. М.: Энергоатомиздат, 1992. 319 с.
- [5] **Liang Y., Wang D., Gao L., Liu D.** Calculation of Temperature Field in Power Capacitor // IEEE Transactions on Industrial Electronics, 62 (5) (2015) 2788–2794.
- [6] **Wang Z., Yan F., Xu M., Wang Z., Wang X., Xu Z.** Influence of External Factors on Self-healing Capacitor Temperature Field Distribution and Its Validation // IEEE Transactions on Plasma Science, 45 (7) (2017) 1680–1688.
- [7] **Furlan V., Glinšek S., Kmet B., Pečnik T., Malič B., Vidmar M.** Influence of Numerical Method and Geometry Used by Maxwell's Equation Solvers on Simulations of Ferroelectric Thin-Film Capacitors // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 63 (3) (2015) 891–896.
- [8] **Zheng L., Zhang Y., Bakir M.S.** Full-Chip Power Supply Noise Time-Domain Numerical Modeling and Analysis for Single and Stacked ICs // IEEE Transactions on Electron Devices, 63 (3) (2016) 1225–1231.
- [9] **Ivanov I., Glivenko D., Feklistov E., Belko V., Kulbako K.** Efficiency Evaluation of Electrodes Segmentation Patterns for Metallized Film Capacitors // 2020 IEEE 61<sup>th</sup> International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON) (2020) 1–5.
- [10] **Иванов И.О., Белько В.О., Гливенко Д.Ю., Феклистов Е.Г., Кульбако К.А.** Исследование эффективности сегментированных электродов металлопленочных конденсаторов // Проблемы региональной энергетики, 47 (3) (2020) 1–9.
- [11] **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.
- [12] **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.
- [13] **Belko V., Glivenko D., Emelyanov O., Ivanov I., Plotnikov A.** Current pulse polarity effect on metalized film capacitors failure // IEEE Transactions on Plasma Science, 45 (6) (2017) 1020–1025.
- [14] **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, 55 (12) (2015) 2721–2726.
- [15] **Makdessi M., Sari A., Venet P.** Metallized polymer film capacitors ageing law based on capacitance degradation // Microelectronics Reliability, 54 (9-10) (2014) 1823–1827.

### 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>

**ХОДЖАМОВ Ахмет** — студент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: akhodzhamov@mail.ru

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

## REFERENCES

- [1] **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) 766–785.
- [2] **J. Ho, T.R. Jow, S. Boggs**, Historical introduction to capacitor technology // *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 26 (1) (2010) 20–25.
- [3] **W.J. Sarjeant, J. Zirnheld, F.W. MacDougall**, Capacitors // *IEEE Transactions on Plasma Science*, 26 (5) (1998) 1368–1392.
- [4] **G.S. Kuchinskiy, N.I. Nazarov**, *Silovyye elektricheskiye kondensatory*. M.: Energoatomizdat, 1992. 319 s.
- [5] **Y. Liang, D. Wang, L. Gao, D. Liu**, Calculation of Temperature Field in Power Capacitor // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62 (5) (2015) 2788–2794.
- [6] **Z. Wang, F. Yan, M. Xu, Z. Wang, X. Wang, Z. Xu**, Influence of External Factors on Self-healing Capacitor Temperature Field Distribution and Its Validation // *IEEE Transactions on Plasma Science*, 45 (7) (2017) 1680–1688.
- [7] **V. Furlan, S. Glinšek, B. Kmet, T. Pečnik, B. Malič, M. Vidmar**, Influence of Numerical Method and Geometry Used by Maxwell's Equation Solvers on Simulations of Ferroelectric Thin-Film Capacitors // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 63 (3) (2015) 891–896.
- [8] **L. Zheng, Y. Zhang, M.S. Bakir**, Full-Chip Power Supply Noise Time-Domain Numerical Modeling and Analysis for Single and Stacked ICs // *IEEE Transactions on Electron Devices*, 63 (3) (2016) 1225–1231.
- [9] **I. Ivanov, D. Glivenko, E. Feklistov, V. Belko, K. Kulbako**, Efficiency Evaluation of Electrodes Segmentation Patterns for Metallized Film Capacitors // 2020 IEEE 61<sup>th</sup> International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON) (2020) 1–5.
- [10] **I.O. Ivanov, V.O. Belko, D.Yu. Glivenko, Ye.G. Feklistov, K.A. Kulbako**, Issledovaniye effektivnosti segmentirovannykh elektrodov metalloplenochnykh kondensatorov // *Problemy regionalnoy energetiki*, 47 (3) (2020) 1–9.
- [11] **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.
- [12] **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.
- [13] **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.
- [14] **H. Li, H. Li, Z. Li, F. Lin, W. Wang, B. Wang, X. Huang, X. Guo**, Temperature dependence of self-healing characteristics of metallized polypropylene film // *Microelectronics Reliability*, 55 (12) (2015) 2721–2726.
- [15] **M. Makdessi, A. Sari, P. Venet**, Metallized polymer film capacitors ageing law based on capacitance degradation // *Microelectronics Reliability*, 54 (9-10) (2014) 1823–1827.

**THE AUTHORS**

**IVANOV Ivan O.** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: ivanov.eicc@yandex.ru

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

**GLIVENKO Dmitriy Y.** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: dmitry141094@gmail.com

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

**HOJAMOV Akhmet** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: akhodzhamov@mail.ru

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

Статья поступила в редакцию 15.07.2021; одобрена после рецензирования 22.07.2021; принята к публикации 14.09.2021.

The article was submitted 15.07.2021; approved after reviewing 22.07.2021; accepted for publication 14.09.2021.