

УДК 621.319.4

DOI 10.22213/2410-9304-2018-3-58-65

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЗАРЯДЕ КОНДЕНСАТОРА С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Б. И. Сибгатуллин, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия
В. К. Барсуков, кандидат технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Танталовые конденсаторы имеют большую удельную емкость благодаря пористой структуре анода. Эта особенность их строения приводит к тому, что при анализе на высоких частотах или расчете переходных процессов с малым значением постоянной времени танталовый конденсатор нельзя рассматривать как элемент с сосредоточенными параметрами. При этом лестничная схема замещения дает более точные результаты расчетов в частотной и временной областях. Можно предположить, что в процессе заряда конденсатора с распределенными параметрами напряженность электрического поля и плотность тока распределены неравномерно по структуре конденсатора, что может приводить к неравномерной нагрузке на различные области конденсатора. Для проверки этой гипотезы был проведен конечно-элементный анализ процесса заряда структуры конденсатора с распределенными параметрами, который показал, что области конденсатора, расположенные вблизи катодного вывода, подвергаются воздействию зарядных токов большей амплитуды. Возможны ситуации, при которых в этих областях наблюдаются колебательные переходные процессы при общем аperiodическом процессе заряда конденсатора, что приводит к возникновению перенапряжений в этих областях. Степень влияния распределенности параметров конденсатора на характер переходных процессов снижается с ростом проводимости материала катода.

Ключевые слова: конечно-элементное моделирование, переходные процессы, элементы с распределенными параметрами.

Введение

Танталовые конденсаторы, благодаря пористой структуре анода, обладают большой удельной емкостью (рис. 1) [1]. Вместе с этим пористая структура приводит к распределенности параметров танталового конденсатора, которую

необходимо учитывать на высоких частотах или при малом времени переходных процессов [2, 3]. Одним из вариантов аппроксимации распределенности параметров танталового конденсатора является лестничная схема замещения [4, 5].

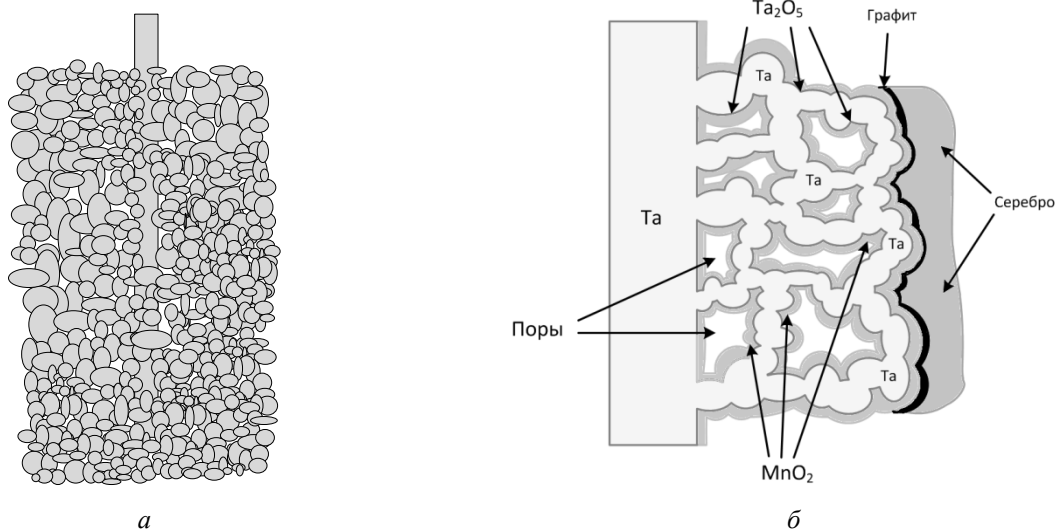


Рис. 1. Пористая структура танталового конденсатора: *а* – схематическое представление танталового анода; *б* – структура анода и катода танталового конденсатора с марганцевым электролитом

Анализ, проведенный в [6], показал, что при некоторых условиях расчет переходных процессов заряда танталового конденсатора с использованием лестничной и *RCL*-схем замещения может дать различные результаты. Особенно сильно разница будет проявляться при малых

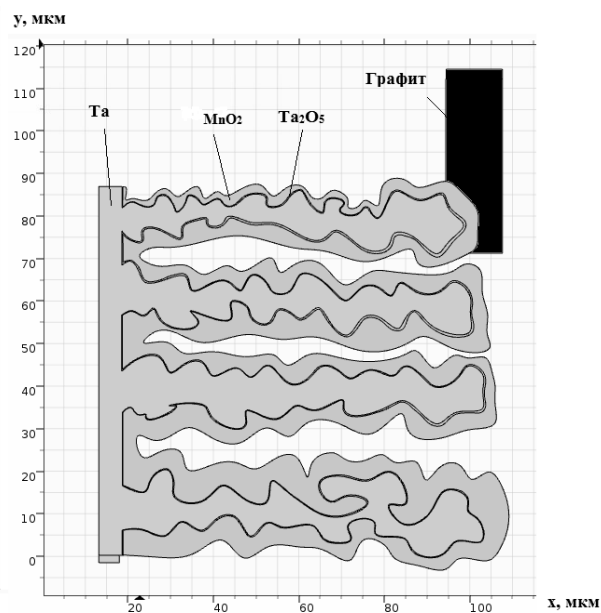
значениях сопротивления и индуктивности стента [7, 8], когда параметры цепи заряда будут по большей части определяться параметрами конденсатора. В таких условиях конденсатор нельзя рассматривать как элемент с сосредоточенными параметрами.

Из-за различных значений постоянных времени RC -цепочек можно предположить, что переходные процессы заряда танталовых зерен в структуре конденсатора могут иметь различный характер.

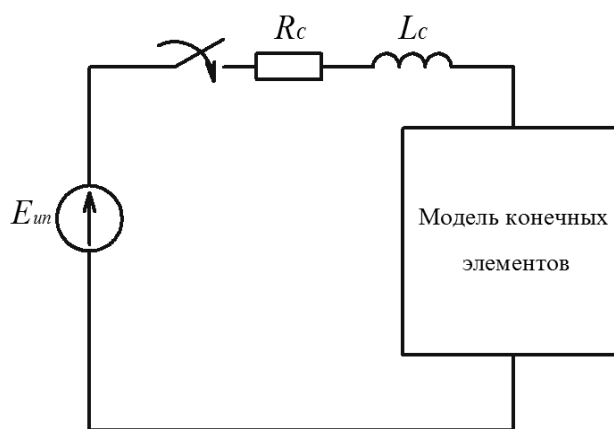
Математическое моделирование процесса заряда конденсатора с распределенными параметрами методом конечных элементов

Для анализа рассматриваемого вопроса было проведено моделирование структуры конденса-

тора с распределенными параметрами (рис. 2, а). Геометрия структуры построена в программном пакете AutoCAD и импортирована в Comsol Multiphysics. Предложенная модель достаточно точно подходит для качественного описания структуры танталового конденсатора. Модель конечных элементов совмещена с моделью электрической цепи, состоящей из источника постоянного напряжения, резистора и индуктивности (рис. 2, б).



а



б

Рис. 2. Модель структуры конденсатора с распределенными параметрами (а), комбинация МКЭ и модели электрической цепи (б)

Параметры материалов при описании модели приняты следующие:

- проводимость MnO_2 $\sigma = 50$ См/м;
- диэлектрическая проницаемость MnO_2 $\epsilon = 1$;
- проводимость Ta_2O_5 $\sigma = 10^{-14}$ См/м;
- диэлектрическая проницаемость Ta_2O_5 $\epsilon = 47$;
- проводимость Ta $\sigma = 8,1 \cdot 10^6$ См/м;
- диэлектрическая проницаемость Ta $\epsilon = 1$;
- проводимость графита $\sigma = 2,59 \cdot 10^6$ См/м;
- диэлектрическая проницаемость графита $\epsilon = 1$;
- размер танталовых гранул – от 2 до 10 мкм.

Толщина оксидного слоя – 20 нм.

Расчетная сетка конечных элементов представлена на рис. 3.

Для упрощения расчета задача решалась в двумерной формулировке. При этом компонента магнитного поля была принята равной нулю.

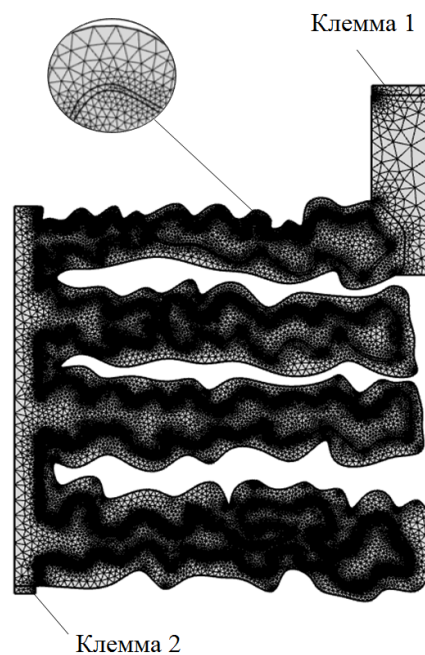


Рис. 3. Сетка конечных элементов модели конденсатора с распределенными параметрами

Распределение плотности тока и напряженности электрического поля по структуре конденсатора описывается с помощью системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} = Q_j, \\ J = \left(\sigma + \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial}{\partial t} \right) E + J_e, \\ E = - \left(\frac{\partial V_x}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial V_y}{\partial y} \vec{j} \right), \end{cases} \quad (1)$$

где Q_j – величина тока распределенного источника тока, при расчете принималось $Q_j = 0$; J_e – внешняя плотность тока, при расчете принималось $J_e = 0$; E – рассчитываемая напряженность электрического поля; J – рассчитываемая плотность тока; σ – проводимость материала; ε_r – диэлектрическая проницаемость материала.

В качестве переменной величины используется значение электрического потенциала V . Таким образом, распределение потенциала по структуре конденсатора рассчитывается следующим образом:

$$\nabla \left[- \left(\sigma + \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \right) \nabla V \right] = 0. \quad (2)$$

Задача решалась в среде Comsol Multiphysics с использованием разрывного метода Галеркина [9].

Граничные условия для решения задачи методом конечных элементов приняты следующие. Для границ модели заданы граничные условия электрической изоляции, для которых справедливо условие:

$$nJ = 0. \quad (3)$$

Начальное значение электрического потенциала для всей области модели принято равным нулю.

Модель конечных элементов совмещена с моделью электрической цепи, состоящей из источника постоянного напряжения, резистора и индуктивности. Модель электрической цепи решается с помощью законов Кирхгофа, при этом рассчитываются значения токов и напряжений на элементах схемы. Рассчитанное значение потенциала из модели электрической цепи является граничным условием для клеммы 1 модели конечных элементов. Потенциал клеммы 2 принят равным нулю.

Разработанная модель структуры конденсатора имеет емкость $C = 1,72$ мкФ и сопротивление $ESR = 1,11$ Ом. Частотная зависимость импеданса модели (рис. 4) качественно совпа-

дает с частотными характеристиками танталовых конденсаторов.

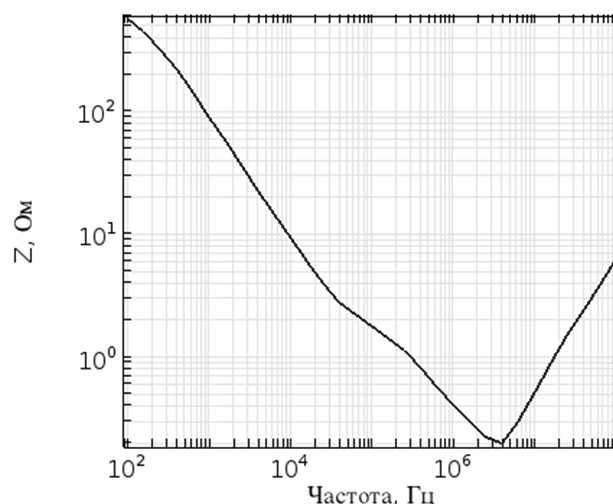


Рис. 4. Частотная зависимость импеданса конденсатора, рассчитанная по модели конечных элементов

Анализ результатов моделирования

При малом значении сопротивления и индуктивности стента ($L_c = 10$ нГн, $R_c = 0,1$ Ом) переходные процессы согласно модели конечных элементов в значительной степени отличаются от переходных процессов, рассчитанных для RCL-схемы замещения (рис. 5). При этом они имеют схожий характер с переходными процессами, рассчитанными с использованием лестничной схемы замещения (большой импульс тока в начальный период заряда, быстрое нарастание напряжения на клеммах конденсатора) [10]. Это обусловлено неравномерным распределением по структуре модели плотности зарядного тока и напряженности электрического поля.

Таким образом, процесс заряда локальной области прикатодной и прианодной области конденсатора может протекать с различной скоростью (рис. 6). Вследствие этого напряженность пробоя диэлектрической пленки области конденсатора вблизи катода может быть значительно ниже напряженности пробоя области конденсатора вблизи анода.

Возможны условия, при которых переходные процессы заряда локальных областей структуры конденсатора могут иметь различный характер (апериодический или колебательный) при общем апериодическом характере переходного процесса. Если сравнить процессы заряда прикатодной и прианодной области структуры, то можно заметить, что процесс заряда области вблизи катода носит колебательный характер, что приводит к возникновению кратковременного перенапряжения на диэлектрике.

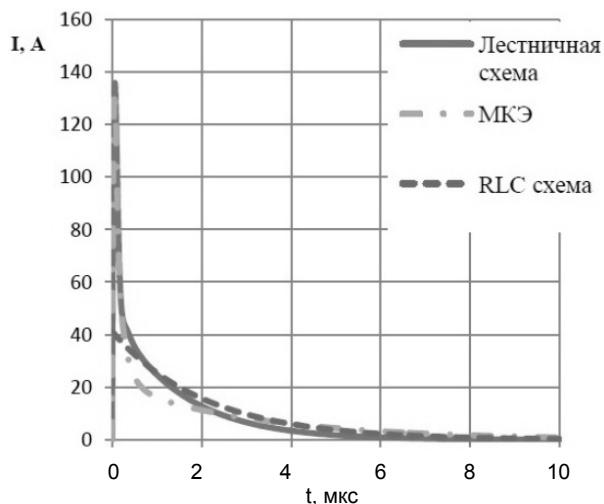


Рис. 5. Сравнение результатов расчета переходных процессов с использованием полученной лестничной схемы замещения и модели конечных элементов

Таким образом, в условиях, когда импеданс зарядной цепи определяется в большей степени параметрами конденсатора, необходимо учитывать особенности его структуры и рассматривать конденсатор как элемент с распределенными параметрами. В этом случае лестничная схема замещения конденсатора дает более точные результаты.

Характер переходных процессов напрямую зависит от параметров материалов конденсатора. Результаты моделирования напряженности электрического поля при различных значениях проводимости катода приведены на рис. 7.

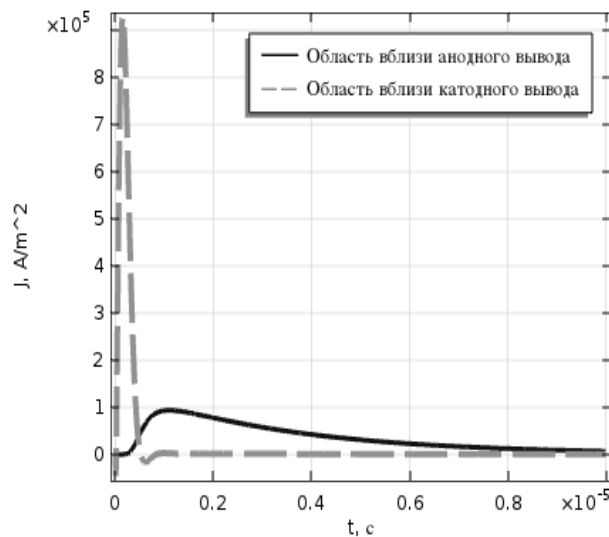
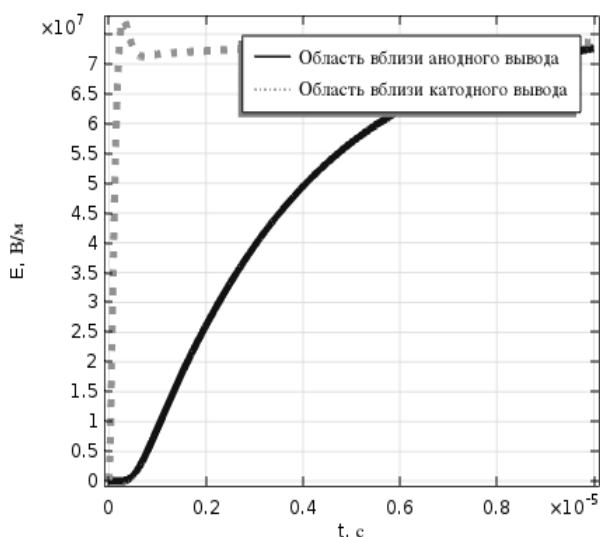


Рис. 6. Процесс заряда внутренней и наружной области структуры модели при $R_c = 0,1$ Ом, $L_c = 30$ нГн

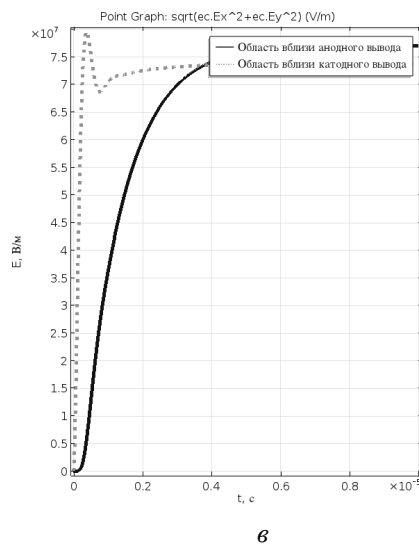
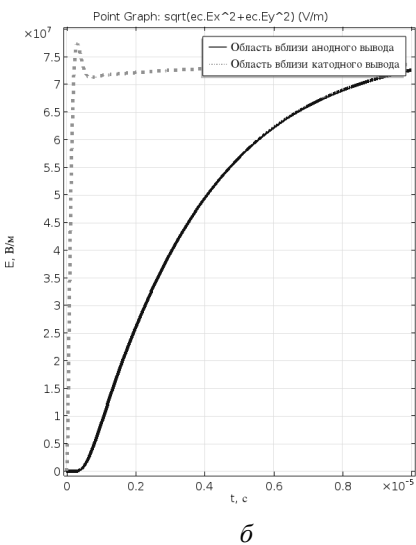
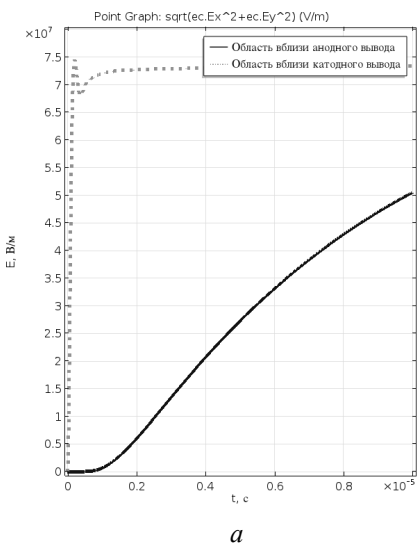


Рис. 7. Напряженность электрического поля в различных областях модели: а – при удельной проводимости катода 20 См/м; б – при удельной проводимости катода 50 См/м, в – удельной проводимости катода 150 См/м

Как видно из результатов моделирования, с ростом проводимости материала катода уменьшается неравномерность распределения напряженности электрического поля по структуре конденсатора, но при этом прикатодные области конденсатора могут подвергаться воздействию больших значений перенапряжений. Например, это может быть справедливо для танталовых конденсаторов с полимерным катодом, имеющих меньшее ESR по сравнению с конденсаторами с марганцевым катодом.

Помимо этого, с ростом проводимости материала катода уменьшается расхождение в результатах расчета на основе МКЭ и RCL -схемы замещения (рис. 8).

Для того чтобы провести анализ распределения напряженности электрического поля при заряде конденсатора в различные моменты времени, было сделано допущение, что распределенность параметров танталового конденсатора можно представить в виде геометрической структуры плоского протяженного конденсатора.

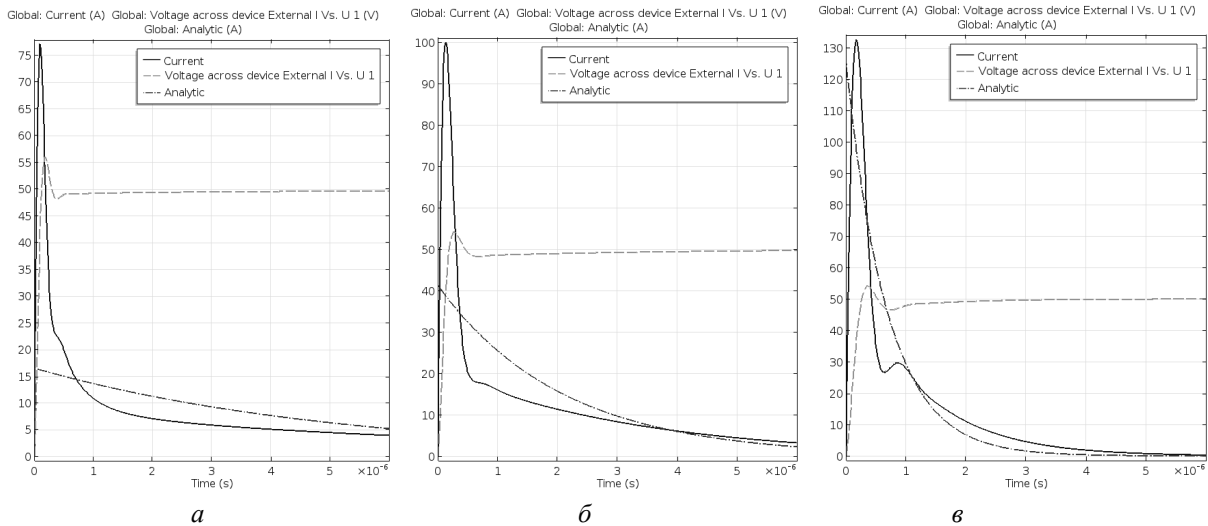


Рис. 8. Результаты расчета переходных процессов методом конечных элементов и с использованием RCL -схемы замещения: а – при удельной проводимости катода 20 См/м ; б – при удельной проводимости катода 50 См/м ; в – при удельной проводимости катода 150 См/м

С помощью этой модели могут быть построены зависимости относительной напряженности электрического поля $E/E_{уст}$, где $E_{уст}$ – установившееся значение напряженности электрического поля, от расстояния до катодного вывода $L_{ЭКВ}$ в различные моменты времени. Для

анализа представляют интерес момент времени t_{max} , соответствующий максимальному значению напряженности электрического поля в прикатодной области, и момент времени, близкий к завершению переходных процессов, например, $t = 2 \text{ мкс}$ (рис. 9, а, б).

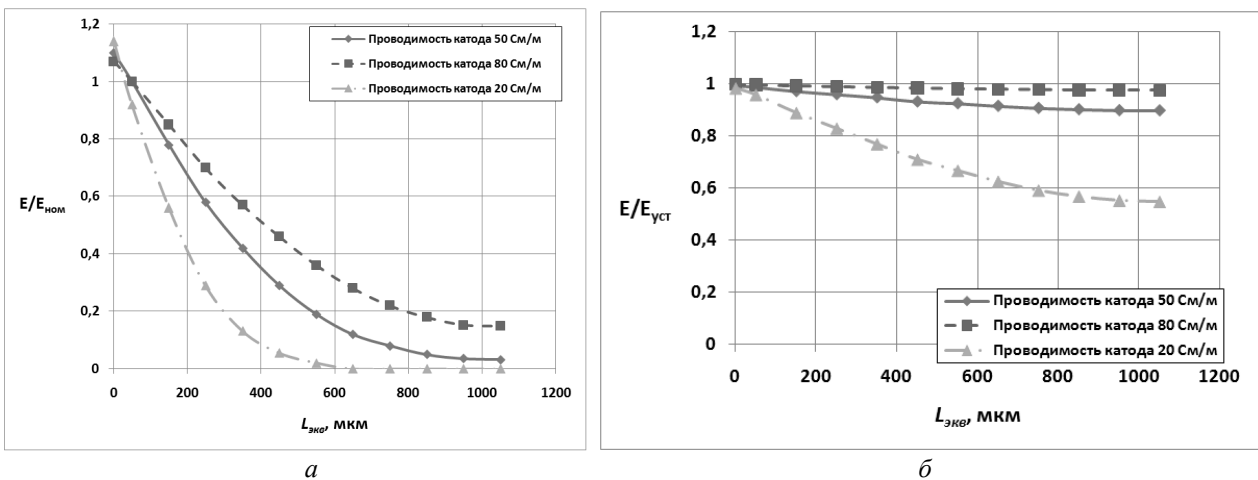


Рис. 9. Зависимости напряженности электрического поля от длины эквивалентного пути протекания зарядного тока: а – $L_{ЭКВ}$ в момент времени t_{max} , соответствующий максимальному значению напряженности электрического поля в прикатодной области; б – в момент времени $t = 2 \text{ мкс}$.

Для проверки адекватности предложенной модели и целесообразности использования лестничной схемы замещения при расчете переходных процессов были проведены измерения амплитуды импульса тока при заряде конденсатора в цепи с низким сопротивлением. Схема заряда конденсатора состояла из электролитического конденсатора EPCOS емкостью $C = 22000$ мкФ, полевого транзистора IRF3077 и токоизмери-

тельного шунта 75ШСМ3. Таким образом, сопротивление цепи заряда главным образом определялось ESR танталового конденсатора, которое имеет распределенный характер. График зарядного тока танталовых конденсаторов емкостью 68 и 680 мкФ приведен на рис. 10. Для измерения тока использовался осциллограф TechtronixTDS2024C.

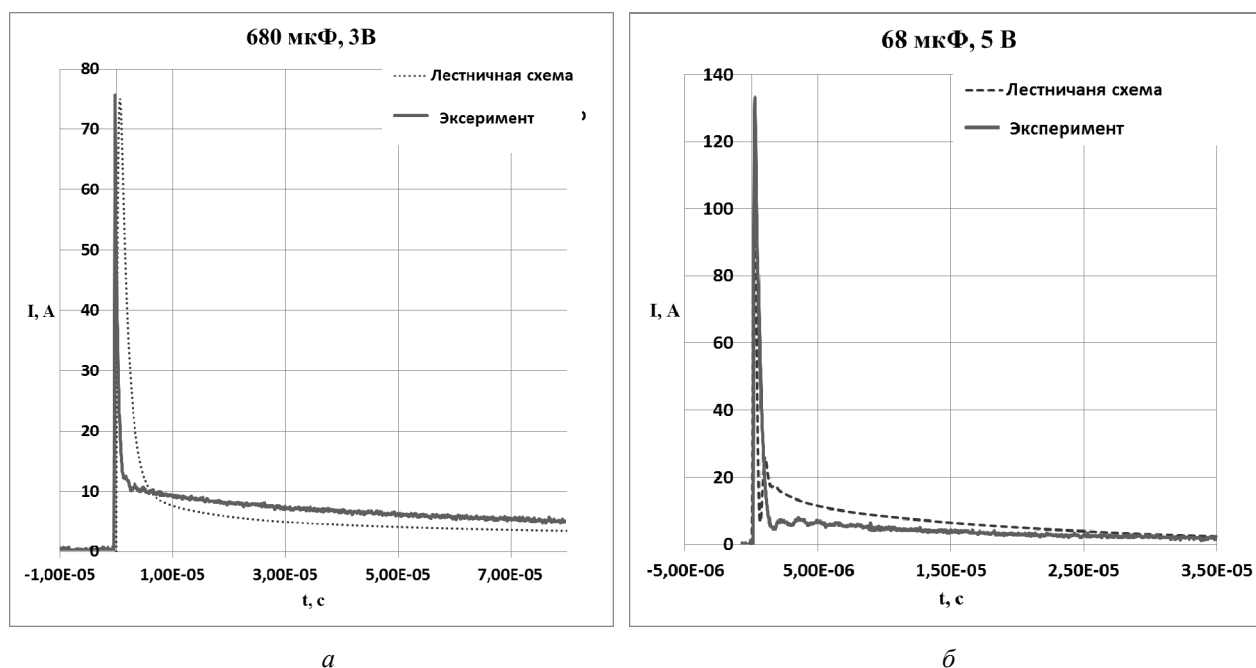


Рис. 10. График зарядного тока танталового конденсатора емкостью 68 мкФ (а) и 680 мкФ (б)

Таким образом, форма зарядного тока танталового конденсатора имеет аналогичный вид, получаемый при использовании МКЭ или лестничной схемы замещения, что подтверждает адекватность модели.

Предложенная модель позволяет выдвинуть гипотезу о том, что при заряде танталового конденсатора локальные области диэлектрика могут подвергаться воздействию перенапряжений при общем аperiodическом процессе заряда, что может объяснить снижение напряжения пробоя конденсаторов при заряде от источника с низким импедансом.

Выводы

1. При анализе переходных процессов через танталовый конденсатор в цепи с малым сопротивлением играет роль распределенность параметров танталового конденсатора. Одной из схемотехнических аппроксимаций для расчета переходных процессов в таких условиях может служить лестничная схема замещения.

2. При заряде конденсатора в цепи с малым сопротивлением могут возникнуть ситуации,

когда прикатодные области конденсатора подвергаются воздействию перенапряжений вследствие локальных колебательных переходных процессов.

3. С ростом проводимости материала катода степень влияния распределенности параметров танталового конденсатора на характер переходных процессов снижается.

4. Характер переходных процессов, рассчитанных по модели конечных элементов, имеет качественно схожий характер с переходными процессами, рассчитанными по лестничной схеме замещения и наблюдаемыми при заряде танталового конденсатора в цепи с низким импедансом.

5. Подобный характер переходных процессов может быть присущ всем элементам, обладающим распределенностью параметров, при условиях, когда импеданс внешней цепи мал по сравнению с импедансом элемента.

Библиографические ссылки

1. Holman, Brian, The electrical characterization of tantalum capacitors as mis devices (2008) // All Theses. Paper 393.
2. Барсуков В. К., Сибгатуллин Б. И. Расчет и моделирование переходных процессов при испытаниях танталовых конденсаторов импульсным током // Интеллектуальные системы в производстве. 2015. № 1 (25). С. 115–120.
3. Sullivan C. R., Kern A. M. Capacitors with fast current switching require distributed models // Proceedings of the 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference. PESC 2001, 17-21 June 2001, pp. 1497-1503.
4. Prymak J. D. Capacitors EDA models with compensations for frequency, Temperature and DC bias // CARTS-CONFERENCE – Electronic Components Association, 2010.
5. Prymak J. SPICE modeling of capacitors // CARTS-CONFERENCE – COMPONENTS TECHNOLOGY INSTITUTE INC, 1995. С. 39-39.
6. Барсуков В. К., Сибгатуллин Б. И. Calculation and simulation of transients during charging of tantalum capacitors // Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке: сб. матер. конф. Ижевск, 2015. С. 883–889.
7. Teverovsky A. Effect of inductance and requirements for surge current testing of tantalum capacitors // Carts-conference - Components technology institute inc., 2006.
8. Reed E. K., Paulsen J. L. Impact of circuit resistance on the breakdown voltage of tantalum chip capacitors // Proceedings of the CARTS, 2001, pp. 150-156.
9. Григорьев А. Д. Методы вычислительной электродинамики. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2012. 432 с.
10. Определение параметров схем замещения танталовых конденсаторов по экспериментальным характеристикам / В. К. Барсуков, М. Л. Новоселов, М. А. Пустовалов, А. В. Соломин, М. А. Чепкасова // Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании 2011 : сборник научных трудов SWorld. Материалы международной научно-практической конференции. 2011. Вып. 4. Т. 10. С. 72–79.

References

1. Holman, Brian The electrical characterization of tantalum capacitors as mis devices, 2008. All Theses. Paper 393.
2. Barsukov V. K., Sibgatullin B. I. [Calculation and modeling of transient processes in the testing of tantalum capacitors by pulse current]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2015, vol. 25, no. 1, pp. 115-120 (in Russ.).
3. Sullivan C. R., Kern A. M. (2001) Capacitors with fast current switching require distributed models. Proceedings of the 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference. PESC, pp. 1497-1503.
4. Prymak J. D. (2010) Capacitors EDA models with compensations for frequency, Temperature and DC bias. CARTS-CONFERENCE, Electronic Components Association.
5. Prymak J. (1995) SPICE modeling of capacitors. CARTS-CONFERENCE, COMPONENTS TECHNOLOGY INSTITUTE INC, pp. 39-39.
6. Barsukov V. K., Sibgatullin B. I. Calculation and simulation of transients during charging of tantalum capacitors. *Molodye uchenye – uskoreniyu nauchno-tekhnicheskogo progressa v XXI veke: sb. mat. konf.* [Young scientists – acceleration of scientific and technical progress in the xxi century]. Izhevsk, 2015, pp. 883-889 (in Russ.).
7. Teverovsky A. (2006) Effect of inductance and requirements for surge current testing of tantalum capacitors, Carts-conference, Components technology institute inc.
8. Reed E. K., Paulsen J. L. (2001) Impact of circuit resistance on the breakdown voltage of tantalum chip capacitors. Proceedings of the CARTS, pp. 150-156.
9. Grigor'ev A. D. (2012) *Metody vychislitel'noj ehlektrodinamiki* [Methods of computational electrodynamics]. Moscow: FIZMATLIT Publ., 432 p. (in Russ.).
10. Barsukov V. K., Novoselov M. L., Pustovalov M. A., Solomin A. V., Chepkasova M. A. *Opreделение parametrov skhem zameshcheniya tantalovykh kondensatorov po ehksperimental'nym harakteristikam* [Determination of parameters of substitution schemes for tantalum capacitors according to experimental characteristics]. *Sovremennye problemy i puti ih resheniya v nauke, transporte, proizvodstve i obrazovanii 2011. Sbornik nauchnykh trudov SWorld. Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Modern problems and ways of their solution in science, transport, production and education 2011], 2011, vol 10, no. 4, pp. 72-79 (in Russ.).

Finite-Element Modeling of Transients in Capacitor with Distributed Parameters

B. I. Sibgatullin, Post-graduate, Kalashnikov ISTU

V. K. Barsukov, PhD in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU

Tantalum capacitors have high capacitance per volume due to the porous anode structure. This feature of their structure leads to the fact that when analyzing at high frequencies or calculating transient processes with a small value of the time constant, the tantalum capacitor can not be considered as an element with lumped parameters. In this case, the ladder equivalent circuit gives more accurate results of calculations in the frequency and time domains. It can be assumed that in the process of charging a capacitor with distributed parameters, the electric field and current density are distributed non-uniformly over the capacitor structure, which can lead to an uneven load on different regions of the capacitor. To test this hypothesis, a finite element analysis of the

charging process of the capacitor structure with distributed parameters was conducted, which showed that the regions of the capacitor located near the cathode terminal are exposed to charging currents of a larger amplitude. There are situations in which oscillating transient processes are observed in these regions with the general aperiodic process of charging a capacitor, which leads to the occurrence of overvoltages in these regions. The degree of influence of the distribution of the parameters of the capacitor on the nature of the transient processes decreases with increasing conductivity of the cathode material.

Keywords: finite element modeling, transient processes, elements with distributed parameters.

Получено: 29.06.18