

DOI: 10.5862/JEST.243.9

УДК 537.226.4 , 621.319.1

А.П. Плотников, О.А. Емельянов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ЗАРЯДА-РАЗРЯДА НЕЛИНЕЙНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ

A.P. Plotnikov, O.A. Emelyanov

NONLINEAR CERAMIC CAPACITORS IN CHARGE-DISCHARGE MODES: EXPERIMENTAL STUDY AND ANALYTICAL CALCULATIONS

Целью работы является экспериментальное и теоретическое исследование современных коммерчески доступных многослойных керамических конденсаторов с диэлектриками, относящимися к различным группам термической стабильности емкости, – X7R, Y5V, Z5U, N90. Экспериментально получены зависимости емкости конденсаторов от величины приложенного постоянного напряжения. Предложена нелинейная модель, адекватно описывающая изменение емкости, а также определены параметры модели для различных типов нелинейного диэлектрика. Исследованы частотные характеристики и импульсные процессы заряда–разряда керамических конденсаторов с высокой плотностью запасаемой энергии – на уровне 1 Дж/см³. Предложена методика оценки диэлектрических потерь в импульсном режиме, основанная на усреднении частотного спектра эквивалентного последовательного сопротивления конденсатора. Полученные точные амплитудно-временные характеристики процессов соответствуют данным проведенных экспериментов и могут быть применены для непосредственного расчета переходных процессов заряда-разряда нелинейного конденсатора.

СЕГНЕТОЭЛЕКТРИК; КЕРАМИЧЕСКИЙ КОНДЕНСАТОР; НЕЛИНЕЙНОСТЬ; ИМПУЛЬСНЫЙ РЕЖИМ; АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ.

The goal of the paper is in studying modern high-energy density multilayer ceramic capacitors (MLCCs) with nonlinear dielectrics such as X7R, Y5V, Z5U. The charge-discharge modes of MLCCs as well as the frequency spectra of dielectric characteristics such as admittance and equivalent series resistance (ESR) have been investigated. We have proposed an approach to estimating the dielectric loss in pulse modes based on ESR frequency spectrum averaging. The capacitance dependencies on DC bias voltage have been obtained. A mathematical model for analytical calculation of the circuit electrical parameters is proposed. The model takes into account the capacitance dependence on applied voltage. The adequacy of the model is confirmed by the numerical calculations and experimental studies results.

FERROELECTRIC; CERAMIC CAPACITOR; NONLINEAR; PULSE MODE; ANALYTICAL SOLUTION.

Введение

Электрические конденсаторы с высокой – на уровне 0,5 Дж/см³ и выше – плотностью w_s запасаемой энергии входят в состав мощных импульсных накопителей энергии, систем лазерной накачки, импульсных модуляторов, дефибрилляторов и т. д. Значение w_s импульсных конденсаторов зарубежного производства (Германия, США, Япония) уже доведено до уровня 1–1,5 Дж/см³ для

серийных образцов. Разработки конденсаторной техники развиваются в нескольких направлениях. Одно из них связано с созданием новых типов электродных систем высоковольтных пленочных полимерных конденсаторов, обладающих свойством самовосстановления. При этом рабочие значения напряженности электрического поля в конденсаторах с органическим диэлектриком уже приближаются к пределу электрической

прочности самих полимерных материалов, например, для полипропилена теоретическая предельная энергия находится на уровне $\sim 4,5$ Дж/см³ [1–3].

Другое направление повышения энергоэффективности конденсаторов – разработка новых типов диэлектриков. Сюда следует отнести как синтез новых полимерных и керамических материалов, так и создание композиционных диэлектриков на основе микро- и нанонаполнителей. Новые типы керамических диэлектриков обладают чрезвычайным разнообразием электрических свойств, в их числе: сильная полевая нелинейность и частотная зависимость (дисперсия) значений диэлектрической проницаемости $\varepsilon(E, \omega)$ (10–10000 и более), высокий коэффициент теплопроводности и др. Последние тенденции создания энергоемких диэлектриков в лабораториях позволяют достичь w_s уровня десятков Дж/см³ [4–7].

Совершенствование технологии производства многослойных керамических конденсаторов на основе сегнетоэлектриков привело к выпуску изделий, некоторые типы которых уже обладают плотностью запасаемой энергии на уровне 1–3 Дж/см³. К ним относятся известные марки зарубежных диэлектриков X7R (титанаты Ba, Sr с добавками Pb, Nb и др.), Z5U, Y5V и отечественный H90 (релаксорные диэлектрики на основе титанатов и цирконатов Ba, магнийниобата Pb и др.) [8, 9]. В числе тенденций последнего десятилетия – постепенное расширение использования обсуждаемых типов конденсаторов в изделиях импульсной техники, где раньше традиционно рассматривались только пленочные конденсаторы [10–12].

Одно из существенных свойств рассматриваемых конденсаторов – сильная зависимость емкости от приложенного напряжения, что приводит к нелинейности режимов электрической цепи, анализ которых обычно проводят на основе численного моделирования. Вместе с тем особенности зависимости емкости некоторых конденсаторов от напряжения позволяют предложить сравнительно простую модель, позволяющую получить точные аналитические решения для режимов заряда и разряда, а также оценить временные и энергетические параметры указанных процессов. Адекватность предложенной модели подтверждена экспериментальными исследова-

ниями нескольких типов современных многослойных керамических конденсаторов зарубежного и отечественного производства. Насколько нам известно, подобные результаты пока не нашли отражения в научно-технической литературе.

Экспериментальная часть

Были исследованы керамические выводные многослойные конденсаторы разных групп температурной стабильности емкости (ТСЕ), как импортные (Murata Manufacturing – X7R, Z5U; Megatone Electronics Corp. – Y5V), так и отечественного (Монолит – H90) производства номинальной емкостью 1 мкФ, с рабочим напряжением от 50 до 100 В. С помощью измерителя импеданса E7-20 были измерены емкость и тангенс угла электрических потерь в диапазоне частот 100 Гц – 1 МГц при напряжении смещения до 120 В включительно. Найденные зависимости относительной емкости от величины постоянного напряжения конденсаторов удовлетворительно описываются функциональным соотношением вида

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{1 + b(U_c - U_0)^2}, \quad (1)$$

где b – коэффициент, $1/B^2$; U_0 – напряжение, при котором емкость имеет максимум; C_0 – величина емкости при нулевом напряжении смещения. Значения коэффициента b , а также начальные значения емкости C_0 , тангенса угла потерь $\text{tg}\delta_0$ и напряжения U_0 представлены в таблице. Следует отметить, что в публикациях предложен ряд феноменологических моделей полевой зависимости диэлектрической проницаемости различных сегнетоэлектриков [13–15], а температурная зависимость проницаемости наиболее корректно учтена в [16]. В нашем случае температурными эффектами в выбранных режимах исследования (однократные импульсы заряда–разряда) можно пренебречь. Зависимость (1) вполне согласуется с моделью, приведенной в [13].

Параметры исследуемых конденсаторов

Конденсатор	$b \cdot 10^{-6}, 1/B^2$	$C_0, \text{мкФ}$	$\text{tg}\delta_0 \cdot 10^{-4}$	$U_0, \text{В}$
X7R	854	1,018	137	5
Y5V	2466	0,969	320,5	0
Z5U	2195	0,903	191	5
H90	4382	1,619	135,5	0

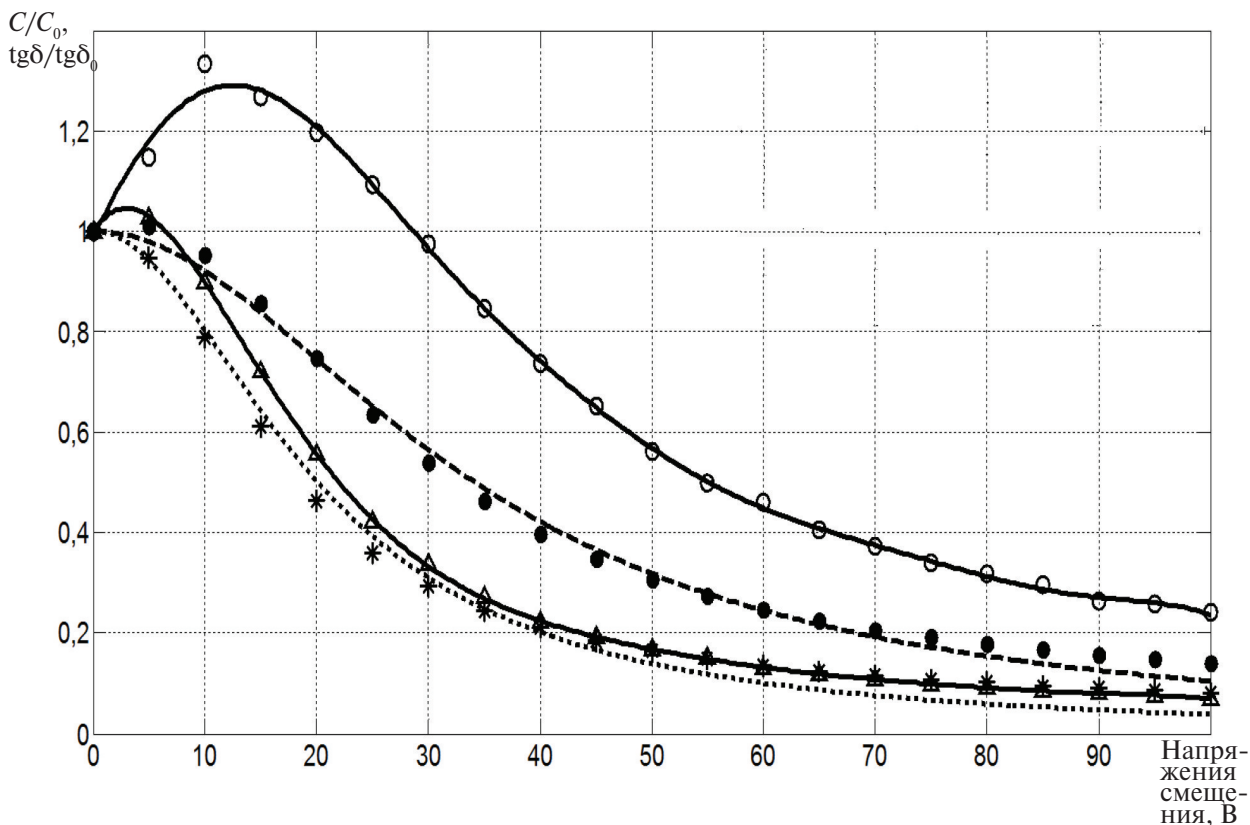


Рис. 1. Пример нормированных зависимостей C и $\text{tg}\delta$ для X7R и Y5V конденсаторов и их аппроксимации в соответствии с (1):

• – X7R (емкость); * – Y5V (емкость); Δ – Y5V (тангенс угла потерь); \circ – X7R (тангенс угла потерь); ■■■ – аппроксимирующая кривая при $R\text{-square} = 0,98$; - - - аппроксимирующая кривая при $R\text{-square} = 0,99$

На рис. 1 в качестве примера представлен график зависимости емкости и тангенса угла потерь на частоте $f = 1$ кГц от напряжения смещения для конденсаторов X7R и Y5V. Кривые нормированы на начальное значение при нулевом напряжении смещения. Приведены аппроксимирующие кривые изменения емкости, точность аппроксимации оценивалась коэффициентом детерминации (R-square): чем ближе параметр к единице, тем точнее аппроксимация.

Были получены частотные спектры полной проводимости $Y = f(\omega)$ и фазового угла $\theta = f(\omega)$ в диапазоне частот 0,1 Гц–5 МГц, амплитуда измерительного сигнала – 1 В. Измерения производились с помощью измерителей импеданса Nioki IM3570 и Nioki IM3533. На основе анализа конструкций конденсаторов определялось значение относительной диэлектрической про-

ницаемости диэлектрика ϵ_r . Принимая емкость $C_0 \sim 1$ мкФ по формулам $Y_a = |\dot{Y}(\omega)|\cos\theta$; $Y_r = |\dot{Y}(\omega)|\sin\theta$; $\epsilon' = Y_r/\omega C_\infty$; $C_\infty = C_0/\epsilon_r$, были рассчитаны частотные зависимости активной $Y_a = f(\omega)$ и реактивной $Y_r = f(\omega)$ компонент полной проводимости и относительной диэлектрической проницаемости $\epsilon = f(\omega)$, а также C_∞ – геометрическая емкость конденсатора. На рис. 2 приведен пример частотных характеристик конденсатора Murata ($\epsilon_r \sim 3000$).

Анализ спектра показывает, что резонансная частота конденсатора приблизительно равна 3,5 МГц. Можно заметить также, что до частот 10^5 – 10^6 Гц относительная диэлектрическая проницаемость практически не испытывает изменений, что соответствует обычному линейному росту реактивной проводимости на семь порядков. Вместе с тем активная проводимость конденсатора также возрастает на семь порядков,

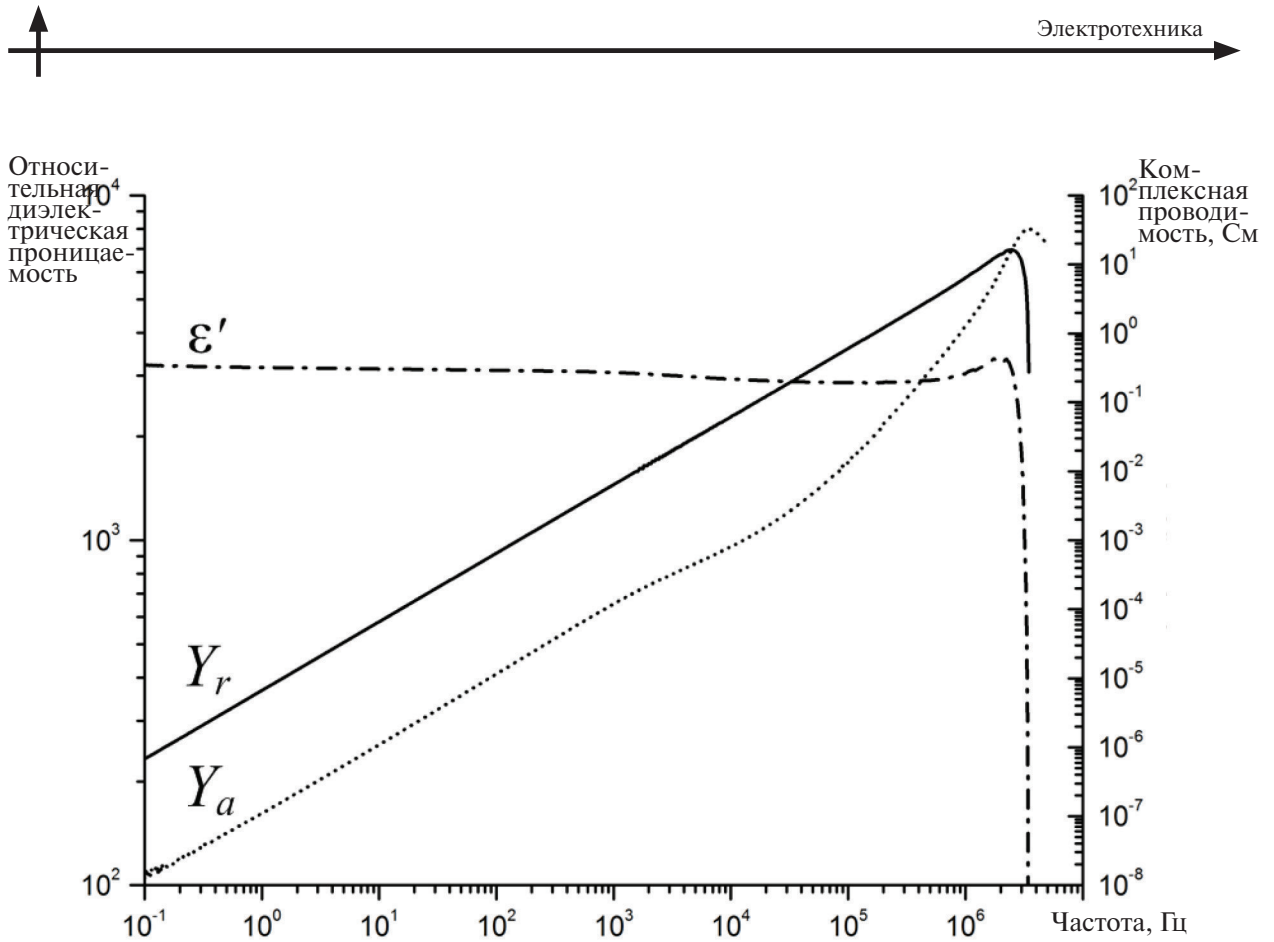


Рис. 2. Частотные спектры диэлектрических характеристик конденсатора X7R

что трудно объяснить на основе традиционных эквивалентных схем замещения конденсатора. По-видимому, имеет место прыжковая электропроводность керамического диэлектрика, характеризующаяся частотной зависимостью $\sim \omega^s$, где $s \sim 0,9$.

Математическая модель

Для получения аналитического решения уравнений заряда–разряда конденсатора была использована последовательная схема замещения в условиях

$$\begin{aligned} \max\left(\frac{1}{C} \frac{dC}{dU}\right) &\gg \max\left(\frac{1}{ESR} \frac{d(ESR)}{dU}\right); \\ \max\left(\frac{d \ln C}{d \ln U}\right) &\gg \max\left(\frac{d \ln C}{d \ln f}\right), \end{aligned} \tag{2}$$

что подтверждается экспериментом. ESR для X7R конденсатора изменяется от 2 до 4 Ом во всем диапазоне напряжения (при $f = 1$ кГц), а значение диэлектрической проницаемости немного (\sim на 15 %) возрастает с частотой, в то

время как емкость (диэлектрическая проницаемость) в диапазоне рабочего напряжения снижается на порядок. В таком случае уравнение, описывающее режимы заряда–разряда для схемы, приведенной на рис. 3, имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{C_0}{1+b(U_c-U_0)^2} \frac{dU_c}{dt} R+U_c &= \\ &= \begin{cases} E_0 & \text{при заряде} \\ 0 & \text{при разряде} \end{cases}, \end{aligned} \tag{3}$$

где $R = ESR + R_{ext}$ – сумма эквивалентного последовательного сопротивления конденсатора и его сопротивления в его внешней цепи.

ESR можно оценить на основе усреднения частотного спектра эквивалентного последовательного сопротивления конденсатора, с учетом того, что оно независимо от выбранной схемы замещения представляет собой действительную часть импеданса: $ESR = \text{Re}(\dot{Z}(\omega)) = \cos\theta/|\dot{Y}(\omega)|$. Так как фазовый угол слабо изменяется в области до резонанса, а $Y \sim \omega$, то $ESR \sim \omega^{-1}$. ESR в области

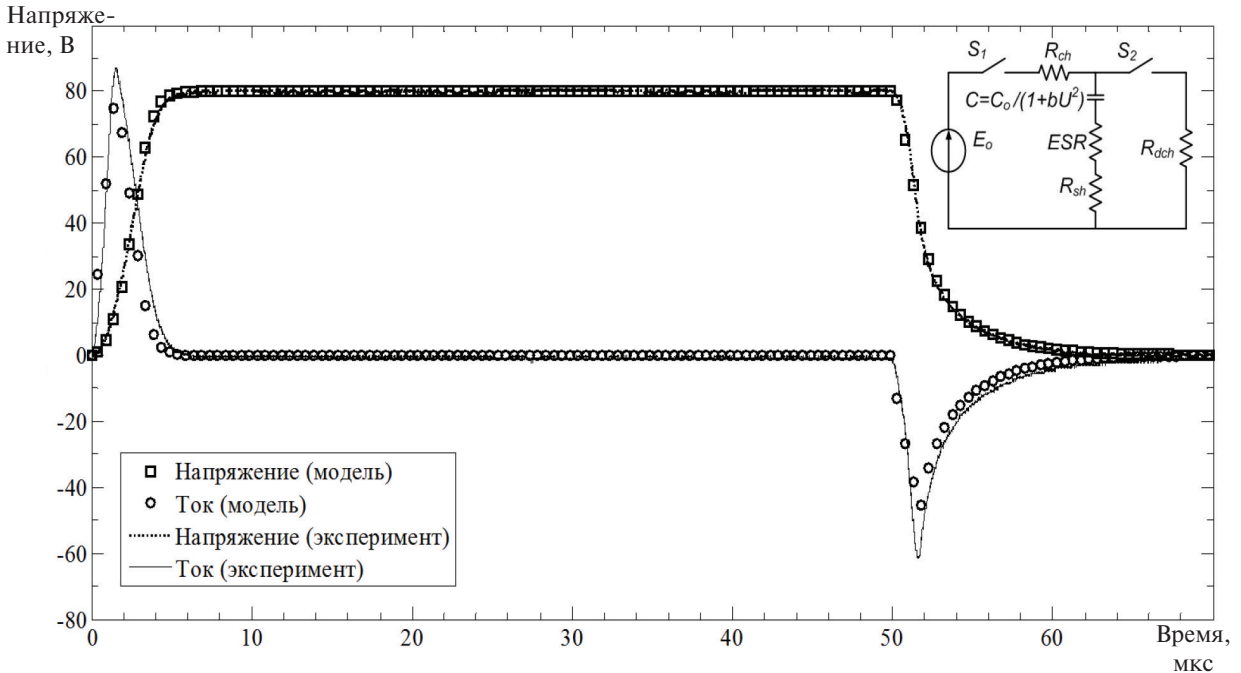


Рис. 3. Напряжения и токи конденсатора X7R при заряде и разряде (на вставке приведена схема модельной цепи)

частот до резонанса успешно аппроксимируется зависимостью вида $ESR(\omega) = A/\omega$, где A – константа, Ом/с. Усредняя частотную характеристику $ESR(\omega)$, получим для некоторой характерной для процесса частоты ω^*

$$ESR(\omega^*) = \frac{1}{\omega^*} \int_0^{\omega^*} ESR(\omega) d\omega. \quad (4)$$

Характерную частоту процесса определим как величину, обратную характерной длительности процесса: $\omega^* = 1/\tau = 1/RC_0$. На практике усреднять целесообразно от некоторой малой, но доступной для измерения частоты, например $\omega = 1$ рад/с. Измерение следует производить при амплитуде измерительного сигнала, не превышающей характерного масштаба проявления нелинейности характеристик X7R.

Точные решения дифференциальных уравнений (3) были получены в неявном виде для заряда и в явном виде для разряда конденсаторов.

I. Для разряда конденсаторов Z5U и X7R:

$$U_{dch}(t) = U_0 + \frac{E_0 - U_0}{\sqrt{e^{\frac{2t}{\tau}} \{1 + b(E_0 - U_0)^2\} - b(E_0 - U_0)^2}}; \quad (5)$$

$$I_{dch}(t) = -\frac{E_0 - U_0}{R} \cdot \frac{1}{\sqrt{e^{\frac{2t}{\tau}} \{1 + b(E_0 - U_0)^2\} - b(E_0 - U_0)^2}}. \quad (6)$$

II. Для заряда конденсаторов Z5U и X7R:

$$t(U_{ch}) = \frac{\Phi}{1 + b(E_0 - U_0)^2} \times \left\{ \ln \left(\frac{(E_0 - U_0) \cdot \sqrt{1 + b(U_{ch} - U_0)^2}}{E_0 - U_{ch} - 2U_0} \right) + \sqrt{b(E_0 - U_0)^2} \arctan \left(\sqrt{b(U_{ch} - U_0)^2} \right) \right\} \quad (7)$$

$$i_{ch}(t) = \frac{C_0}{1 + b(U_{ch} - U_0)^2} \frac{dU_{ch}(t)}{dt} = \frac{C_0}{1 + b(U_{ch} - U_0)^2} \left\{ \frac{dt(U_{ch})}{dU_{ch}} \right\}^{-1}, \quad (8)$$

где $\tau = RC_0$, а обозначения dch и ch соответствуют режимам разряда и заряда.

При $U_0 = 0$ (для конденсаторов Y5V и H90) выражения упрощаются.

III. Для разряда конденсаторов Y5V и H90:

$$U_{dch}(t) = \frac{E_0}{\sqrt{e^{\frac{2t}{\tau}}(1+bE_0^2) - bE_0^2}};$$

$$I_{dch}(t) = -\frac{E_0}{R} \frac{1}{\sqrt{e^{\frac{2t}{\tau}}(1+bE_0^2) - bE_0^2}}. \quad (9)$$

IV. Для заряда конденсаторов Y5V и H90:

$$t(U_{ch}) = \frac{\tau}{1+bE_0^2} \times \left\{ \ln \left(\frac{E_0 \sqrt{1+bU_{ch}^2}}{E_0 - U_{ch}} \right) + \sqrt{bE_0^2} \arctan \left(\sqrt{bU_{ch}^2} \right) \right\}; \quad (10)$$

$$i_{ch}(t) = \frac{C_0}{1+bU_{ch}^2} \left\{ \frac{dt(U_{ch})}{dU_{ch}} \right\}^{-1}. \quad (11)$$

Полученные аналитические решения могут быть применены для непосредственного расчета переходных процессов заряда–разряда нелинейного конденсатора.

Результаты и их обсуждение

Для проверки адекватности полученных решений и предложенной методики расчета *ESR* был осуществлен эксперимент, в ходе которого конденсатор заряжался и разряжался прямоугольным импульсом напряжения через сопротивление $R_{ch} = R_{dch} = 2,6$ Ом; в цепи также присутствовал токовый низкоиндуктивный шунт Caddock $R_{sh} = 0,1$ Ом. Импульсы напряжения генерировались формирователем, собранным по схеме емкостного ключа на основе MOSFET-транзистора IRFPS43N50K, управляемого драйвером IR2125. Параметры выходного импульса

напряжения могут варьироваться в диапазоне 10–500 В при длительности фронтов на уровне 0,2 мкс. Достоверность результатов моделирования была предварительно подтверждена путем сопоставления результатов расчета в MathCad с полученными аналитическими решениями. На рис. 3 приведены осциллограммы, иллюстрирующие экспериментальную и аналитическую временные зависимости разрядного напряжения и тока. Видно, что аналитическое решение хорошо совпадает с результатами эксперимента.

Следует отметить, что для симметричных фронтов воздействующего напряжения длительность заряда и разряда (переключения) отличаются, что обусловлено влиянием нелинейности емкости исследованных конденсаторов. Действительно, рассматривая 90 % уровни заряда и разряда конденсатора

$$\frac{E_0}{U_{dch}} = 10; \quad \frac{E_0}{E_0 - U_{ch}} = 10;$$

$$1+bE_0^2 = 10; \quad \sqrt{bE_0^2} = \sqrt{3bU_{ch}^2} = 3, \quad (12)$$

получаем соотношение времен переключения при разряде и заряде:

$$\frac{t_{dch}}{t_{ch}} \approx (1+bE_0^2) \times \ln \left(\frac{E_0}{U_{dch}} \frac{1}{\sqrt{1+bE_0^2}} \right) \times \frac{1}{\ln \left(\frac{E_0}{E_0 - U_{ch}} \sqrt{1+bE_0^2} \right) + \sqrt{bE_0^2} \arctan \left(\sqrt{bU_{ch}^2} \right)} \approx 1,7, \quad (13)$$

что неплохо согласуется с экспериментальными результатами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wang H., Blaabjerg F. Reliability of Capacitors for DC-Link Applications in Power Electronic Converters — An Overview // IEEE Trans. Ind. Appl. 2014. Vol. 50. № 5. P. 3569–3578.
2. Jow T.R., MacDougall F.W. [et al.] Pulsed power capacitor development and outlook // IEEE Pulsed Power Conference. Austin, TX. 2015. P. 1–7.
3. Belko V. O., Emelyanov O. A. Self-healing in segmented metallized film capacitors: Experimental and theoretical investigations for engineering design // J. Appl. Phys. 2016. Vol. 119. P. 024509.
4. Hao X. A review on the dielectric materials for high energy-storage application // J. Adv. Dielectr. 2013. Vol. 3. № 1. P. 1330001
5. Oghihara H., Randall C. A., Trolrier-McKinstry S. High-Energy Density Capacitors Utilizing 0.7 BaTiO3-0.3 BiScO3 Ceramics // J. Am. Ceram. Soc. 2009. Vol. 92. № 8. P. 1719–1724.

6. **Xie Z., Peng B. [et al.]**. High-Energy-Storage Density Capacitors of Bi(Ni_{1/2}Ti_{1/2})O₃-PbTiO₃Thin Filmswith Good Temperature Stability // *J. Am. Ceram. Soc.* 2013. Vol. 96. № 7. P. 2061–2064.
7. **Tang H., Sodano H.A.** High energy density nanocomposite capacitors using non-ferroelectric nanowires // *Appl. Phys. Lett.* 2013. Vol. 102, № 6. P. 063901
8. **Ротенберг Б.А.** Керамические конденсаторные диэлектрики / СПб.: НИИ Гириконд. 2000. 246 с.
9. **Pan M-J., Randall C. A.** A brief introduction to ceramic capacitors // *IEEE Electr. Insul. Mag.* 2010. Vol. 26. №. 3. P. 44–50.
10. **Dai L., Lin F., Zhu Z., Li J.** Electrical characteristics of high energy density multilayer ceramic capacitor for pulse power application // *IEEE Trans. Magn.* 2005. Vol. 41. № 1. P. 281–284.
11. **Matthews E., Kristiansen M., Neuber A.** Capacitor Evaluation for Compact Pulsed Power // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2010. Vol. 38. № 3. P. 500–508.
12. **Domonkos M. T., Heidger S. [et al.]** Submicrosecond Pulsed Power Capacitors Based on Novel Ceramic Technologies // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2010. Vol. 38. № 10. P. 2686–2693.
13. **Rupprecht G., Bell R. O., Silverman B. D.** Nonlinearity and Microwave Losses in Cubic Strontium-Titanate // *Phys. Rev.* 1961. Vol. 123. № 1. P. 97.
14. **Johnson K. M.** Variation of Dielectric Constant with Voltage in Ferroelectrics and Its Application to Parametric Devices // *J. Appl. Phys.* 1962. Vol. 33. № 9. P. 2826.
15. **Campbell C. K., Van Wyk J. D. [et al.]** Relaxation effects in high-voltage barium titanate nonlinear ceramic disk capacitors // *IEEE Trans. Compon., Hybrids, Manuf. Technol.* 1993. Vol. 16. № 4. P. 418–423.
16. **Vendik O. G., Zubko S. P.** Modeling the dielectric response of incipient ferroelectrics // *J. Appl. Phys.* 1997. Vol. 82. № 9. P. 4475–4483.

REFERENCES

1. **Wang H., Blaabjerg F.** Reliability of Capacitors for DC-Link Applications in Power Electronic Converters — An Overview. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2014. Vol. 50. № 5. P. 3569–3578.
2. **Jow T.R., MacDougall F.W. [et al.]**. Pulsed power capacitor development and outlook. *IEEE Pulsed Power Conference. Austin, TX.* 2015. P. 1–7.
3. **Belko V. O., Emelyanov O. A.** Self-healing in segmented metallized film capacitors: Experimental and theoretical investigations for engineering design. *J. Appl. Phys.* 2016. Vol. 119. P. 024509.
4. **Hao X.** A review on the dielectric materials for high energy-storage application. *J. Adv. Dielectr.* 2013. Vol. 3. № 1. P. 1330001
5. **Ogihara H., Randall C. A., Trolier-McKinstry S.** High-Energy Density Capacitors Utilizing 0.7 BaTiO₃-0.3 BiScO₃ Ceramics. *J. Am. Ceram. Soc.* 2009. Vol. 92. № 8. P. 1719–1724.
6. **Xie Z., Peng B. [et al.]**. High-Energy-Storage Density Capacitors of Bi(Ni_{1/2}Ti_{1/2})O₃-PbTiO₃Thin Filmswith Good Temperature Stability // *J. Am. Ceram. Soc.* 2013. Vol. 96. № 7. P. 2061–2064.
7. **Tang H., Sodano H. A.** High energy density nanocomposite capacitors using non-ferroelectric nanowires. *Appl. Phys. Lett.* 2013. Vol. 102, № 6. P. 063901
8. **Ротенберг Б.А.** Керамический конденсаторный диэлектрик. СПб.: НИИ Гириконд, 2000. 246 с. (rus)
9. **Pan M-J., Randall C.A.** A brief introduction to ceramic capacitors. *IEEE Electr. Insul. Mag.* 2010. Vol. 26. № 3. P. 44–50.
10. **Dai L., Lin F., Zhu Z., Li J.** Electrical characteristics of high energy density multilayer ceramic capacitor for pulse power application. *IEEE Trans. Magn.* 2005. Vol. 41. № 1. P. 281–284.
11. **Matthews E., Kristiansen M., Neuber A.** Capacitor Evaluation for Compact Pulsed Power. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2010. Vol. 38. № 3. P. 500–508.
12. **Domonkos M. T., Heidger S. [et al.]** Submicrosecond Pulsed Power Capacitors Based on Novel Ceramic Technologies. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2010. Vol. 38. № 10. P. 2686–2693.
13. **Rupprecht G., Bell R. O., Silverman B. D.** Nonlinearity and Microwave Losses in Cubic Strontium-Titanate. *Phys. Rev.* 1961. Vol. 123. № 1. P. 97.
14. **Johnson K.M.** Variation of Dielectric Constant with Voltage in Ferroelectrics and Its Application to Parametric Devices. *J. Appl. Phys.* 1962. Vol. 33. № 9. P. 2826.
15. **Campbell C. K., Van Wyk J. D. [et al.]** Relaxation effects in high-voltage barium titanate nonlinear ceramic disk capacitors. *IEEE Trans. Compon., Hybrids, Manuf. Technol.* 1993. Vol. 16. № 4. P. 418–423.
16. **Vendik O. G., Zubko S. P.** Modeling the dielectric response of incipient ferroelectrics // *J. Appl. Phys.* 1997. Vol. 82. № 9. P. 4475–4483.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

ПЛОТНИКОВ Андрей Павлович — аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.
195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.
E-mail: andreyplochnikow@gmail.com

PLOTNIKOV Andrey P. – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.
E-mail: andreyplotnikow@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