

УДК 621.319.4

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

РАСЧЕТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ТАНТАЛОВЫХ КОНДЕНСАТОРОВ ИМПУЛЬСНЫМ ТОКОМ

Составлена математическая модель, описывающая переходные процессы при заряде танталового конденсатора. Выявлено влияние частотных характеристик танталового конденсатора на переходные процессы. Проведен анализ влияния схемы замещения танталового конденсатора на результаты расчета переходных процессов.

Ключевые слова: танталовый конденсатор, схема замещения, SPICE-модель, переходные процессы.

Танталовые конденсаторы широко используются в аппаратуре военного и космического назначения. Поэтому к ним предъявляются жесткие требования по надежности. Одним из возможных отказов танталовых конденсаторов является отказ при протекании импульсных токов [1]. Такие режимы работы возникают в цепях с низким сопротивлением в момент включения прибора. Поэтому производители танталовых конденсаторов используют испытания импульсным током для 100 % продукции специального назначения. Методика этих испытаний описана в [2]. Однако, как показывают результаты исследований, испытания, проводимые по существующим стандартам и разработанным на их основе методикам, плохо воспроизводимы и не всегда позволяют достоверно судить о надежности конденсаторов. Поэтому разработка режимов испытания конденсаторов импульсным током и доработка стандартов, регламентирующих эти испытания, является актуальной задачей [3].

Одним из критериев проверки работоспособности конденсатора, согласно методике испытаний, может служить форма зарядного тока. С ее помощью можно определить неисправные конденсаторы в ходе тестирования без дополнительного измерения их параметров до и после проведения импульсного теста.

На рис. 1 показан график зарядного тока для испытываемого конденсатора.

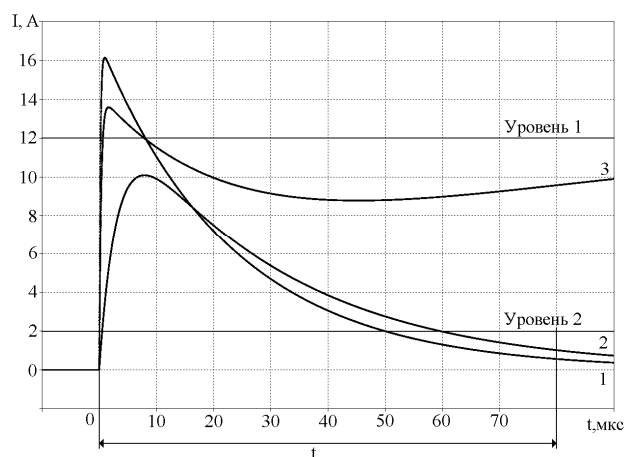


Рис. 1. График зарядного тока при тестировании конденсатора [4, 5]

Для определения годных конденсаторов используются два уровня тока: уровень 1 – максимальное значение тока в момент подключения исследуемого конденсатора к источнику питания и уровень 2 – значение тока через время t , когда конденсатор полностью зарядился. Если значение максимального зарядного тока не превышает величины, установленной для испытываемого типа конденсаторов, или зарядный ток через время t больше установленного, то конденсатор считается неисправным [6].

Для того чтобы адекватно определить уровни токов 1 и 2, необходимо рассчитать переходные процессы при заряде конденсатора. Для этого необходимо составить схему замещения испытания.

Как было показано в [7], емкость и эквивалентное последовательное сопротивление танталовых конденсаторов, в силу особенностей их конструкции, зависят от частоты. Поэтому в ряде случаев простая $R-C-L$ -модель дает неприемлемые результаты [8]. Исследования компании Kemet показали, что наиболее близкие к экспериментальным результаты дает пятизвенная лестничная схема замещения (рис. 2) [9].

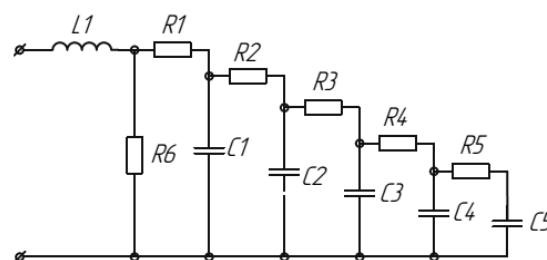


Рис. 2. Лестничная схема замещения танталового конденсатора

Схема состоит из 5 резистивно-емкостных элементов. R_6 – сопротивление утечки; L_1 – индуктивность выводов, определяется из геометрических размеров выводов конденсатора; конденсаторы $C_1...C_5$ образуют ряд со значениями $C_5=C/2$, $C_4=C/4$, $C_3=C/8$, $C_2=C/16$, $C_1=C/32$, где C – номинальная емкость конденсатора.

Параметры лестничной схемы замещения R_1-R_5 зависят от частоты [10]. Корпорация Kemet предоставляет информацию о SPICE-моделях и частотных характеристиках выпускаемых ею конденсаторов на сайте <http://webspice.kemet.com>.

На расчет переходных процессов [11] при заряде танталового конденсатора могут оказать влияние его частотные характеристики и выбранная эквивалентная схема замещения конденсатора. Кроме того, встает вопрос о том, при какой частоте определяются параметры конденсатора. На рис. 3 представлена зависимость импеданса (Z) и эквивалентного последовательного сопротивления (ESR) конденсатора

T419X476M020AH4250 емкостью 47 мкФ на напряжение 4 В.

Для оценки влияния схемы замещения танталового конденсатора на результаты расчета переходных процессов был рассмотрен процесс заряда конденсатора при представлении его на схеме простой R - L - C (рис. 4) и лестничной (рис. 5) схемами замещения.

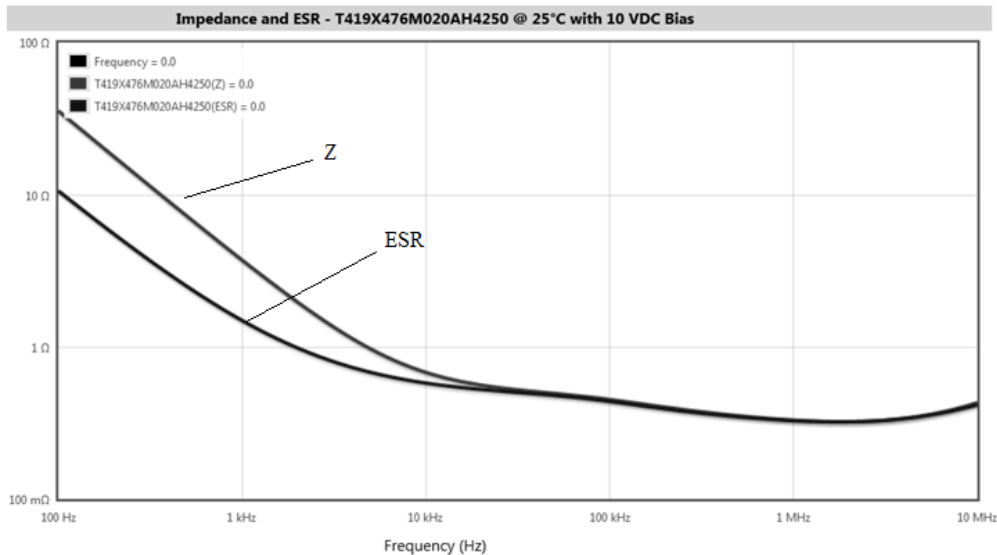


Рис. 3. Зависимость импеданса (Z) и эквивалентного последовательного сопротивления (ESR) от частоты конденсатора T419X476M020AH4250 емкостью 47 мкФ на напряжение 4 В

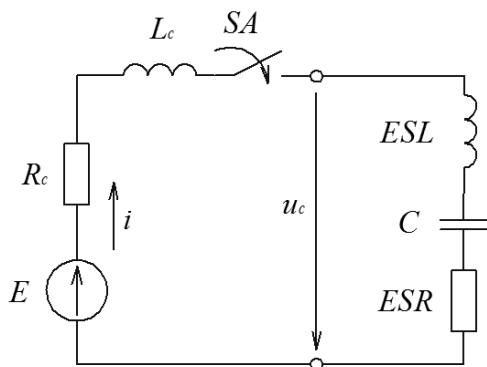


Рис. 4. Простая R - L - C -схема замещения танталового конденсатора

Для примера были рассчитаны переходные процессы при заряде конденсатора T419X476M020AH4250 емкостью 47 мкФ на напряжение 4 В. При расчете были приняты следующие значения параметров схемы замещения: сопротивление цепи стэнда $R_c = 0,6$ Ом, индуктивность стэнда $L_c = 800$ нГн. Параметры конденсатора определены SPICE-моделью конденсатора, предоставляемой фирмой Kemet [12]. При расчете, согласно R - L - C -схеме замещения, требуется значение эквивалентного последовательного сопротивления ESR , емкости C и эквивалентной последовательной индуктивности ESL . Значение емкости конденсатора C принято равной номинальному значению, $ESL = 10$ нГн. Значение ESR зависит от частоты (рис. 3), поэтому неясно, при какой частоте оно должно быть определено. Для расчета принято значение ESR на частоте 1 кГц, $ESR = 1,49$ Ом.

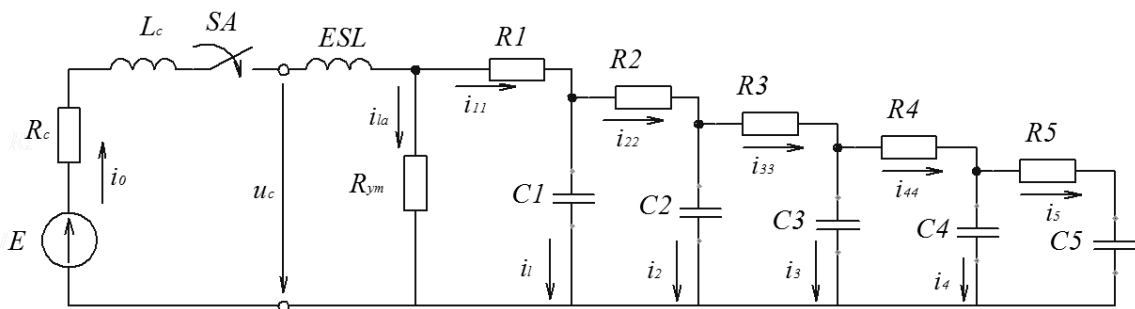


Рис. 5. Лестничная схема замещения танталового конденсатора: R_c – сопротивление цепи заряда; L_c – индуктивность цепи заряда; ESL – эквивалентная последовательная индуктивность танталового конденсатора; ESR – эквивалентное последовательное сопротивление танталового конденсатора

Переходные процессы при заряде конденсатора на рис. 3 описываются системой уравнений:

$$\begin{cases} (L_c + ESL) \frac{d^2 u(t)}{dt^2} + C(R_c + ESR) \frac{du(t)}{dt} + u(t) = E, \\ i(t) = C \frac{du(t)}{dt}. \end{cases} \quad (1)$$

Начальные условия для решения системы уравнений (1) определяются так:

$$\begin{cases} u(0) = 0, \\ \frac{du(0)}{dt} = 0. \end{cases} \quad (2)$$

При расчете процесса заряда по схеме на рис. 4 необходимо обладать информацией о параметрах элементов, составляющих лестничную схему замещения. Значения емкостей $C1-C5$ определяются как доли от номинальной емкости (рис. 2). Значение сопротивления утечки $R6$ определяется по паспортным данным конденсатора [13]. Значения сопротивлений $R1-R5$ зависят от частоты и известны в [14]. Для расчета значения $R1-R5$ определены при частоте 1 кГц.

Переходные процессы при заряде конденсатора на рис. 5 описываются системой уравнений:

$$\begin{cases} i_0(t)R_c + (L_c + ESL) \frac{di_0(t)}{dt} + i_{la}(t)R_6 = E, \\ i_0(t) - i_{la}(t) - i_{11}(t) = 0, \\ i_{11}(t) - i_1(t) - i_{22}(t) = 0, \\ i_{22}(t) - i_2(t) - i_{33}(t) = 0, \\ i_{33}(t) - i_3(t) - i_{44}(t) = 0, \\ i_{44}(t) - i_4(t) - i_5(t) = 0, \\ i_{11}(t)R_1 + U_{C_1}(t) - i_{la}(t)R_6 = 0, \\ i_{22}(t)R_2 + U_{C_2}(t) - U_{C_1}(t) = 0, \\ i_{33}(t)R_3 + U_{C_3}(t) - U_{C_2}(t) = 0, \\ i_{44}(t)R_4 + U_{C_4}(t) - U_{C_3}(t) = 0, \\ i_5(t)R_5 + U_{C_5}(t) - U_{C_4}(t) = 0, \\ i_1(t) = C_1 \frac{dU_{C_1}(t)}{dt}, \\ i_2(t) = C_2 \frac{dU_{C_2}(t)}{dt}, \\ i_3(t) = C_3 \frac{dU_{C_3}(t)}{dt}, \\ i_4(t) = C_4 \frac{dU_{C_4}(t)}{dt}, \\ i_5(t) = C_5 \frac{dU_{C_5}(t)}{dt}. \end{cases} \quad (3)$$

Начальные условия для решения системы уравнений (3) определяются так:

$$\begin{cases} i_0(0) = 0, \\ i_{la}(0) = 0, \\ i_{11}(0) = 0, \\ i_1(0) = 0, \\ i_{22}(0) = 0; \\ i_2(0) = 0, \\ i_{33}(0) = 0, \\ i_3(0) = 0, \\ i_{44}(0) = 0, \\ i_4(0) = 0; \\ i_5(0) = 0, \\ u_{C_1}(0) = 0, \\ u_{C_2}(0) = 0, \\ u_{C_3}(0) = 0, \\ u_{C_4}(0) = 0, \\ u_{C_5}(0) = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Уравнения (3) и (1) решены в Mathcad. Результаты расчета переходных процессов приведены на рис. 6.

Результаты расчетов: $i(t)$ – ток через конденсатор, рассчитанный для схемы на рис. 3; $i_0(t)$ – ток через конденсатор, рассчитанный для схемы на рис. 5; $u(t)$ – напряжение на конденсаторе, рассчитанное для схемы на рис. 4; $u_c(t)$ – напряжение на конденсаторе, рассчитанное для схемы на рис. 5.

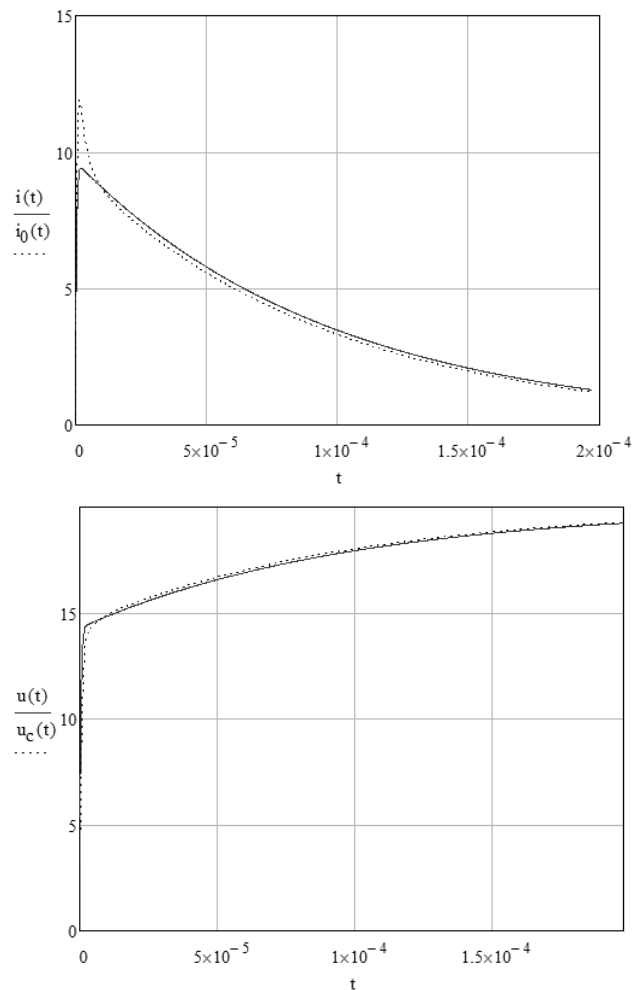


Рис. 6. Результаты расчетов переходных процессов при заряде конденсатора T419X476M020AH4250 емкостью 47 мкФ на напряжение 4 В

Относительная разница амплитуды импульса тока составляет ~ 25 %. Отсюда видно, что на расчет переходных процессов для рассматриваемого конденсатора тип схемы замещения может оказывать значительное влияние при выборе параметров схемы на частоте 1 кГц. Однако при определении параметров схемы за-

мещения, в частности, ESR или сопротивлений $R1-R5$ на другой частоте, например 100 кГц, изменится расчетная амплитуда импульса тока и время переходного процесса. Тем не менее результаты расчетов по обеим схемам замещения будут сходными (рис. 7).

Подобная картина может наблюдаться для других типов конденсаторов. На рис. 8 приведены результа-

ты расчета переходных процессов для конденсатора T491B105M025AT емкостью 1 мкФ на напряжение 25 В.

Относительная разница амплитуды импульса тока составляет $\sim 10\%$. При этом если параметры схем замещения определять при частоте 100 кГц, относительная разница амплитуды импульса тока составит $\sim 0,8\%$ (рис. 9).

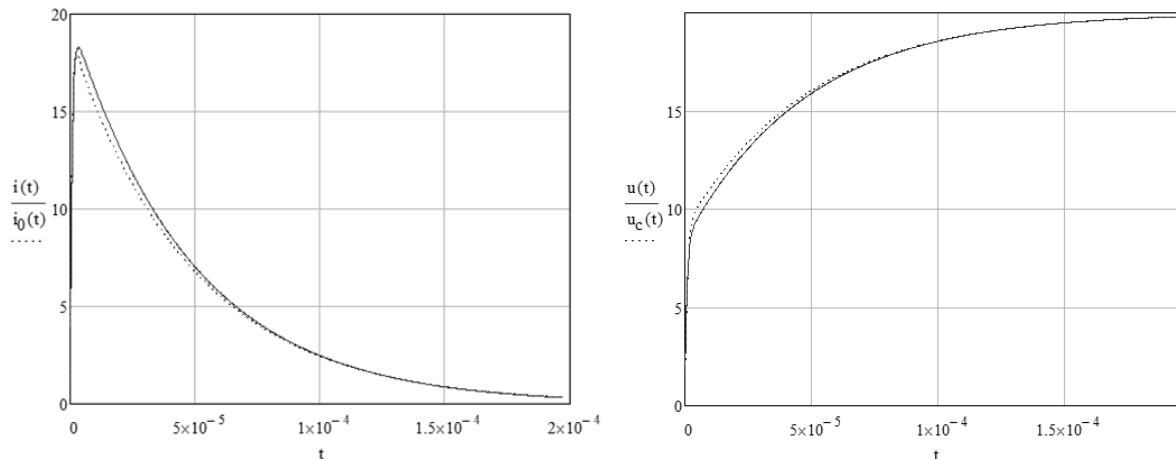


Рис. 7. Результаты расчетов переходных процессов при заряде конденсатора T419X476M020AH4250 емкостью 47 мкФ на напряжение 4 В. Параметры схемы замещения конденсатора определялись на частоте 100 кГц

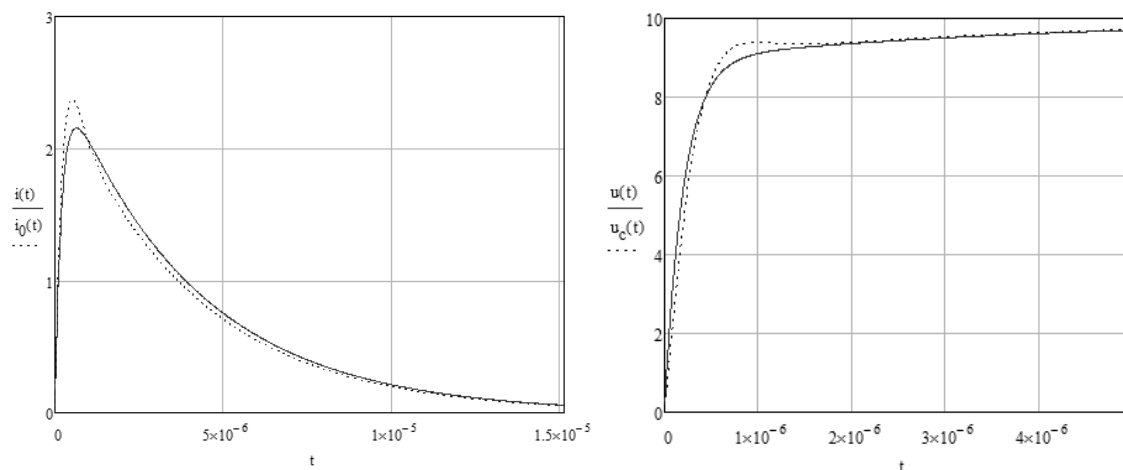


Рис. 8. Результаты расчетов переходных процессов при заряде конденсатора T491B105M025AT емкостью 1 мкФ на напряжение 25 В. Параметры схемы замещения конденсатора определялись на частоте 1 кГц

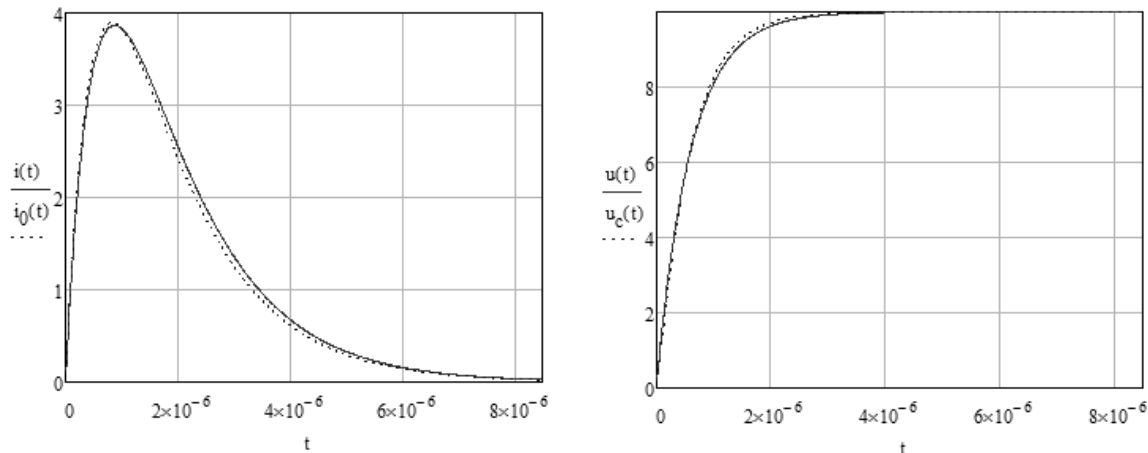


Рис. 9. Результаты расчетов переходных процессов при заряде конденсатора T491B105M025AT емкостью 1 мкФ на напряжение 25 В. Параметры схемы замещения конденсатора определялись на частоте 100 кГц

При этом амплитуда тока, рассчитанного при определенных ESR или сопротивлениях $R1-R5$ на частоте 100 кГц, почти в два раза превышает амплитуду тока, рассчитанного при определенных параметрах схем замещения на частоте 1 кГц.

Для того чтобы оценить, насколько расчетные результаты согласуются с экспериментальными, были измерены зарядный ток и напряжение конденсатора емкостью 1 мкФ на напряжение 25 В коммерческого назначения при испытаниях на установке импульсного тестирования ИТК-10. Измеренные параметры цепи заряда имеют следующие значения: сопротивление цепи заряда $\approx 0,6$ Ом, индуктивность цепи заряда ≈ 2000 нГн. Измерения проводились измерителем иммитанса E7-20. Параметры цепи сохраняют свое значение в широком диапазоне частот (500 Гц – 1 МГц). ESR танталового конденсатора имеет частотную зависимость, представленную на рис. 10.

Как уже отмечалось выше, неясно, какое значение ESR следует брать при расчете переходных процессов. В рассматриваемом случае наиболее близкие к экспериментальным результаты расчетов получаются при значении ESR , измеренном на частоте 25 кГц, $ESR(25 \text{ кГц}) = 813$ мОм. Расчетные и экспериментальные кривые тока и напряжения приведены на рис. 11.

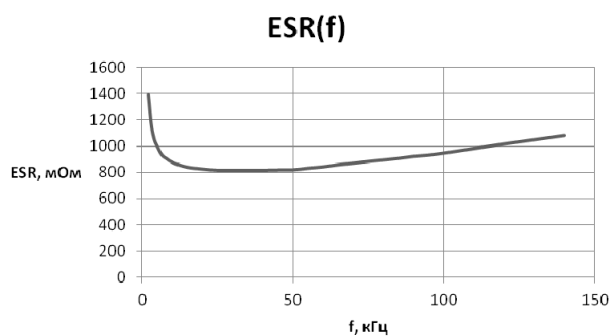


Рис. 10. Зависимость ESR опытного конденсатора

Наблюдается существенное различие между расчетными и экспериментальными кривыми переходных процессов. Поскольку опытный конденсатор был неизвестной фирмы, отсутствует информация о параметрах его лестничной схемы замещения. Поэтому расчет в этом случае проводился для простой $R-L-C$ -схемы замещения конденсатора. Однако значение ESR -конденсатора было найдено методом подбора из значений, измеренных на разных частотах.

Отсюда можно сделать вывод, что частота, при которой определяются параметры схем замещения, оказывает значительное влияние на расчетное значение зарядного тока через конденсатор. Кроме того, в некоторых случаях можно получить значительное различие между результатами расчета при использовании разных схем замещения танталового конденсатора. Лестничная схема замещения танталового конденсатора используется для учета частотной зависимости емкости танталового конденсатора C и эквивалентно последовательного сопротивления ESR .

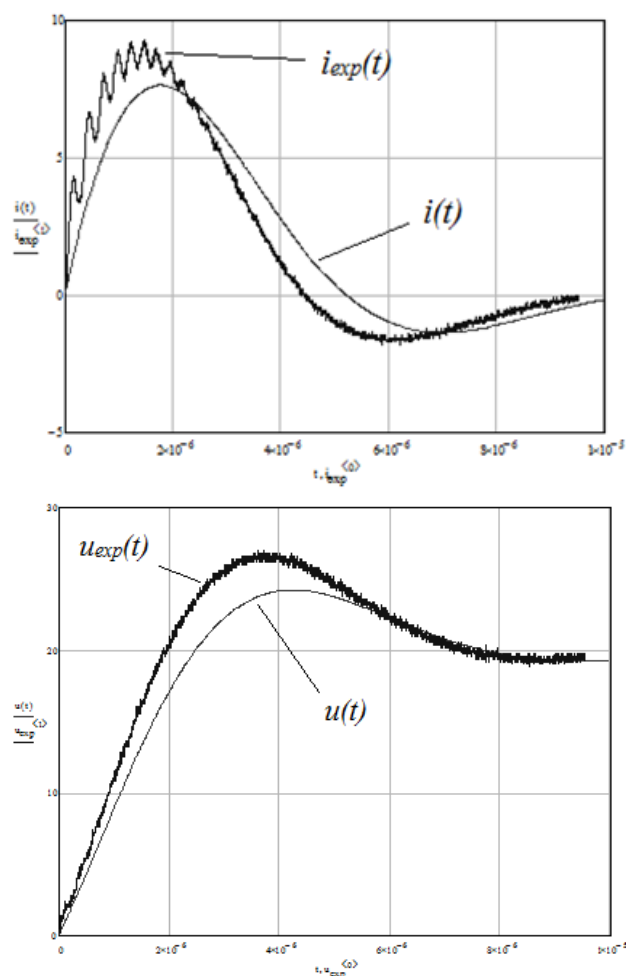


Рис. 11. Расчетные ($i(t)$, $u(t)$) и экспериментальные ($i_{exp}(t)$, $u_{exp}(t)$) кривые токов и напряжений переходных процессов при заряде конденсатора емкостью 1 мкФ

Однако сами параметры лестничной схемы замещения зависят от частоты, и для точного расчета переходных процессов нужно учитывать эти зависимости. Частотные зависимости параметров схем замещения при различной емкости конденсатора по-разному оказывают влияние на результаты расчета переходных процессов. Кроме того, существует разброс параметров конденсаторов одного номинала, который также оказывает влияние на кривые тока и напряжения. Частотные зависимости параметров конденсатора могут по-разному проявляться при испытаниях конденсаторов разной емкости вследствие различных постоянных времени переходного процесса. Для возможности построения адекватной модели цепи заряда и проведения более точных аналитических расчетов требуется эмпирический материал зарядных токов и напряжений при испытаниях конденсаторов всех выпускаемых номиналов емкостей.

Библиографические ссылки

1. *Teverovsky A.* Effect of inductance and requirements for surge current testing of tantalum capacitors // CARTS-CONFERENCE. – COMPONENTS TECHNOLOGY INSTITUTE INC. – 2006. – Т. 26. – Р. 363.

2. *Сибгатуллин Б. И.* Разработка и исследование режимов импульсного тестирования конденсаторов : дис. ... магистра. – Ижевск, ИжГТУ, 2014. – 78 с.
3. *Селетков С. Г.* Проблема, цель, задача в диссертации // Достижения и перспективы психологии и педагогики : сб-к статей Междунар. науч.-практ. конф. – Уфа, 2014. – С. 35–38.
4. *Gill J.* Surge in solid tantalum capacitors //AVX (July, 1994). – 1995.
5. *Holland H. W.* Effects of High Current Transients on Solid Tantalum Capacitors // Electronic Equipment News (March, 1976) pp. – 1976. – P. 20–21.
6. *Franklin R. W.* Surge current testing of resin dipped tantalum capacitors // AVX technical information. – 1985.
7. *Franklin R. W.* Equivalent series resistance of tantalum capacitors // AVX technical information.
8. *Prumak J.* Capacitors EDA models with compensations for frequency, Temperature and DC bias // CARTS-CONFERENCE – Electronic Components Association, 2010.
9. *Prumak J.* SPICE modeling of capacitors // CARTS-CONFERENCE – COMPONENTS TECHNOLOGY INSTITUTE INC. – 1995. – P. 39.
10. Ibid.
11. *Сибгатуллин Б. И., Барсуков В. К.* Влияние параметров стенда импульсного тестирования на результаты испытаний // Интеллектуальные системы в производстве. – 2014. – № 2 (24). – С. 195–202.
12. URL: <http://webspice.kemet.com>.
13. Там же.
14. Там же.

* * *

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

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

Calculation and simulation of transients during surge current test of tantalum capacitors

The mathematical model of transients during charging of tantalum capacitors is created. Transients are calculated using Mathcad. The effect of frequency response on transients is revealed. The effect of equivalent circuit of tantalum capacitors on results of transients calculation is analyzed.

Keywords: tantalum capacitor, equivalent circuit of tantalum capacitor, SPICE modeling, transients, frequency response.

Получено: 10.04.15