

УДК 621.317.35

М.А. Назаров, Э.В. Семенов

Сопоставление квазистатической и неквазистатической видеоимпульсной модели конденсатора при различном уровне тестовых воздействий

Для измерения характеристик конденсатора использованы неквазистатический и квазистатический методы. Установлено, что мощность потерь в конденсаторе с диэлектриком X7R, рассчитанная по неквазистатической модели, превышает мощность, рассчитанную по квазистатической модели. С увеличением амплитуды тестового сигнала отношение мощности потерь по неквазистатической и квазистатической моделям увеличивается.

Ключевые слова: нелинейные измерения, импульсное воздействие, конденсатор, мощность потерь.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-1-50-52

Современные нелинейные измерители для получения нелинейных характеристик элементов производят измерения квазистатическим методом [1]. Такие измерения приводят к методическим погрешностям, если в последующем исследуемый элемент будет работать с импульсными сигналами.

Характеристики диэлектрических материалов, измеренные квазистатическим методом (вольт-амперная характеристика (ВАХ), вольт-фарадная характеристика (ВФХ), тангенс угла диэлектрических потерь), часто не обеспечивают требуемой точности расчетов, если диэлектрические материалы работают в импульсных или цифровых схемах. В связи с тенденцией к сокращению габаритов конденсаторов актуально определение тепловых режимов их работы (рассеиваемой мощности) [2].

В [3] приведен характерограф для измерения нелинейных ВАХ и ВФХ характеристик элементов, цепей и устройств, работающих на коротких видеоимпульсах, а в [4] – метод калибровки нелинейных измерителей характеристик цепей.

В [5] была предложена неквазистатическая модель конденсатора, позволяющая рассчитывать мощность потерь при воздействии на него видеоимпульсным сигналом. Зависимость рассеиваемой на конденсаторе мощности от амплитуды приложенного видеоимпульсного сигнала для этой и для квазистатической модели не исследована.

Цель данной работы – сравнить мощность потерь в конденсаторе при воздействии видеоимпульсным сигналом по неквазистатической и квазистатической модели.

Модель конденсатора при воздействии видеоимпульсным сигналом

В [6] приведена квазистатическая модель конденсатора (рис. 1, а). Данная модель не позволяет адекватно рассчитывать ток через конденсатор и мощность потерь в конденсаторе при видеоимпульсном воздействии, поскольку конденсатор нелинейный, а видеоимпульсный сигнал содержит в своем спектре множество гармоник.

В [5] была предложена неквазистатическая модель конденсатора, а в [7] – исследование этой модели. Данная модель позволяет рассчитывать работу

конденсатора при воздействии на него видеоимпульсным сигналом (рис. 1, б). Емкость в данной модели определяется выражением

$$C(u_k) = \frac{q_k - q_{k-1}}{u_k^f - i_k^f \cdot ESR_k - u_{k-1}^C}, \quad (1)$$

где q_k – заряд на фронте (спаде) импульса в точке k ; u_k^f , i_k^f – напряжение и ток на фронте и спаде импульса в точке k ; ESR (equivalent series resistance) – эквивалентное последовательное сопротивление, характеризующее потери в точке k ; u_{k-1}^C – напряжение на емкости в точке $k-1$. Напряжение u^C в выражении (1) определяется соотношением $u^C = u^f - i^f ESR$.

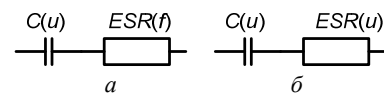


Рис. 1. Эквивалентные схемы замещения конденсатора: а – квазистатическая; б – неквазистатическая

Потери конденсатора определяются параметром ESR и током через него. Параметр ESR определяется выражением (2):

$$ESR(u_k) = \frac{u^r(q_k) - u^f(q_k)}{i^r(q_k) - i^f(q_k)}, \quad (2)$$

где $u^r(q)$, $u^f(q)$ – зависимости напряжения на фронте и спаде импульса от заряда, а $i^r(q)$, $i^f(q)$ – зависимости тока на фронте и спаде от заряда.

Экспериментальные исследования

В качестве объекта были выбраны два керамических конденсатора из одной партии с диэлектриком типа X7R емкостью 1,5 мкФ с номинальным напряжением 25 В типоразмера 0805.

Определим параметры квазистатической модели $C(u)$ и $ESR(f)$, используя измеритель Agilent E4980A. Измерение $C(u)$ осуществим при постоянном смещении, лежащем в интервале напряжений импульсного сигнала от 0 до 3 В (рис. 2, кривая 3). Амплитуда синусоидального измерительного сигнала составляет 200 мВ. Измерение $ESR(f)$ осуществим в области частот, перекрывающей основной лепесток спектра видеоимпульсного сигнала (рис. 3, кривая 1).

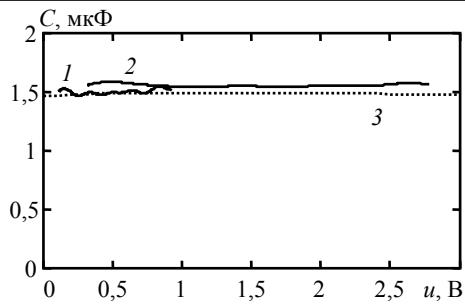


Рис. 2. Вольт-фарадная характеристика, определенная на видеоимпульсном сигнале по (1): при амплитуде импульса 1 В (кривая 1) и 3 В (кривая 2). Кривая 3 – квазистатическое измерение

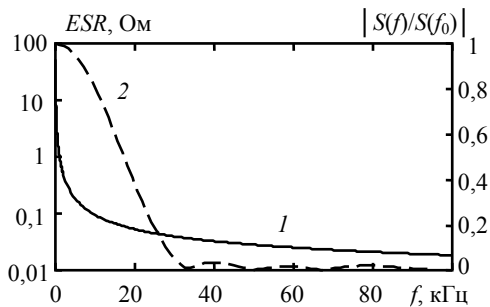


Рис. 3. Зависимость ESR от частоты при квазистатическом измерении (кривая 1) и нормированный модуль спектра тестового сигнала (кривая 2)

Определим параметры неквазистатической видеоимпульсной модели $ESR(u)$ и $C(u)$. Параметр $ESR(u)$ был рассчитан для амплитуды импульсного воздействия 1 В (рис. 4, кривая 1) и 3 В (рис. 4, кривая 2). На рис. 2 показаны результаты определения ВФХ по результатам видеоимпульсного воздействия амплитудой 1 В (кривая 1) и 3 В (кривая 2).

Сопоставим качество моделирования тока через конденсатор квазистатической и неквазистатической моделями при воздействии на него видеоимпульсным сигналом амплитудой 1 и 3 В (рис. 5 и 6 соответственно, кривые 4). На рис. 5 и 6 кривые 1 представляют измеренный ток, кривые 2 – ток, рассчитанный по неквазистатической модели, и кривые 3 – ток, рассчитанный по квазистатической модели. Видно, что при большей амплитуде тестового сигнала ток, рассчитанный по квазистатической модели, начинает в большей степени отклоняться от результатов измерения.

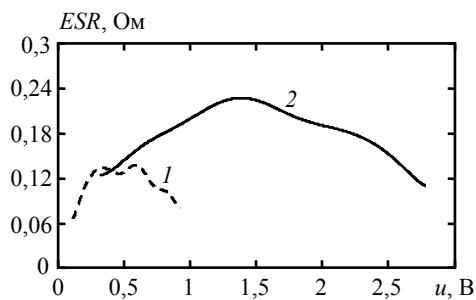


Рис. 4. Зависимость ESR от напряжения для неквазистатической модели при воздействии импульсным сигналом 1 В (кривая 1) и 3 В (кривая 2)

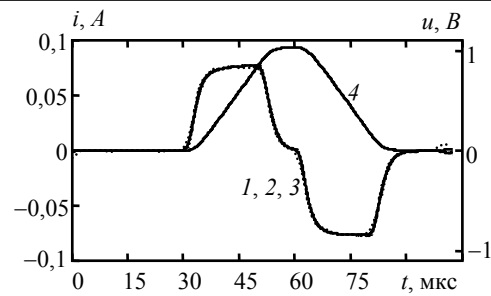


Рис. 5. Ток через конденсатор при амплитуде тестового сигнала 1 В: измеренный (кривая 1), рассчитанный по неквазистатической (кривая 2) и квазистатической моделям (кривая 3). Кривая 4 – зависимость тестового напряжения от времени

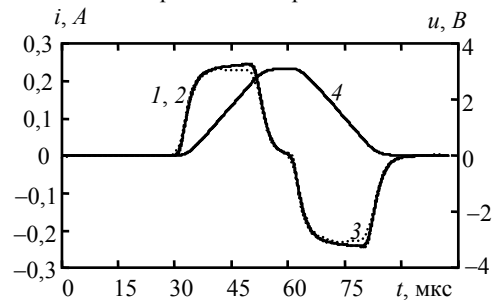


Рис. 6. Ток через конденсатор при амплитуде тестового сигнала 3 В: измеренный (кривая 1), рассчитанный по неквазистатической (кривая 2) и квазистатической моделям (кривая 3). Кривая 4 – зависимость тестового напряжения от времени

Сопоставим качество моделирования мощности потерь в конденсаторе, используя квазистатическую и неквазистатическую модель. Рассчитанная по квазистатической модели рис. 7, а мощность, рассеиваемая на конденсаторе, представлена на рис. 7 и 8 кривой 2 для амплитуды тестового сигнала 1 и 3 В соответственно. Пиковая рассеиваемая мощность составляет 0,46 мВт (для амплитуды 1 В) и 4,2 мВт (для амплитуды 3 В). Мощность потерь, рассчитанная по неквазистатической модели, представлена на рис. 7 и 8 кривыми 1. Пиковая мощность потерь при этом составляет 0,8 мВт (для амплитуды 1 В) и 12,2 мВт (для амплитуды 3 В).

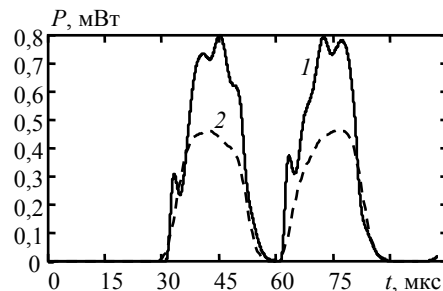


Рис. 7. Зависимость мощности потерь от времени: по неквазистатической (кривая 1) и квазистатической (кривая 2) моделям при воздействии сигналом 1 В

Таким образом, пиковая мощность потерь в конденсаторе, полученная по неквазистатической модели, превышает пиковую мощность потерь, полученную по квазистатической модели. Соотношение пиковых мощностей потерь, рассчитанных по

неквазистатической и квазистатической моделям, при видеоимпульсном воздействии увеличивается с ростом амплитуды импульсного сигнала.

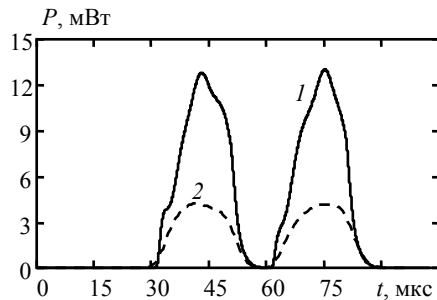


Рис. 8. Зависимость мощности потерь от времени: по неквазистатической (кривая 1) и квазистатической (кривая 2) моделям при воздействии сигналом 3 В

Произведем верификацию определения мощности потерь по неквазистатической и квазистатической моделям при воздействии видеоимпульсным сигналом. Для этого рассчитаем энергию потерь за время действия импульса по результатам прямых измерений напряжения на конденсаторе и тока через него по выражению $E = \int i(t)u(t)dt$. Сравним полученный результат с результатами определения энергии потерь за время действия импульса по неквазистатической и квазистатической моделям, проинтегрировав мощность потерь за время импульса. Результаты определения энергии потерь в зависимости от амплитуды импульса приведены в таблице. Практическое совпадение измеренной энергии потерь и рассчитанной путем интегрирования мощности потерь, определенной по неквазистатической модели, свидетельствует о корректности способа расчета мощности потерь. Кроме того, видно, что квазистатическая модель дает значительно худший результат моделирования.

Зависимость энергии потерь от амплитуды импульсного сигнала

Амплитуда	Энергия, нДж		
	Измерение	Неквазистат. модель	Квазистат. модель
1 В	24	24	16
3 В	362	361	142

Заключение

Рассеиваемая мощность в конденсаторе при воздействии видеоимпульсным сигналом превышает мощность, рассчитанную по квазистатической модели, а полная энергия потерь в конденсаторе, рассчитанная по неквазистатической модели, совпадает с энергией потерь, рассчитанных по результатам прямых измерений тока и напряжения.

Показано, что рассмотренная неквазистатическая модель конденсатора позволяет с меньшей погрешностью моделировать ток через конденсатор и мощность потерь на нем при воздействии видеоимпульсным сигналом.

В приведенном примере по результатам эксперимента пиковая мощность потерь, рассчитанная по неквазистатической модели, до трех раз больше, чем

для квазистатической модели. При этом рассчитанная по неквазистатической модели энергия потерь за время действия импульса хорошо согласуется с результатом измерения.

С увеличением амплитуды тестового видеоимпульсного воздействия отношение пиковой мощности потерь, рассчитанной по неквазистатической модели, к пиковой мощности потерь по квазистатической модели возрастает.

Литература

1. Agilent E4980A Precision LCR Meter. User's Guide. Manufacturing, No. E4980-90010. – PP. 196–199. Available at: <http://www3.imperial.ac.uk/pls/portallive/docs/1/7291007.PDF> (accessed: 14 November 2016).
2. Мезенин О.Л. Справочник по расчету режимов работы электрических конденсаторов. – Киев: Техника, 1987. – 168 с.
3. Семенов Э.В. Сверхкороткоимпульсный характеристикограф [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.edwardsemyonov.narod.ru/nonlinearity/uwb-cap.html>, свободный (дата обращения: 23.08.16).
4. Назаров М.А. Абсолютная калибровка сверхкороткоимпульсного измерителя нелинейных характеристик цепей / М.А. Назаров, Э.В. Семенов // Доклады ТУСУРа. – 2013. – № 3 (29). – С. 38–42.
5. Семенов Э.В. Сверхкороткоимпульсная характеристика диэлектриков с одновременным определением диэлектрической нелинейности, потерь на электропроводность и релаксацию // 24-я Междунар. Крым. конф. «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь: Вебер, 2014. – С. 912–913.
6. Series capacitor model. Available at: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/254095/MURATA/GRM21BR71E225K.html> (accessed: 6 May 2015).
7. Назаров М.А. Исследование сверхкороткоимпульсной модели конденсатора / М. А. Назаров, Э. В. Семенов // 25-я Междунар. Крым. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь: Вебер, 2015. – С. 582–583.

Назаров Максим Андреевич

Аспирант каф. радиоэлектроники и защиты информации (РЗИ) ТУСУРа
Тел.: +7 (382-2) 41-33-65
Эл. почта: mnaz90@mail.ru

Семенов Эдуард Валерьевич

Д-р техн. наук, профессор каф. РЗИ ТУСУРа
Тел.: +7 (382-2) 41-33-65
Эл. почта: edwardsemyonov@narod.ru

Nazarov M.A., Semyonov E.V.

Investigation of ultra-short pulsed capacitor model

We have found that the power dissipation in the 1.5 uF 25 V capacitor with X7R dielectric type at impact the baseband signal is 0.8 mW, and calculated power dissipation according to the classical model of the capacitor is 0.46 mW. The ultra-short pulse method for measuring of characteristics of the capacitor under the influence of the baseband signal was used. We have developed a new ultra-short pulsed capacitor model which allows to adequately simulate the power dissipated in the capacitor when impact of baseband signal is produced.

Keywords: nonlinear measurements, pulse impact, capacitor, power dissipation.