

**Анохин А.С.<sup>2</sup>, Юткина Н.В.<sup>1</sup>, Никитин А.А.<sup>1,2</sup>,  
Семенов А.А.<sup>1</sup>, Еськов А.В.<sup>2</sup>, Пахомов О.В.<sup>2</sup>, Буй М.Т.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ»

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет  
информационных технологий, механики и оптики

## **Ограничитель СВЧ мощности на основе колебательного контура с нелинейной емкостью**

*В современной СВЧ технике малой мощности и в измерительных СВЧ системах актуальной проблемой является проблема регулирования мощности. В данной работе рассматривается один из вариантов реализации ограничителя мощности с рабочими частотами более 0.5 ГГц на основе сегнетоэлектрического емкостного элемента с нелинейной вольт-фарадной характеристикой. В работе изложена методика расчета колебательного контура с нелинейной емкостью, а также показано явление уменьшения мощности на несущей частоте.*

**Ключевые слова:** ограничитель мощности СВЧ, титанат бария-стронция, нелинейный колебательный контур.

Материалы с нелинейными диэлектрическими характеристиками получили широкое применение в электронике, среди нелинейных диэлектрических материалов особый интерес с точки зрения применения в электронике представляют сегнетоэлектрики, обладающие нелинейной зависимостью диэлектрической проницаемости как от частоты, так и от внешнего электрического поля [1]. Для экспериментального определения характеристик емкостных элементов на основе сегнетоэлектрических материалов может использоваться схема резонансного контура, в которой сегнетоэлектрический конденсатор является частотно задающим элементом. Так же интерес представляет исследование нелинейных режимов в колебательных контурах. Кроме того, анализ резонансных контуров с нелинейными емкостными элементами интересен с точки зрения исследования тепловых явлений в сегнетоэлектриках, в том числе и калорических эффектов. Общая методика анализа цепей с нелинейной емкостью изложена в работах И.С. Гоноровского [2]. В данной работе произведено экспериментальное исследование зависимости емкости сегнетоэлектрического конденсатора от внешнего электрического поля, рассмотрена методика определения коэффициентов, описывающих поведение заряда в колебательных контурах с нелинейными емкостными элементами, а так же проанализированы спектры мощности сигнала с такого рода цепях.

Рассмотрим некоторые особенности резонансных явлений в контуре, у которого  $r$  и  $L$  линейные (и постоянные) элементы, а  $C = C(E)$  – нелинейная, зависящая от напряжения емкость. В контур включен источник гармонической ЭДС  $e(t) = E \cos \omega t$ ; амплитуда  $E$  поддерживается неизменной, а частота  $\omega$  медленно изменяется, как это обычно делается при снятии резонансной характеристики контура.

Исходя из дифференциального уравнения (1):

$$L \frac{di}{dt} + ri + U_C = E \cos \omega t \quad (1)$$

и учитывая, что  $i = \frac{dq}{dt}$ , а напряжение на емкости  $U_C = \frac{q}{C(E)}$ , исходное уравнение (1) можно представить, как (2):

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{r}{L} \frac{dq}{dt} + \frac{1}{LC(U)} q = \frac{E}{L} \cos \omega t \quad (2)$$

При этом значение емкости зависит от величины заряда, т.е.  $C = C(U(q))$ . Поэтому слагаемое  $\frac{1}{LC(U)} q$  можно представить в виде нелинейной функции  $f(q) = \frac{1}{LC(U(q))} q$ . Тогда первоначальное дифференциальное уравнение принимает вид (3):

$$\frac{d^2q}{dt^2} + 2\alpha \frac{dq}{dt} + f(q) = \frac{E}{L} \cos \omega t \quad (3)$$

где  $\alpha = \frac{r}{2L}$ . Функцию  $f(q)$  удобно аппроксимировать выражением:  $f(q) = b_1q + b_3q^3 + \dots$ , где  $b_3, \dots, b_n$  - параметры, учитывающие нелинейность вольт – кулонной характеристики конденсатора при больших амплитудах, а параметр  $b_1$  соответствует резонансной частоте контура  $\omega_0^2 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ .

Для расчета  $f(q)$  необходимо экспериментально получить зависимость  $C(U)$ , соответственно полученная вольт-фарадная характеристика, снятая с помощью четырехзондового метода, показана на рисунке 1.

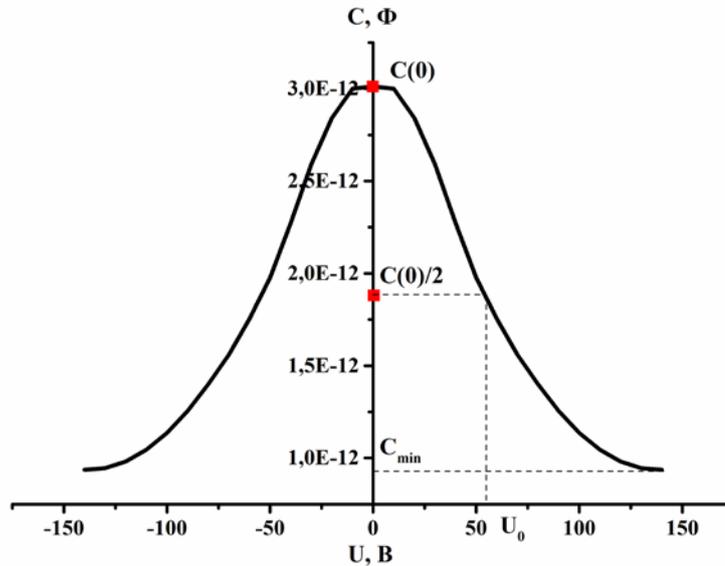


Рисунок 1. Вольт-фарадная характеристика использованного в контуре конденсатора на основе материала X7R.

Для упрощения расчетов рационально воспользоваться стандартной аппроксимацией для вольт-фарадных характеристик сегнетоэлектриков:

$$C(E) = \frac{C(0) - C_{min}}{1 + E^2/E_0^2} + C_{min}; \quad (4)$$

$$\varepsilon(E) = \frac{\varepsilon(0) - \varepsilon_{min}}{1 + E^2/E_0^2} + \varepsilon_{min}, \quad (5)$$

где значения  $C(0)$ ,  $C_{min}$ ,  $U_0$  (соответствующее  $E_0$ ) берутся так, как показано на рисунке 1.

В данной работе рассматривался многослойный конденсатор на основе материала титаната бария-стронция, для упрощения его можно рассматривать, как плоскопараллельный конденсатор, таким образом, вместо вышеупомянутых зависимостей можно рассматривать зависимости  $C(U)$ ,  $\varepsilon(U)$ ,  $D(U)$ . На основании зависимости  $\varepsilon(U)$  может быть рассчитана зависимость  $D(U)$ , позволяющая связать емкость и заряд. Связь между электрической индукцией и напряжением показана в выражении (6):

$$D(U) = \int \varepsilon_0 \varepsilon(U) dU = \frac{q}{S} \quad (6)$$

С учетом использованной аппроксимации  $\varepsilon(U)$  индукцию можно переписать в виде (7):

$$D(U) = \varepsilon_0 \varepsilon_{min} U + \varepsilon_0 (\varepsilon(0) - \varepsilon_{min}) U_0 \arctan \left( \frac{U}{U_0} \right) = \frac{q}{S} \quad (7)$$

Таким способом можно рассчитать зависимость  $D(q)$ . Полученные для рассмотренного конденсатора зависимости  $\varepsilon(U)$ ,  $D(U)$  показаны на рисунках 2(а) и 2(б) соответственно.

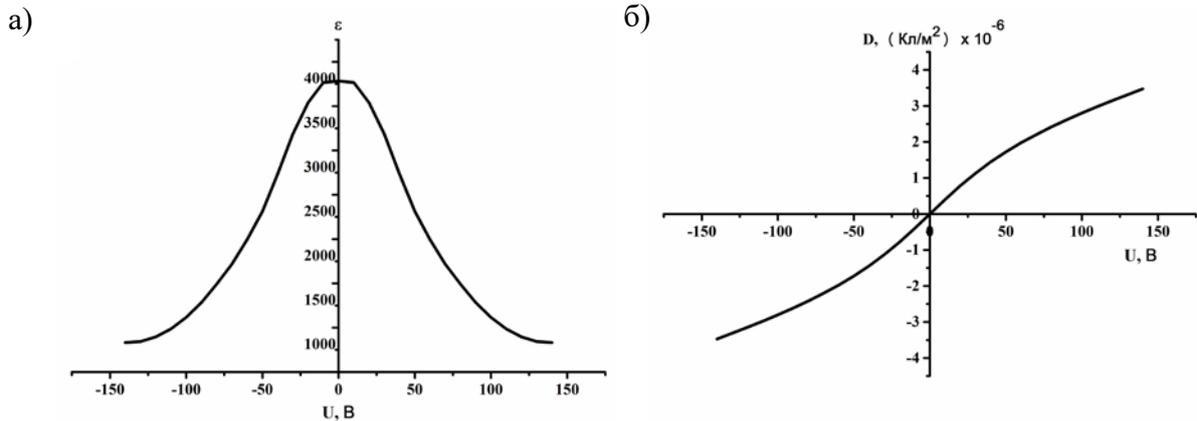


Рисунок 2. Зависимости диэлектрической проницаемости (а) и электрической индукции (б) от напряжения для рассматриваемого конденсатора.

Зная вид зависимостей  $D(q)$  и  $D(U)$ , можно получить зависимость  $q(U)$ , а соответственно и  $U(q)$  и  $C(q)$ . Следует заметить, что получение зависимости  $q(U)$  в аналитическом виде затруднительно, так как связь между зарядом и напряжением выражается трансцендентным уравнением, поэтому оптимально производить этот расчет численно. В конечном итоге это позволяет получить зависимость  $f(q)$ , данная зависимость показана на рисунке 3.

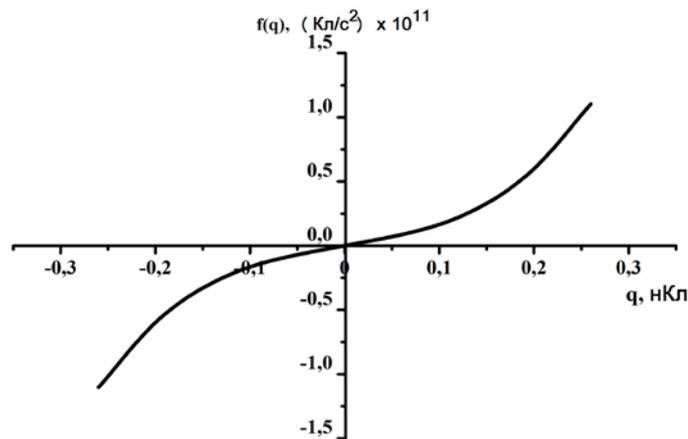


Рисунок 3. Зависимость вводимой в уравнении функции  $f(q)$  от величины заряда.

Для разложения функции  $f(q)$  полученную зависимость необходимо интерполировать, в данном случае наиболее удобной оказалась аппроксимация методом

наименьших квадратов. Для рассматриваемого конденсатора полученная зависимость  $f(q)$ , разложенная по 1-й и 3-й степеням, имеет следующий вид (8):

$$f(q) = 1.372005599 \cdot 10^{20} q + 4.21213503740453 \cdot 10^{39} q^3 \quad (8)$$

Проверить справедливость данного расчета можно, сопоставив полученное значение коэффициента  $bl$  с резонансной частотой  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$ . В идеальном случае функцию необходимо раскладывать по бесконечному числу нечетных степеней.

Теперь можно вернуться к решению дифференциального уравнения (3) для получения временной зависимости заряда  $q(t)$ . Данное дифференциальное уравнение является нелинейным неоднородным, в работе [2] оно было линеаризовано, однако интерес представляет поведение токов в сегнетоэлектриках с ярко выраженной нелинейностью емкости при высоких амплитудах входного сигнала, поэтому оптимально решать уравнение численно, не прибегая к его упрощениям. Получив зависимость  $q(t)$  и продифференцировав ее по времени, получаем зависимость  $i(t)$ . С помощью преобразования Фурье может быть получен спектр сигнала в контуре. Рассмотрим вид выходного сигнала при увеличении амплитуды входного сигнала, при этом пусть частота входного сигнала соответствует резонансной частоте контура. На рисунках 4 (а), 4 (б), 4(в) и 4 (г) приведены спектры выходных сигналов при амплитудах входного сигнала 0.1 В, 1 В, 10 В и 50 В соответственно.

Из вида спектров можно сделать вывод, что при повышении амплитуды контур входит в нелинейный режим, связанный с все более существенной перестройкой емкости под действием входного сигнала. При этом спектр выходного сигнала обогащается, и основная часть мощности выходного сигнала переносится на более высоких частотах по сравнению с входным сигналом. Таким образом, колебательный контур с нелинейной емкостью позволяет осуществлять ограничение мощности СВЧ сигнала.

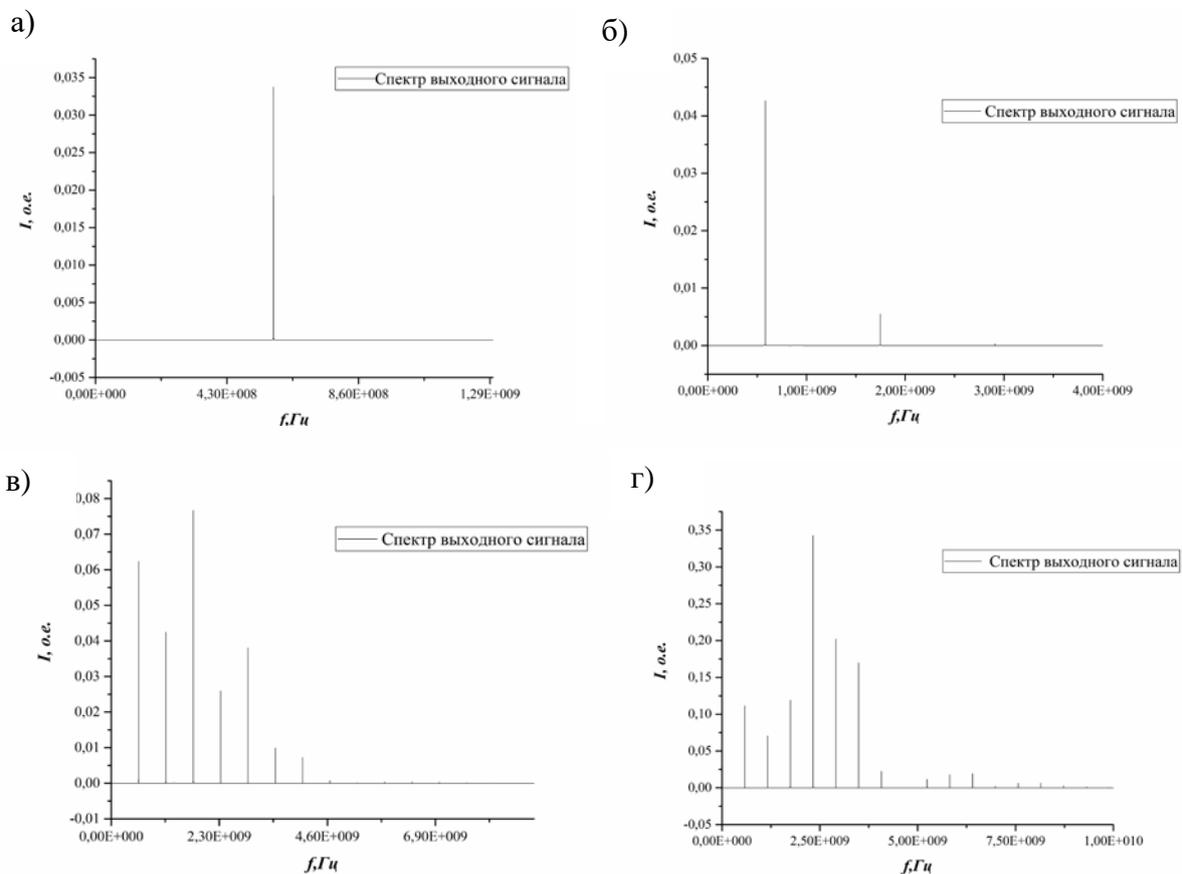


Рисунок 4. Зависимости диэлектрической проницаемости (а) и электрической индукции (б) от напряжения для рассматриваемого конденсатора.

Схема такого ограничителя мощности показана на рисунке 5. На рисунке 6 приведена качественная зависимость выходной мощности от входной мощности с учетом активных потерь в контуре.

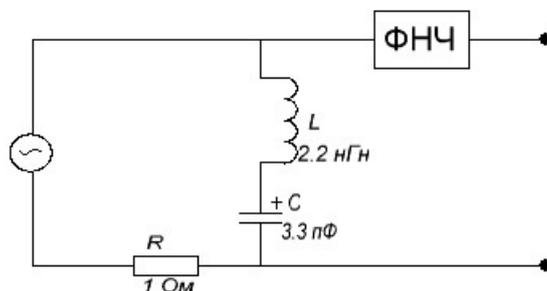


Рисунок 5. Схема ограничителя мощности.

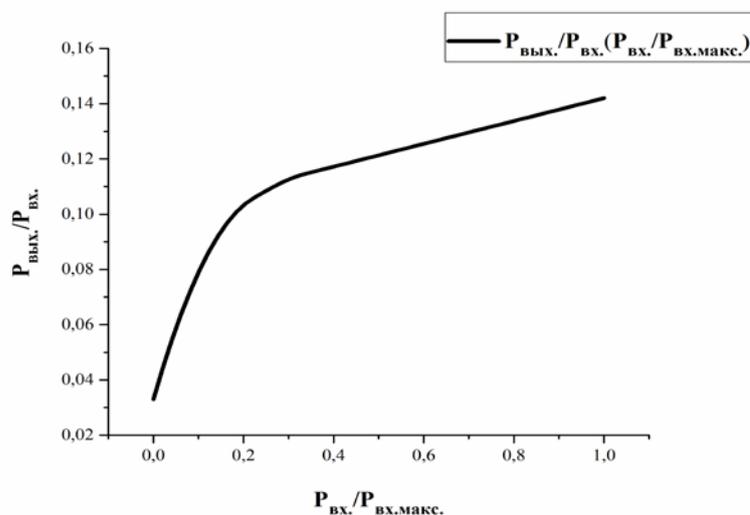


Рисунок 6. Нормированная зависимость выходной мощности контура от входной мощности на частоте входного сигнала.

Данный контур был рассчитан на частоте входного сигнала 582 МГц, т.е. на резонансной частоте рассматриваемого контура. Аналогичный характер изменения спектров ожидается и на более высоких частотах, однако для их расчета необходим учет СВЧ потерь в нелинейной емкости. Из зависимости, показанной на рисунке 6 видно, что с ростом мощности входного сигнала выходная мощность увеличивается все более незначительно вплоть до насыщения.

#### Библиографический список.

1. Вендик, О. Г. Сегнетоэлектрики находят свою «нишу» среди управляющих устройств СВЧ [Текст] / О. Г. Вендик // Физика твердого тела. – 2009. – т. 51. – вып. 7. – С. 1441-1445.
2. Гоноровский, И. С. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. [Текст] / И. С. Гоноровский. – М.: Радио и связь, 1986. – 512 с.