

**И.В. Котельников, В.Н. Осадчий, Д.М. Косьмин,  
А.К. Михайлов, А.Б. Козырев**  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ»

## Методика разделения металлических и диэлектрических СВЧ потерь варикондов

*Разработана методика, позволяющая разделить суммарные СВЧ потери сегнетоэлектрического вариконда на диэлектрическую и металлическую составляющие при приложении различных напряжений управления. По указанной методике проведены результаты измерений сегнетоэлектрических (СЭ) варикондов на частоте 2 ГГц.*

**Ключевые слова:** СВЧ измерения, добротность варакторов, нелинейный конденсатор, сегнетоэлектрический конденсатор, СВЧ варактор.

При конструировании и разработке СВЧ варикондов, часто встаёт вопрос об оптимизации конструкции и выборе материала диэлектрика и электродов, обеспечивающих максимальную добротность элемента. Необходимо уметь разделять источники СВЧ потерь (потери в металле и в диэлектрике) и определять их зависимость от напряжения управления и частоты.

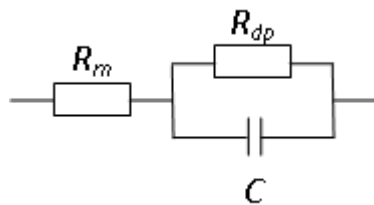


Рисунок 1. Эквивалентная схема вариконда с учетом потерь в диэлектрике ( $R_{dp}$ ) и металлических электродах ( $R_m$ ).

Методика разделения потерь для обычных линейных конденсаторов различных номиналов широко известна. Она базируется на эквивалентном представлении конденсатора (рис. 1) и соотношении для определения суммарных потерь в предположении постоянства величины тангенса угла диэлектрических потерь и линейном росте вклада металлических потерь в металле с ростом

величины ёмкости. Значения добротности конденсатора ( $Q$ ), суммарные потери в конденсаторе ( $\text{tg}\delta_\Sigma$ ), потери в диэлектрике и металле связаны соотношением:

$$\text{tg}\delta_\Sigma = Q^{-1} \cong \text{tg}\delta_d + R_m\omega C$$

Измерение СВЧ потерь для ряда подобных по конструкции конденсаторов различной ёмкости  $C$  позволяет построить зависимость  $\text{tg}\delta_\Sigma(C)$ , экстраполяция которой при  $C \rightarrow 0$  дает возможность определения значений потерь в диэлектрике ( $\text{tg}\delta_d$ ). Использование такого подхода при разделении диэлектрических и металлических потерь при различных напряжениях управления варикондов и полупроводниковых варакторов

неприемлемо, т.к. в этом случае происходит изменение как диэлектрических потерь, так и емкости.

В данной работе предложена методика, позволяющая разделить металлическую и диэлектрическую составляющую потерь для нелинейных конденсаторов с учётом изменения управляющего напряжения. Принцип измерений проиллюстрирован на рис 2 для трех варикондов различного номинала  $C_1$ ,  $C_2$  и  $C_3$ . Результаты измерений варикондов строят в координатной плоскости  $\text{tg} \delta_{\Sigma}(C)$  для различных напряжений управления. Экстраполяция зависимости  $\text{tg} \delta_{\Sigma}(C)$  до предельных значений  $C=0$  для различных значений  $U$  позволяет получить значения диэлектрических потерь в материале для соответствующих напряжений управления.

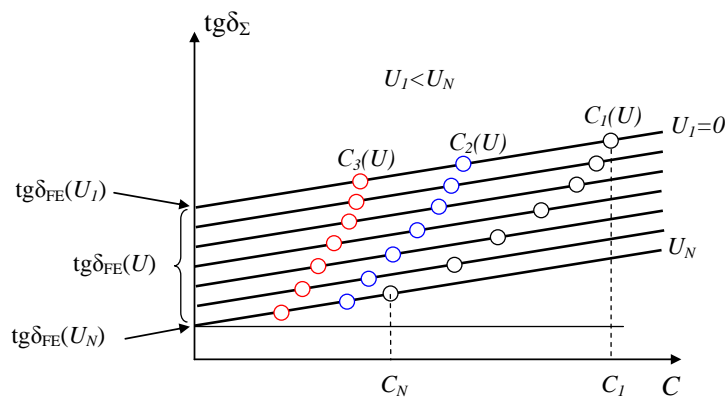


Рисунок 2. Схема разделения потерь в варикондах при подаче управляющего напряжения.

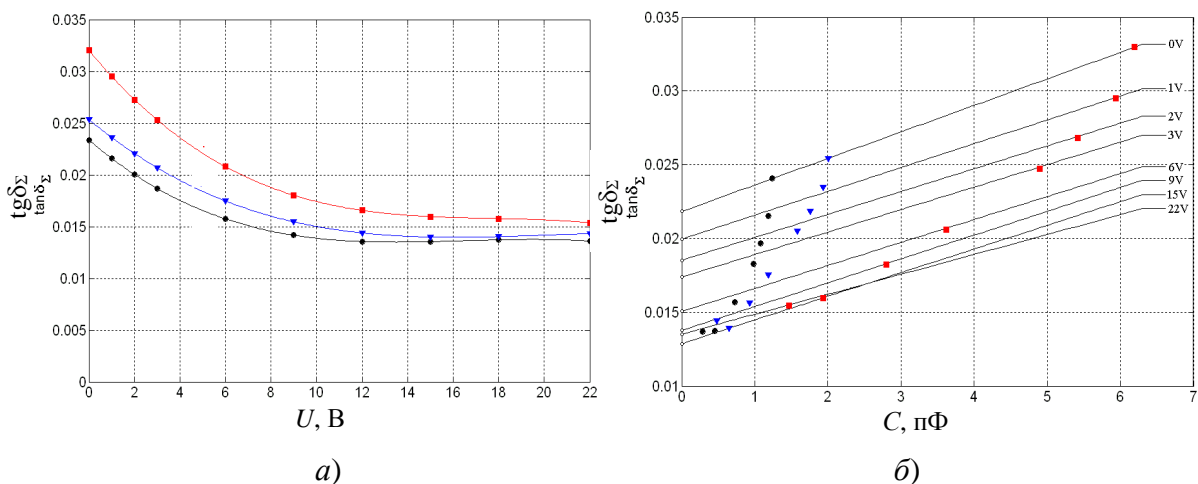


Рисунок 3. Зависимость обратной добротности варикондов различных номиналов ёмкостей как функции напряжения (а) и функции емкости (б) на частоте 2 ГГц (● – 1.2 пФ; ▼ – 2.0 пФ ■ – 5.8 пФ).

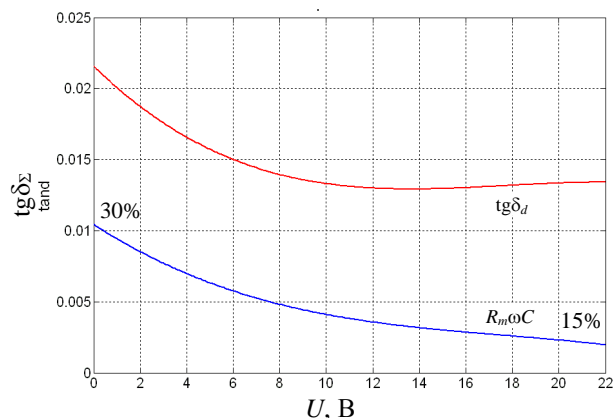


Рисунок 4. Разделение металлических и диэлектрических потерь как функция напряжения для вариконда номиналом 5.8 пФ.

На рис. 3а приведены результаты измерений потерь сегнетоэлектрических варикондов с номиналами 1.2, 2.0, 5.8 пФ на частоте 2 ГГц как функций напряжения управления. Для измерений использовался коаксиальный резонатор, специально предназначенный для СВЧ измерений варакторов и варикондов [1]. На рис. 3б эти результаты представлены в виде  $\text{tg}\delta_{\Sigma}(C)$  и проведена экстраполяция, необходимая для разделения потерь. Корректность методики подтверждается расположением точек, соответствующих потерям на одной прямой для каждого номинала напряжений. Результаты, иллюстрирующие вклад металлической и диэлектрической составляющей общих потерь вариконда при различных напряжениях управления, представлены на рис 4. Видно, что для измеренных значений варикондов максимального номинала ёмкости, вклад металлических потерь электродов при приложении управляющего напряжения меняется от 30 до 15% за счёт уменьшения емкости.

Таким образом, предложенная методика позволяет разделить металлическую и диэлектрическую составляющие источника потерь и оценить их вклад в добротность вариконда для элементов, у которых тангенс угла диэлектрических потерь и величина ёмкости являются функцией напряжения.

#### Библиографический список

1. A.B. Kozyrev, D.M. Kosmin, I.V. Kotelnikov, A.K. Mikhailov and V.N. Osadchy. A method and device for measuring the capacitance and Q-factor of microwave varactors and variconds. // Measurement Techniques, Springer Science+Business Media New York, Vol. 55, No. 7, October, 2012, pp. 834- 838