

А. С. БЕРНШТЕЙН, Н. Н. КАРИМОВ, Х. К. ШАКОВ
 (Москва)

О ВОЗМОЖНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ОБЪЕМНОГО СООТНОШЕНИЯ ДВУХСЛОЙНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

При производстве материалов, состоящих из диэлектрической основы, пропитываемой другим диэлектрическим материалом, необходимо контролировать соотношение материалов основы и пропитки. Для измерения такого рода можно предложить двухпараметровые измерения с помощью длинных линий или волноводов, работающих в диапазоне сантиметровых волн. Теоретическим обоснованием такого метода измерения служат следующие соображения, приводимые для длинной линии, поскольку анализ ее проще и качественно дает те же результаты, что и анализ волновода.

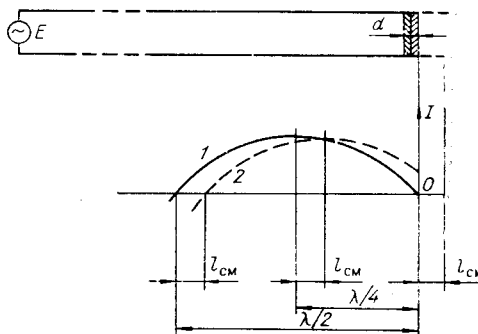
В разомкнутой на конце длинной линии без потерь при подключении источника E (см. рисунок) устанавливается режим стоячей волны (1 — распределение тока вдоль линии до внесения диэлектрика; 2 — распределение тока вдоль линии после внесения диэлектрика). Поскольку на конце линии узел тока, то помещение между проводниками линии диэлектрической пластинки толщиной d в конце линии вызывает такое же изменение в картине распределения поля, как и подключение к концу линии конденсатора, емкость которого может быть вычислена как

$$C_{\text{экр}} = C_0 d (\sqrt{\epsilon} - 1), \quad (1)$$

где C_0 — погонная емкость линии; ϵ — диэлектрическая проницаемость материала пластины. Известно [1], что подключение к разомкнутому концу линии конденсатора эквивалентно удлинению этой линии на величину

$$l = \frac{\lambda}{2\pi} \arctg(\omega CZ_0), \quad (2)$$

где λ — длина волны в линии, ω — частота питающего генератора; C — емкость подключаемого конденсатора; Z_0 — волновое сопротивление линии.



Следовательно, в реальной линии при внесении диэлектрика узлы напряжений и токов сместятся к концу линии на величину

$$l_{\text{см}} = l = \frac{\lambda}{2\pi} \operatorname{arctg} (\omega C_{\text{экв}} Z_0) = \frac{\lambda}{2\pi} \operatorname{arctg} [\omega C_0 d (\sqrt{\epsilon} - 1) \sqrt{L_0/C_0}];$$

$$l_{\text{см}} = \frac{\lambda}{2\pi} \operatorname{arctg} [\omega d (\sqrt{\epsilon} - 1) \sqrt{L_0 C_0}], \quad (3)$$

где L_0 — погонная индуктивность линии.

При малых значениях $\omega d (\sqrt{\epsilon} - 1) \sqrt{L_0 C_0}$ величина арктангенса может быть аппроксимирована степенным рядом, что позволяет с достаточной для практических расчетов точностью преобразовать формулу (3):

$$l_{\text{см}} = d (\sqrt{\epsilon} - 1). \quad (4)$$

В [2] было показано, что величина емкости конденсатора, заполненного двухслойным диэлектриком, зависит от ориентации плоскости раздела слоев относительно вектора электрического поля.

Применительно к исследуемому материалу можно сказать, что если этот материал поместить в линию так, чтобы вектор электрического поля линии располагался параллельно волокнам основы, то общая емкость будет равна сумме емкостей, обусловленных каждой из компонент, и, следовательно, влияние исследуемого материала на смещение узлов равно суммарному влиянию на смещение узлов каждой компоненты. При перпендикулярной ориентации волокон основы относительно вектора электрического поля, если материал пропитки расположен в основном между волокнами основы, такой гетерогенный диэлектрик можно рассматривать как эквивалент заполнения в двухслойном конденсаторе, в котором эквивалентные толщины слоев пропорциональны объемному соотношению компонент. Следовательно, влияние исследуемого материала на смещение узлов аналогично влиянию на смещение узлов двухслойного диэлектрика при перпендикулярной ориентации плоскости раздела слоев эквивалентного двухслойного диэлектрика относительно вектора электрического поля.

Для определения величин эквивалентных диэлектрических проницаемостей стеклоленты при различной ориентации волокон основы относительно вектора электрического поля можно воспользоваться известными формулами [2]:

$$\epsilon_{\perp} = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\gamma_1 \epsilon_2 + \gamma_2 \epsilon_1}; \quad (5)$$

$$\epsilon_{\parallel} = \epsilon_1 \gamma_1 + \epsilon_2 \gamma_2, \quad (6)$$

где ϵ_1 и ϵ_2 — диэлектрические проницаемости компонент; γ_1 и γ_2 — объемные доли компонент, причем $\gamma_1 + \gamma_2 = 1$. Формулу (5) удобно привести к виду

$$\epsilon_{\perp} = \frac{1}{\gamma_1/\epsilon_1 + \gamma_2/\epsilon_2}. \quad (7)$$

Обозначая через l_{\parallel} и l_{\perp} смещения узлов напряжения (или тока) в линии при соответственно параллельной и перпендикулярной ориентациях волокон основы относительно вектора электрического поля, можно записать:

$$l_{\parallel} = d (\sqrt{\epsilon_1 \gamma_1 + \epsilon_2 \gamma_2} - 1); \quad (8)$$

$$l_{\perp} = d \left(\frac{1}{\sqrt{\gamma_1/\epsilon_1 + \gamma_2/\epsilon_2}} - 1 \right). \quad (9)$$

Значения l_{\parallel} и l_{\perp} могут быть измерены на линии. Взяв отношение этих значений, получим

$$k = \frac{l_{\parallel}}{l_{\perp}} = \frac{\sqrt{\varepsilon_1 \gamma_1 + \varepsilon_2 \gamma_2} - 1}{1}. \quad (10)$$

определять объемное соотношение компонент двухслойного диэлектрического материала, причем абсолютное количество компонент не влияет [в пределах допустимой замены формулы (3) формулой (4)] на величину определяемого отношения.

Для проверки возможности практического применения изложенного выше метода в образцах ортотропного стеклопластика АГ-4С определялось соотношение стеклонаполнителя и связующего с помощью измерительной волноводной линии сантиметрового диапазона. Воспроизводимость результатов измерений на линии не хуже 0,57%. Расхождение между результатами, полученными для образцов с различным соотношением компонент, определявшимися по описанной выше методике и наиболее точным из известных методов (методом выжигания), не превышает 5%.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. М. Кугушев и Н. С. Голубева. Основы радиоэлектроники. М., «Энергия», 1969.
2. Г. И. Скана ви. Физика диэлектриков. М., Гостехиздат, 1949.

*Поступила в редакцию
8 сентября 1970 г.,
окончательный вариант —
25 февраля 1971 г.*