

Р. И. Белоус, М. В. Вовнюк, И. Г. Скуратовский, О. И. Хазов, А. С. Шахова

Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины

12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина

E-mail: briz@ire.kharkov.ua

ИЗМЕРЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПЕНОПЛАСТОВ РЕЗОНАНСНЫМ МЕТОДОМ С ПОМОЩЬЮ ВОЛНОВОДНО-ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА

Быстрое развитие электронной техники характеризуется непрерывным расширением функциональных возможностей создаваемых новых типов элементов, приборов и систем, в которых используются пористые пластмассы. Поэтому возникает необходимость исследования основных электрофизических характеристик таких материалов. Успешное решение этой задачи невозможно без точного определения диэлектрической проницаемости (ε). В работе приведены два метода измерения низкой относительной ε (1,02...1,1) пенопластов с помощью цилиндрического волноводно-диэлектрического резонатора на запредельном волноводе, результаты измерений ε четырех типов пенопластов в диапазоне частот 10...12 ГГц и дана оценка погрешностей измерений. В «непосредственном» методе исследуемый материал используется как диэлектрический элемент резонатора. В «косвенном» методе диэлектрический элемент изготовлен из фторопласта, а пенопласт заполняет запредельные участки волновода. Проведенные исследования показали, что «косвенный» метод дает уменьшение погрешности измерения ε в 2,5–5 раз по сравнению с «непосредственным». Но «непосредственный» метод проще в применении и позволяет измерять любые диэлектрические проницаемости. Ил. 1. Табл. 3. Библиогр.: 10 назв.

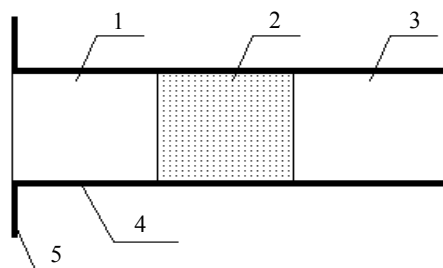
Ключевые слова: волноводно-диэлектрический резонатор, диэлектрический элемент, запредельный волновод, относительная диэлектрическая проницаемость, резонансная частота.

Диэлектрики (в том числе пенопласты) занимают важное место в современной электротехнике и энергетике, в радиотехнике и технике связи, в автоматике и приборостроении, в вычислительной и электронной технике [1–2]. Они широко используются для изготовления таких элементов СВЧ, как подложки микрополосковых линий, электрические конденсаторы, диэлектрические резонаторы, фильтрующие структуры и пр. [3–5]. Во многих случаях необходимы «радиопрозрачные» материалы с очень низкими потерями и, как правило, с низкой диэлектрической проницаемостью от 1 до 1,05, которой обладают пенопласты. Например, у пенополистирола она достигает величины 1,025. Подобные материалы проницаемы для радиоволн, что послужило основанием для их использования в качестве обтекателей для радиоантенн самолета. Поэтому есть необходимость в измерении малых диэлектрических проницаемостей.

В работе [6] описан резонансный метод измерения диэлектрической проницаемости с помощью волноводно-диэлектрического резонатора (ВДР) на цилиндрическом запредельном волноводе на H_{111} -колебаниях. Но приведенный в [6] метод (назовем его «непосредственным») при измерении малых диэлектрических проницаемостей ($\varepsilon < 1,1$) имеет недостатки. При уменьшении ε диэлектрического элемента (ДЭ) для сохранения точности измерения необходимо увеличивать длину ДЭ и запредельных отрезков волновода. Это приводит к усложнению технологии изготовления волновода. Другой недостаток – зависимость погрешности измерения диэлектрической проницаемости от погрешности измерения диаметра волновода.

В данной работе предложен другой метод измерения малых диэлектрических проницаемостей материалов (будем называть его «косвенным») с использованием ВДР. Приводится анализ ошибок «непосредственного» и «косвенного» резонансных методов и сравнительная оценка их погрешностей. Даны результаты измерений нескольких образцов пенопластов и оценены их погрешности.

1. Методика измерения малых диэлектрических проницаемостей материалов. Для измерений используется цилиндрический ВДР (см. рисунок), состоящий из цилиндрического волновода 4, ДЭ 2, запредельных отрезков волновода 1 и 3. Круглый фланец 5 предназначен для стыковки с торцом прямоугольного волновода, имеющего аналогичный фланец. Круглые фланцы в узле стыковки необходимы для подстройки поляризации сигнала возбуждения резонатора.



Волноводно-диэлектрический резонатор

Использование цилиндрического волновода обусловлено простотой его изготовления. Колебания H_{111} в ВДР на цилиндрическом запредельном волноводе, используемые при измерениях, поляризационно вырождены. Неидеальность

волновода (эллиптичность), погрешности в изготовлении ДЭ и неоднородность диэлектрика снимают вырождение. В результате получаются два резонанса, ортогональных по поляризации и разнесенных по частоте.

Рассмотрим измерение диэлектрической проницаемости «непосредственным» и «косвенным» методами. Измерение проводим, используя коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) [7]. Проще всего это сделать с помощью панорамного измерителя КСВН.

При «непосредственном» методе в качестве ДЭ используем элемент из исследуемого диэлектрика (пенопласта). Перемещая ДЭ по волноводу, устанавливаем коэффициент связи резонатора с источником возбуждения меньше 0,025, что соответствует КСВН > 40. При добротности выше 2 000 это сводит влияние реактивности связи на частоту резонатора к величине, существенно не влияющей на результат. Подбирая коэффициент связи, устанавливаем длину отрезка 1 ВДР. Длина отрезка 3 должна быть такой, чтобы ее можно было считать бесконечной (1,2...1,5 длины отрезка 1) и дальнейшее ее увеличение не сказывалось на частоте. Теперь измеряем обе резонансные частоты и среднюю частоту используем для расчета диэлектрической проницаемости. При этом следует измерять частоту колебаний H_{111} , так как при $\varepsilon > 1,05$ и длине ДЭ больше четырех диаметров волновода будут возбуждаться колебания H_{112} , а при дальнейшем увеличении длины или ε – моды более высокого порядка.

При «косвенном» методе измерения диэлектрической проницаемости в качестве ДЭ используем элемент из фторопласта-4 с $\text{tg } \delta = 2 \cdot 10^{-4}$ и $\varepsilon = (2 \dots 2,1)$. Благодаря некоторой эластичности ДЭ из фторопласта его можно с небольшим усилием перемещать вдоль волновода для подбора коэффициента связи (он должен быть меньше 0,025).

На первом этапе измерений «непосредственным» методом определяем диэлектрическую проницаемость фторопластового ДЭ. Далее на отрезки 1 и 3 помещаем элементы из пенопласта. Измеряем резонансные частоты полученного резонатора и вычисляем среднюю. Используя полученную диэлектрическую проницаемость ДЭ и резонансную частоту нового резонатора, рассчитываем диэлектрическую проницаемость вставок. Такой метод уменьшает погрешность измерения в 2...5 раз при диэлектрической проницаемости измеряемого материала (пенопласта) 1,02...1,1 за счет того, что составляющая ошибки определения диэлектрической проницаемости ДЭ, зависящая от погрешности измерения диаметра волновода, частично компенсирует аналогичную ошибку определения диэлектрической проницаемости пенопласта.

Для расчета диэлектрических проницаемостей используем одну из приведенных формул [4, 8]:

$$\frac{\beta_{11}}{\gamma_{11}} - \text{ctg} \frac{\beta_{11}l}{2} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\beta_{11}}{\gamma_{11}} [1 + \text{th}(\gamma_{11}L)] = \left[\frac{\beta_{11}^2}{\gamma_{11}^2} \text{th}(\gamma_{11}L) - 1 \right] \text{tg}(\beta_{11}l), \quad (2)$$

где $\beta_{11} = \sqrt{\varepsilon_{\text{ДЭ}} k^2 - \left(\frac{v_{11}}{a}\right)^2}$ – постоянная распро-

странения волны; $\gamma_{11} = \sqrt{\left(\frac{v_{11}}{a}\right)^2 - \varepsilon_{\text{ср}} k^2}$ – посто-

янная затухания; l – длина ДЭ; L – расстояние между ДЭ и короткозамыкающим поршнем; $\varepsilon_{\text{ДЭ}}$ и $\varepsilon_{\text{ср}}$ – диэлектрические проницаемости ДЭ и среды (диэлектрик), заполняющей запердельные отрезки волновода; $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{c}$ (λ – длина волны, f – частота, c – скорость света); v_{11} – первый корень первой производной функции Бесселя первого порядка (для колебаний в резонаторе H_{111}); a – радиус волновода.

Если для расчетов используем формулу (2), то величину L следует брать равной или превышающей длину отрезка волновода 3. Формула (1) пригодна для расчетов только нечетных мод (H_{111} , H_{113} и т. д.).

2. Анализ влияния погрешностей исходных данных на точность определения диэлектрической проницаемости. На точность измерений диэлектрической проницаемости «непосредственным» методом влияют погрешности измерения резонансной частоты, диаметра волновода, длины ДЭ.

Степень влияния этих погрешностей зависит от отношения длины ДЭ к длине волны в волноводе (l/Λ) на участке 2 ВДР при резонансной частоте. В табл. 1 приведены отношения относительной величины ошибки определения диэлектрической проницаемости к относительной величине погрешности для трех выше перечисленных погрешностей. Данные приведены для пяти величин отношения длины ДЭ к длине волны в волноводе на участке 2 ВДР при резонансной частоте (0,1; 0,2; 0,3; 0,33; 0,4) и для диэлектрических проницаемостей ДЭ в пределах 1,02...1,1. Они рассчитаны с использованием формулы (1) и формулы определения погрешности вычисления функции нескольких переменных [9].

В табл. 1 $\delta\varepsilon$, δf , δD , δl – относительные величины погрешностей диэлектрической проницаемости, частоты, диаметра волновода и длины ДЭ

соответственно. Значения $\delta\varepsilon/\delta f$ и $\delta\varepsilon/\delta D$ даны для $\varepsilon = 1,02$ и с увеличением ε меняются очень слабо (для $\varepsilon = 1,1$ снижаются меньше чем на 5 %). Отношение $\delta\varepsilon/\delta l$ изменяется заметно при изменении диэлектрической проницаемости. Меньшие

величины соответствуют $\varepsilon = 1,02$, большие – $\varepsilon = 1,1$. Данная таблица не позволяет точно рассчитать погрешность измерения, но дает возможность оценить влияние каждого фактора на величину ошибки. В таблице даны модули величин.

Таблица 1

Влияние погрешностей исходных данных на погрешность определения диэлектрической проницаемости при «непосредственном» методе измерения

Исходные данные	Коэффициенты влияния погрешностей исходных данных				
	l/Λ	$\delta\varepsilon/\delta f$	$\delta\varepsilon/\delta D$	$\delta\varepsilon/\delta l$	
l/Λ	0,1	0,2	0,3	0,33	0,4
$\delta\varepsilon/\delta f$	11	3,5	2,35	2,2	2,05
$\delta\varepsilon/\delta D$	11	3,5	2,35	2,2	2,0
$\delta\varepsilon/\delta l$	0,02...0,09	0,015...0,07	0,01...0,04	0,007...0,035	0,007...0,015

Из табл. 1 видно, что ошибка уменьшается с увеличением длины ДЭ, точнее, отношения l/Λ на резонансной частоте. Можно считать оптимальным отношение $l/\Lambda = 0,2...0,3$.

Проанализируем относительные ошибки измерения диэлектрической проницаемости при $l/\Lambda = 0,2$ и $0,3$ для $\varepsilon = 1,02$ и $1,1$.

Резонансную частоту при добротности резонаторов более 2 000, относительном уходе частоты генератора не более $2 \cdot 10^{-5}$ в минуту и погрешности частотомера не более 10^{-5} можно измерить с относительной погрешностью 10^{-4} . Отсюда получаем относительную погрешность измерения диэлектрической проницаемости в зависимости от погрешности измерения частоты $\pm (0,035...0,0235)$ %.

Эффективный внутренний диаметр волновода сравнительно просто измеряется с погрешностью $(0,2...0,3)$ %. Для определенности возьмем погрешность измерения диаметра $\pm 0,2$ %. Тогда относительная погрешность измерения диэлектрической проницаемости от ошибки измерения диаметра будет составлять $\pm (0,7...0,47)$ %.

Длину ДЭ реально измерить с ошибкой не более 1 % (учитывается эластичность пенопласта). Относительная погрешность измерения диэлектрической проницаемости в зависимости от ошибки измерения длины ДЭ будет составлять $\pm (0,015...0,07)$ % и $\pm (0,01...0,04)$ %.

Из сопоставления полученных данных следует, что ошибка в измерении диаметра волновода дает вклад в общую погрешность $(85...90)$ %. Более точно погрешность следует рассчитывать, используя формулы (1) или (2) и реальные значения погрешностей используемых параметров.

При «косвенном» методе измерения диэлектрической проницаемости пенопласта на погрешность влияют те же факторы, что и при из-

мерении «непосредственным» методом. Но резонансная частота измеряется дважды (при заполнении запредельных отрезков волновода воздухом и пенопластом), поэтому влияние будет «двойным».

Табл. 2 построена аналогично табл. 1. Параметр l/Λ – отношение длины фторопластового ДЭ к резонансной длине волны в волноводе на отрезке 2 при заполнении отрезков 1 и 3 воздухом, $\delta f_{\text{в}}$ – относительная ошибка измерения резонансной частоты, если в отрезках 1 и 3 воздух, $\delta f_{\text{пн}}$ – если пенопласт.

Из табл. 2 видно, что с ростом длины фторопластового ДЭ (рост l/Λ) увеличиваются ошибки определения ε . Но с уменьшением длины ДЭ будет расти относительная ошибка определения длины и отклонение торцевых поверхностей ДЭ от параллельности, что в результате даст увеличение погрешности.

Для анализа и сравнения описанных методов измерения диэлектрической проницаемости возьмем $l/\Lambda = 0,33$ для «непосредственного» метода, $l/\Lambda = 0,15$ – для «косвенного». Ошибки других параметров: $\delta f \leq 0,01$ %; $\delta l \leq 1$ %; $\delta D \leq 0,2$ %. В результате получаем: для «непосредственного» метода – $\delta\varepsilon/\delta f \leq 0,022$ %, $\delta\varepsilon/\delta D \leq 0,44$ %, при $\varepsilon = 1,02$ – $\delta\varepsilon/\delta l \leq 0,007$ %, при $\varepsilon = 1,1$ – $\delta\varepsilon/\delta l \leq 0,035$ %, суммарная ошибка $\leq (0,45$ и $0,5)$ %; для «косвенного» метода: при $\varepsilon = 1,02$ $\delta\varepsilon/\delta f_{\text{в}} \leq 0,04$ %, $\delta\varepsilon/\delta f_{\text{пн}} \leq 0,041$ %, $\delta\varepsilon/\delta D \leq 0,02$ %, $\delta\varepsilon/\delta l \leq 0,007$ %, суммарная ошибка $\leq 0,11$ %; $\varepsilon = 1,1$: $\delta\varepsilon/\delta f_{\text{в}} \leq 0,033$ %, $\delta\varepsilon/\delta f_{\text{пн}} \leq 0,038$ %, $\delta\varepsilon/\delta D \leq 0,092$ %, $\delta\varepsilon/\delta l \leq 0,031$ %, суммарная ошибка $\leq 0,2$ %.

Из сопоставления полученных данных следует, что при оговоренных условиях «косвенный» метод дает ошибку в 2,5–4 раза меньшую, чем «непосредственный». Если погрешность измерения частоты будет в 5–10 раз хуже, то «косвенный» метод уже не даст преиму-

щества. Поэтому для пенопласта с большими потерями «косвенный» метод не подходит. Чем ниже добротность резонатора, тем больше погрешность измерения частоты и влияние реактивности узла связи на резонансную частоту резонатора.

Таблица 2

Влияние погрешностей исходных данных на погрешность определения диэлектрической проницаемости при «косвенном» методе измерения

Исходные данные	Коэффициенты влияния погрешностей исходных данных			
	0,1	0,15	0,2	0,25
l/Λ				
$\delta\varepsilon/\delta f'_в$	2,7...2,2	4,0...3,3	6,6...5,5	12,0...10,0
$\delta\varepsilon/\delta f'_{\text{шп}}$	2,8...2,7	4,1...3,8	6,7...5,9	12,0...10,0
$\delta\varepsilon/\delta l$	0,004...0,014	0,007...0,031	0,012...0,052	0,019...0,080
$\delta\varepsilon/\delta D$	0,11...0,49	0,10...0,46	0,10...0,46	0,12...0,50

3. Результаты эксперимента. Для проверки результатов расчетов обоими методами были измерены диэлектрические проницаемости различных диэлектриков (серии №№ 1–3 – пено-

полистирол, серия № 4 – пенополивинилхлорид). Результаты измерений обрабатывались в соответствии с методикой, предложенной в [10]. Полученные данные сведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты измерения диэлектрической проницаемости различных образцов пенопластов

№ серии измерений	Уд. вес, г/см ³	«Непосредственный» метод				«Косвенный» метод			
		$\bar{\varepsilon}$	$\Delta\varepsilon_{\text{ск}}, \%$	$\Delta\varepsilon_{\text{расч}}, \%$	$f, \text{ГГц}$	$\bar{\varepsilon}$	$\Delta\varepsilon_{\text{ск}}, \%$	$\Delta\varepsilon_{\text{расч}}, \%$	$f, \text{ГГц}$
1	0,015	1,025	0,05	0,54	11,59	1,022	0,03	0,12	10,56
2	0,033	1,043	0,1	0,59	11,55	1,039	0,03	0,14	10,52
3	0,034	1,048	0,1	0,5	11,48	1,045	0,1	0,14	10,51
4	0,084	1,102	0,5	0,53	11,26	1,101	0,35	0,23	10,36

Здесь $\bar{\varepsilon}$ – среднее значение измеренной диэлектрической проницаемости, $\Delta\varepsilon_{\text{ск}} \%$ – относительное среднее квадратичное отклонение, $\Delta\varepsilon_{\text{расч}} \%$ – максимальная относительная расчетная ошибка (модуль), f – усредненная частота измерений.

Для измерений использовали в каждой серии по 11 образцов. Диаметр волновода составлял $(15,06 \pm 0,03)$ мм. Длина образцов для «непосредственного» метода в серии № 1 составляла 0,21...0,28 длины волны на резонансной частоте в области 2 резонатора, в серии № 2 – 0,23...0,25, в серии № 3 – 0,30...0,31, в серии № 4 – 0,30...0,34. Погрешность измерения длины – не хуже $\pm 1 \%$. При «косвенном» методе измерений использовался ДЭ из фторопласта-4 длиной $(4,51 \pm 0,05)$ мм. Пенопластовые элементы были те же, что и при

«непосредственным» методе. При необходимости они укорачивались до нужной длины на отрезке 1 и использовались парами на отрезке 2. Для измерений «непосредственным» методом использовался волновод длиной 300 мм (необходимая длина для серии № 1 была ≥ 300 мм, серий № 2 и № 3 – 250...270 мм и для серии № 4 достаточно было 170 мм). Для «косвенного» метода во всех случаях достаточно было 150 мм.

При расчете максимальной ошибки выбиралась комбинация исходных погрешностей, обеспечивающая максимальное отклонение диэлектрической проницаемости.

Анализ данных табл. 3 показывает, что «косвенный» метод дает в 3,5–4,5 раза меньшую погрешность для серий №№ 1–3 и в 2,3 раза – для серии № 4. Это обусловлено повышенными потерями материала четвертой серии, вследствие чего

относительная погрешность измерения частоты была $2 \cdot 10^{-4}$.

Отличие среднего значения диэлектрической проницаемости при «косвенном» и «непосредственном» методах измерений объясняется ошибкой определения эффективного диаметра волновода. При всех измерениях использовался один волновод, поэтому данная ошибка систематическая. Оптимизировать диаметр волновода можно по результатам измерений обоими методами, подобрав его таким, чтобы результаты совпали. Так, если взять диаметр волновода 15,08 мм, то получились бы диэлектрические проницаемости 1,022 и 1,022; 1,039 и 1,038; 1,045 и 1,045; 1,099 и 1,1 для «непосредственного» и «косвенного» методов, соответственно.

Исходя из данных табл. 2 и постоянства диаметра волновода можно предположить, что максимальное отклонение измеренной диэлектрической проницаемости для «непосредственного» метода: в сериях №№ 1–3 должно быть $\leq (0,03...0,04) \%$, реальное – $(0,1...0,2) \%$, для серии № 4 должно быть $\leq 0,08 \%$, а реальное – $0,6 \%$. Для «косвенного» метода максимальное отклонение: в сериях №№ 1–3 должно быть $\leq 0,08 \%$, было $(0,03...0,2) \%$; в серии № 4 должно быть $\leq 0,14 \%$, а было $0,65 \%$. Большие реальные отклонения объясняются как погрешностью изготовления ДЭ, так и неравномерностью плотности измеряемого материала.

Выводы. Для «непосредственного» метода измерения диэлектрической проницаемости рекомендуемая длина ДЭ должна составлять $0,2...0,33$ резонансной длины волны в волноводе на участке с ДЭ. Большая длина дает меньшую погрешность измерения.

Достоинство «непосредственного» метода в том, что он позволяет измерять и большие диэлектрические проницаемости; ограничений «сверху» нет.

Для «косвенного» метода рекомендуемая длина фторопластового ДЭ должна составлять $0,1...0,2$ резонансной длины волны в волноводе на участке ДЭ при заполненных воздухом участках волновода 1 и 3 (рисунок). Уменьшение длины ДЭ дает уменьшение погрешности измерения. Минимальная длина ограничивается возможностями технологии изготовления ДЭ.

«Косвенный» метод измерения малых диэлектрических проницаемостей с использованием резонаторов на цилиндрическом заперделном волноводе дает уменьшение погрешности измерения в 2,5–5 раз по сравнению с «непосредственным» методом. Для измерения малых диэлектрических проницаемостей (1,02...1,1), если требуется повышенная точность, применение «косвенного» метода вполне оправдано (несмотря на более сложную технологию измерения). Данный

метод дает выигрыш только для диэлектриков с малыми потерями (ориентировочно $\text{tg } \delta < 0,0005$). Кроме того, «косвенный» метод дает возможность использовать более короткий волновод.

Библиографический список

1. *Рез И. С.* Диэлектрики. Основные свойства и применения в электронике / И. С. Рез, Ю. М. Поплавко. – М.: Радио и связь, 1989. – 288 с.
2. *Поплавко Ю. М.* Физика активных диэлектриков / Ю. М. Поплавко, Л. П. Переверзева, И. П. Раевский. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2009. – 480 с.
3. *Скородумов А. И.* Диэлектрические линзовые антенны КВЧ и СВЧ-диапазонов / А. И. Скородумов, Г. И. Трошин, Ю. Я. Харланов // Зарубежная радиоэлектроника. – М.: Радио и связь, 1990. – № 4. – С. 93–94.
4. *Диэлектрические резонаторы* / М. Е. Ильченко, В. Ф. Взятых, Л. Г. Гасанов и др. – М.: Радио и связь, 1989. – 328 с.
5. *Капилевич Б. Ю.* Волноводно-диэлектрические фильтрующие структуры / Б. Ю. Капилевич, Е. Р. Трубахин. – М.: Радио и связь, 1990. – 272 с.
6. *Метод измерения параметров диэлектриков в микроволновом диапазоне* / Р. И. Белоус, Ю. Г. Макеев, А. П. Моторненко, Л. П. Моторненко // Радиотехника: науч.-техн. сб. / Харьков. нац. ун-т радиоэлектрон. – Х., 2012. – Вып. 168. – С. 103–107.
7. *Зайцев А. Н.* Измерения на сверхвысоких частотах / А. Н. Зайцев, П. А. Иващенко, А. В. Мыльников. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 240 с.
8. *Белоус Р. И.* Собственные колебания и добротности волноводно-диэлектрического резонатора с КЗ-поршнем / Р. И. Белоус, Ю. Г. Макеев, А. П. Моторненко // Вісник Сумського держ. ун-ту. – 1997. – № 1(7). – С. 65–69.
9. *Бронштейн И. Н.* Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М.: Наука, 1981. – 720 с.
10. *Валитов Р. А.* Радиотехнические измерения / Р. А. Валитов, В. Н. Сретенский. – М.: Сов. радио, 1970. – 712 с.

Рукопись поступила 07.04.2016.

R. I. Bilous, M. V. Vovnyuk, I. G. Skuratovskiy,
O. I. Khazov, A. S. Shakhova

MEASUREMENT OF FOAM PLASTICS PERMITTIVITY WITH THE RESONANCE METHOD USING A WAVEGUIDE-DIELECTRIC RESONATOR

The rapid development of electronic technology is characterized by continuous expanding the potentials of new types of created elements, devices and systems that use porous plastics. Therefore, it is necessary to study the main electrophysical characteristics of these materials. The effective solution to this problem is impossible without the accurate determination of the dielectric constant (ϵ). This paper presents two methods of measuring the relative low ϵ (1.02...1.1) of foams using a cylindrical waveguide-dielectric resonator on the evanescent waveguide. The measurements of the ϵ were carried out for four types of foams in the frequency range 10...12 GHz and the estimation errors are presented. In the “direct” method the test material is used as a dielectric element of the resonator. In the “indirect” method the dielectric element is made from fluoroplast, and the test material filled the evanescent sections of the waveguide. The investigations have shown that the “indirect” method gives a decrease of the meas-

urement error in 2.5–5 times compared to the “direct” one. But the “direct” method is easier and allows to measure any permittivities.

Key words: waveguide-dielectric resonator, dielectric element, evanescent waveguide, relative dielectric constant, resonance frequency.

Р. І. Білоус, М. В. Вовнюк, І. Г. Скуратовський,
О. І. Хазов, Г. С. Шахова

ВИМІРЮВАННЯ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОНИКНОСТІ ПЕНОПЛАСТІВ РЕЗОНАНСНИМ МЕТОДОМ ЗА ДОПОМОГОЮ ХВИЛЕВІДНО-ДІЕЛЕКТРИЧНОГО РЕЗОНАТОРА

Інтенсивний розвиток електронної техніки характеризується безперервним розширенням функціональних можливостей створюваних нових типів елементів, приладів та систем, в яких використовуються пористі пластмаси. Тому

виникає необхідність дослідження основних електрофізичних характеристик таких матеріалів. Успішне розв'язання цієї задачі неможливе без точного визначення діелектричної проникності (ε). У роботі наведено два методи вимірювання низької відносної ε (1,012...1,1) пінопластів за допомогою циліндричного хвилевідно-діелектричного резонатора на позамежному хвилеводі, результати вимірювань ε чотирьох типів пінопластів у діапазоні частот 10...12 ГГц та оцінку похибок вимірювань. У «безпосередньому» методі досліджуваний матеріал використовується як діелектричний елемент резонатора. У «непрямому» методі діелектричний елемент був виготовлений з фторопласту, а пінопласт заповнював позамежні ділянки хвилеводу. Проведені дослідження показали, що «непрямий» метод дає зменшення похибки вимірювання ε в 2,5–5 разів у порівнянні з «безпосереднім». Але «безпосередній» метод простіший і дозволяє вимірювати будь-які діелектричні проникності.

Ключові слова: хвилевідно-діелектричний резонатор, діелектричний елемент, позамежний хвилевід, відносна діелектрична проникність, резонансна частота.