

УДК. 621.317; 621.317.33

ПРОСТОЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ И ТАНГЕНСА УГЛА ПОТЕРЬ

Л. П. Яцук¹⁾, В. В. Чухов²⁾, С. В. Дерипаска¹⁾

¹⁾Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, 4, пл. Свободы, Харьков, 61022
e-mail: Yatsuk38@gmail.com

²⁾Житомирский государственный технологический университет, 103, ул. Черняховского, Житомир, 10005
e-mail: mps_cvv@ukr.net

Поступила в редакцию 9 октября 2013 г.

Предлагается оценивать диэлектрическую проницаемость и тангенс угла потерь твердых материалов на основе измерения и расчета частотных характеристик коэффициентов отражения и прохождения от вставок, изготовленных из исследуемого материала, в рабочем диапазоне частот волновода. Вставка конечной длины полностью заполняет поперечное сечение волновода. Диэлектрическая проницаемость определяется на основе измеренной частоты, на которой наблюдается единственный в рабочем диапазоне минимум коэффициента отражения от короткой вставки, или двух частот, на которых наблюдаются минимумы в случае более длинных вставок. После этого методом подбора оценивается тангенс угла потерь путем совмещения расчетных и экспериментальных зависимостей от частоты коэффициентов отражения и прохождения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: волновод, вставка, частота, диэлектрическая проницаемость, тангенс угла потерь, коэффициенты отражения, прохождения.

Пропонується оцінювати діелектричну проникність і тангенс кута втрат твердих матеріалів на основі вимірювання та розрахунку частотних характеристик коефіцієнтів відбиття і проходження від вставок, виготовлених з досліджуваного матеріалу, в робочому діапазоні частот хвилеводу. Вставка кінцевої довжини повністю заповнює поперечний переріз хвилеводу. Діелектрична проникність визначається на основі вимірної частоти, на якій спостерігається єдиний в робочому діапазоні мінімум коефіцієнта відбиття від короткої вставки, або двох частот, на яких спостерігаються мінімуми у випадку більш довгих вставок. Після цього методом підбору оцінюється тангенс кута втрат шляхом суміщення розрахункових і експериментальних залежностей від частоти коефіцієнтів відбиття і проходження.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: хвилевід, вставка, частота, діелектрична проникність, тангенс кута втрат, коефіцієнти відбиття, проходження.

It is proposed to evaluate the dielectric constant and loss tangent of solid materials by measuring and calculating the frequency characteristics of reflection and transmission coefficients of the inserts made of the test material in the waveguide operating frequency range. The insert of finite length completely fills the cross section of the waveguide. Dielectric constant is determined based on the measured frequency, at which the only minimum of reflection coefficient is observed in the working range from the short insert or two frequencies in the case of longer insertions. After this using method of selection dissipation is estimated by matching the calculated and experimental frequency dependences of the reflection and transmission coefficients.

KEYWORDS: waveguide, insertion, frequency, dielectric constant and loss tangent, reflection, transmission coefficients.

ВВЕДЕНИЕ

В современной теории и технике СВЧ большую роль играют диэлектрики. Они могут использоваться как управляющие элементы в канализирующих системах, отверстиях связи, сами быть объектами облучения и исследования, являются средой, в которой распространятся электромагнитные волны. Большая область исследования связана с созданием искусственных диэлектриков. В любом случае использования диэлектриков необходимо знать их электрофизические параметры: диэлектрическую проницаемость ϵ и тангенс угла потерь $tg\delta$. Исчерпывающий обзор методов определения этих параметров дан в работе [1]. В ряде случаев величины ϵ и $tg\delta$ могут непредсказуемо

изменяться от частоты. Если отсутствует возможность воспользоваться описанной в литературе установкой для точного измерения этих параметров, желательно уметь определять их хотя бы приближенно. В настоящей работе обсуждается простейший способ оценки ε и $tg\delta$ на основании расчета и измерения коэффициентов отражения и прохождения от диэлектрической вставки конечной длины в прямоугольном волноводе, полностью заполняющей его поперечное сечение.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ε И $tg\delta$

Рассматриваемая система представляет собой бесконечный прямоугольный волновод, в котором имеется диэлектрическая вставка длиной c , полностью перекрывающая его поперечное сечение (рис.1).

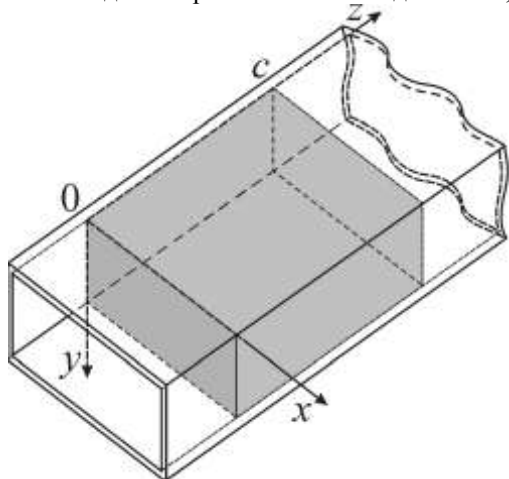


Рис. 1. Рассматриваемая система

Полагаем, что волновод возбуждается от генератора высокой частоты волной типа H_{10} единичной амплитуды, бегущей в сторону $z > 0$. Формулы для расчета коэффициента отражения $\dot{\Gamma}_1$ от вставки и коэффициента прохождения $\dot{\Gamma}_{12}$ за вставку легко выводятся на основе условия непрерывности тангенциальных составляющих полей \vec{E} и \vec{H} на границах раздела «воздух-диэлектрик» и «диэлектрик-воздух» по обе стороны от вставки. Их можно найти и в литературе, например в [2-5]. Нами эти выражения получены в виде

$$\dot{\Gamma}_1 = 1 - \chi^2 \frac{-2i \sin \gamma_\varepsilon c}{1 + \chi^2 e^{i\gamma_\varepsilon c} - 1 - \chi^2 e^{-i\gamma_\varepsilon c}}, \quad (1)$$

$$\dot{\Gamma}_{12} = \frac{4\chi}{1 + \chi^2 e^{i\gamma_\varepsilon - \gamma c} - 1 - \chi^2 e^{-i\gamma_\varepsilon + \gamma c}}, \quad (2)$$

где $\chi = \gamma / \gamma_\varepsilon$, γ и γ_ε – продольные волновые числа волны основного типа в пустом волноводе и волноводе, заполненном диэлектриком.

Из выражения (1) следует, что для диэлектрика без потерь минимум коэффициента отражения, равный нулю, наблюдается при условии

$$\gamma_\varepsilon c = n\pi, \quad (3)$$

где $\gamma_\varepsilon = 2\pi / \lambda_{g\varepsilon}$, $\lambda_{g\varepsilon}$ – длина волны в волноводе, полностью заполненном диэлектриком, n принимает значения 1, 2, 3 и т.д..

При этом коэффициент прохождения $|\dot{\Gamma}_{12}|$ по модулю равен единице. Из соотношения (3) с использованием экспериментальных данных можно получить диэлектрическую проницаемость материала, из которого изготовлена вставка. Этот результат получен в работе [6]. Выражение для диэлектрической проницаемости ε в наших обозначениях имеет вид

$$\varepsilon = \left(\frac{\lambda_0}{2} \right)^2 \left[\left(\frac{1}{a} \right)^2 + \left(\frac{n_0}{c} \right)^2 \right], \quad (4)$$

где λ_0 – длина волны в свободном пространстве на частоте f_0 , а n_0 – число полуволн, которое укладывается вдоль вставки на частоте f_0 . Тот же номер мы присвоим и минимуму. На частоте $f_q > f_0$ минимума с номером $n = n_0 + q$ на вставке укладывается $n = n_0 + q$ полуволн.

В работе [6] сначала по результатам измерения двух частот f_0 и f_q получено выражение для n_0 , которое затем используется для определения ε по приведенной выше формуле.

Можно получить выражение для ε рассматриваемой вставки, минуя определение n_0 . Записывая соотношение (3) в двух точках, например, где $n_1 = n_0$ и $n_2 = n_0 + 1$, и вычитая одно из другого, исключаем из рассмотрения n_0 и сводим полученное выражение к квадратному уравнению относительно ε .

$$A\varepsilon^2 + B\varepsilon + C = 0, \quad (5)$$

где

$$A = \left(\frac{1}{\lambda_{02}^2} - \frac{1}{\lambda_{01}^2} \right)^2, \quad B = - \left(\frac{1}{\lambda_{01}^2} + \frac{1}{\lambda_{02}^2} \right) \frac{1}{2c^2}, \quad C = \left(\frac{1}{16c^4} + \frac{1}{4a^2c^2} \right).$$

Здесь λ_{01} и λ_{02} ($\lambda_{01} > \lambda_{02}$), соответствуют двум измеренным частотам $f_{01} < f_{02}$, на которых наблюдаются соседние минимумы коэффициента отражения.

Решение уравнения (5) имеет вид

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}, \quad (6)$$

Как показали расчеты, значению $\varepsilon \geq 1$ соответствует знак + в числителе.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТНЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для того, чтобы по формуле (6) можно было оценить диэлектрическую проницаемость, необходимо, чтобы в рабочем диапазоне волновода наблюдались, по крайней мере, два минимума частотной зависимости коэффициента отражения. Чем длиннее диэлектрическая вставка и выше уровень ε , тем большее число полуволн может уложиться вдоль нее. При отсутствии потерь в диэлектрике нет ограничений на длину вставки. Если потери присутствуют, надо, чтобы волна в ней не затухла полностью. Для этого вставка должна быть достаточно короткой, но такой, чтобы в рабочей полосе наблюдался хотя бы один минимум (максимум) коэффициента отражения. Тогда ε можно найти из выражения (3) по формуле

$$\varepsilon = \left(\frac{\lambda_0}{2} \right)^2 \left[\left(\frac{1}{a} \right)^2 + \left(\frac{p_0}{2l} \right)^2 \right], \quad (7)$$

где $p_0 = 2n + \delta_{0n}$ – количество четвертей длин волн, которое укладывается вдоль образца на частоте минимума (максимума), $l = c/2$, δ_{0n} – символ Кронекера.

С первого взгляда, неизвестно, какое значение n следует выбирать. Однако, следует иметь в виду, что разным n соответствуют различные значения ε и разное поведение частотных характеристик $\dot{\Gamma}_1$. Все они будут иметь минимум (или максимум) на частоте f_0 , и только одна из них будет ближе всех прилегать к экспериментальной зависимости $\dot{\Gamma}_1$ от частоты. Именно она и определяет искомое значение ε . Это значение ε следует использовать при расчете $|\dot{\Gamma}_1|^2$ и $|\dot{\Gamma}_{12}|^2$ от частоты. Для краткости дальнейшие рассуждения посвятим минимуму. В случае идеального диэлектрика без потерь минимальные значения $|\dot{\Gamma}_1|^2$ равны нулю, а максимальные значения $|\dot{\Gamma}_{12}|^2$ – единице. Из проведенных нами расчетов следует, что экстремумы в частотных зависимостях $|\dot{\Gamma}_1|^2$ и $|\dot{\Gamma}_{12}|^2$ в случае $tg\delta \ll 1$ не смещаются по частоте при учете потерь в диэлектрике. Наличие потерь ведет к «заплыванию» нулей

коэффициента отражения и понижению уровня максимума коэффициента прохождения (их квадратов модуля). Коэффициент прохождения $|\dot{\Gamma}_{12}|^2$ заметно быстрее изменяется при появлении потерь, чем коэффициент $|\dot{\Gamma}_1|^2$. Естественно, что частотные зависимости, рассчитанные с использованием найденного ранее значения ε , будут отличаться от экспериментальных кривых, если диэлектрик имеет потери. Тогда подбором $tg\delta$, который вводится в формулы для расчета $|\dot{\Gamma}_1|^2$ и $|\dot{\Gamma}_{12}|^2$, удастся совместить кривые расчетных зависимостей $|\dot{\Gamma}_1|^2$ и $|\dot{\Gamma}_{12}|^2$ от частоты с экспериментальными, что позволяет судить об уровне $tg\delta$ исследуемого диэлектрика.

Приведем пример такого исследования для вставки из винипласта длиной 10 мм. На рисунке 2 сплошные линии использованы для $|\dot{\Gamma}_1|^2$, штриховые – для $|\dot{\Gamma}_{12}|^2$, маркерами нанесены экспериментальные данные. Кривые 1, 2 соответствуют ε , соответствующему $n = 1$ в формуле (7), кривые 3, 4 – $n = 2$ (обе – без учета потерь). При расчете кривой 5 $tg\delta$ подбирали так, чтобы расчетное значение коэффициента прохождения максимально приблизилось к экспериментальному.

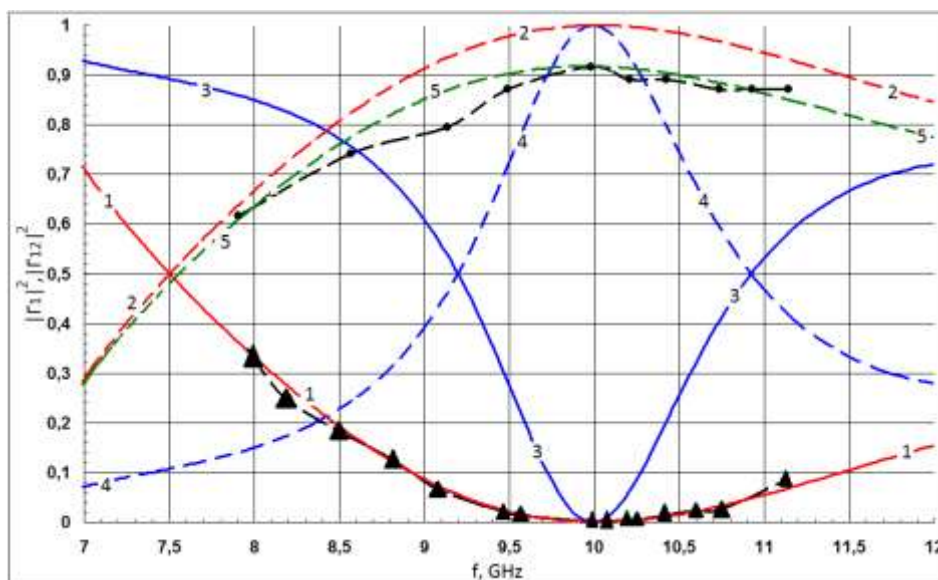


Рис. 2. Расчетные и экспериментальные зависимости $|\Gamma_1|^2$ и $|\Gamma_{12}|^2$ от частоты образца длиной 10 мм в случаях $\varepsilon = 2,66$ (кривые 1 и 2) и $\varepsilon = 9,45$ (кривые 3 и 4). Маркеры – экспериментальные данные. Кривая 5 – расчет с учетом потерь при $\varepsilon = 2,66$.

Видим, что кривые 1, 2 ($\varepsilon = 2,66$) несравненно лучше согласуются с экспериментом, чем кривые 3, 4 ($\varepsilon = 9,45$).

При ошибочном значении диэлектрической проницаемости ($\varepsilon = 4$, вместо $\varepsilon = 2,66$) совместить расчетные кривые 1, 2 с экспериментальными 3, 4 не удастся (см. рис.3). Значение $\varepsilon = 4$ винипласта имеет место на частоте 50 Гц, что существенно отличается от ε на сверхвысоких частотах. Это вначале ошибочно не приняли во внимание. Полученное затем значение $\varepsilon = 2,66$ позволяет совместить расчетные и экспериментальные кривые (рис.4).

В литературе [7,8,9] приводятся значения $\varepsilon = 2,63$; $tg\delta = 0,0019$. Наши результаты для ε хорошо согласуются с ними и совпадают по порядку для $tg\delta$.

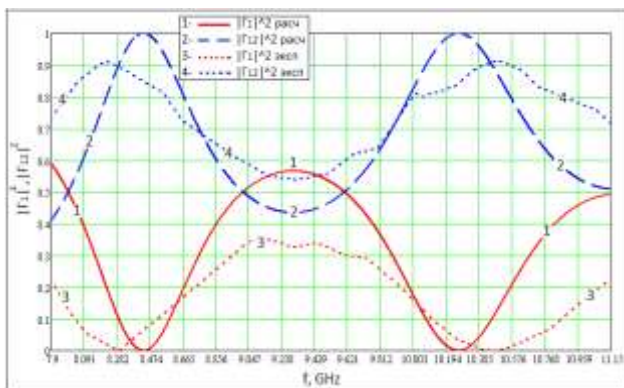


Рис. 3. Расчетные и экспериментальные зависимости $|\Gamma_1|^2$ и $|\Gamma_{12}|^2$ от частоты для образца винипласта $\epsilon=4$, $C=38$ мм.

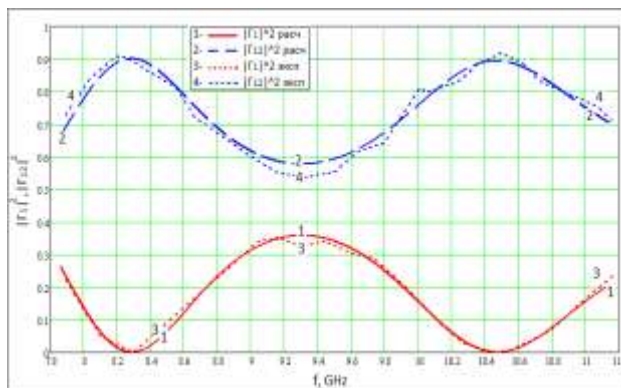


Рис. 4. Расчетные и экспериментальные кривые $|\Gamma_1|^2$ и $|\Gamma_{12}|^2$ от частоты для образца из винипласта $\epsilon=2,66$; $C=38$ мм, $\text{tg}\delta=0,00631$.

При исследовании вставки из текстолита длиной $c = 66$ мм наилучшее согласование расчетных и экспериментальных данных получили при $\epsilon = 3,95$; $\text{tg}\delta = 0,089$ (рис. 5). Видно, что частоты экстремумов из экспериментальных данных в этом случае определяются неоднозначно.

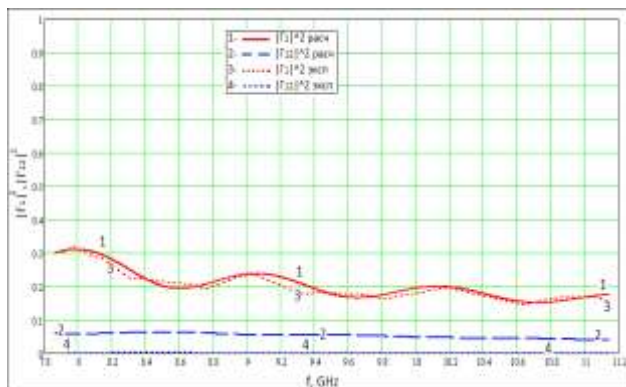


Рис. 5. Расчетные и экспериментальные зависимости $|\Gamma_1|^2$ и $|\Gamma_{12}|^2$ от частоты для образца текстолита $\epsilon=3,95$; $C=66$ мм; $\text{tg}\delta=0,089$

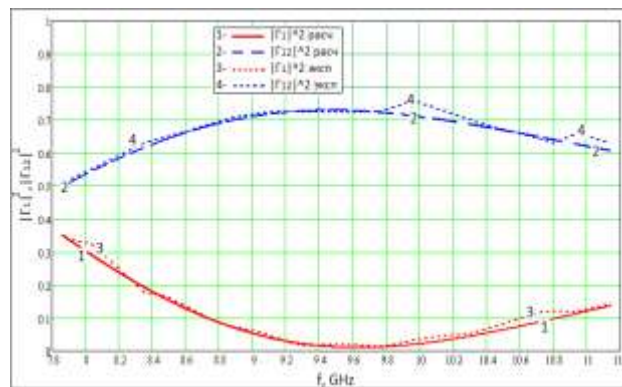


Рис. 6. Расчетные и экспериментальные зависимости $|\Gamma_1|^2$ и $|\Gamma_{12}|^2$ от частоты для образца текстолита $\epsilon=3,45$; $C=9$ мм; $\text{tg}\delta=0,066$

При исследовании укороченного образца (рис.6, $C = 9$ мм) полученные значения $\epsilon = 3,45$ и $\text{tg}\delta = 0,066$ лучше согласуются с литературными данными [9] (3,65 и 0,068 соответственно).

Полученные результаты дали основание для определения таким же образом электрических параметров других материалов. Нами были изготовлены образцы из эпоксидной смолы разной длины (11 мм, 41 мм и 54 мм). При совмещении расчетных и экспериментальных зависимостей для всех образцов получились с небольшим разбросом значения для ϵ (2,9 и 2,93) и $\text{tg}\delta$ (0,025 и 0,028).

Приведем два варианта этих зависимостей (рис. 7, 8).

ВЫВОДЫ

На основании проведенных исследований можно сделать такие выводы. Диэлектрическую проницаемость и тангенс угла потерь неизвестного материала можно проще всего оценить по частотной характеристике коэффициентов отражения и прохождения от вставки конечной длины в волноводе, изготовленной из этого материала так, что она полностью перекрывает его поперечное сечение. Измерения проводятся с помощью автоматического измерителя КСВН. Если зависимость коэффициента отражения от частоты имеет несколько минимумов, диэлектрическую проницаемость ϵ образца фиксированной длины можно найти по измеренным частотам двух соседних (или более далеких)

минимумов коэффициента отражения. Полученное значение ε используется при расчете частотных зависимостей коэффициентов отражения и прохождения. Вводя в расчетные формулы $tg\delta$ и варьируя его, следует добиться максимального согласования расчетных и экспериментальных кривых. Таким образом можно оценить уровень потерь исследуемого образца. Если коэффициент прохождения низок, что вызывается большими потерями, а частотная зависимость коэффициента отражения имеет неявно выраженные экстремумы, экспериментальный образец надо укоротить. При этом надо добиться того, чтобы на экране прибора наблюдался хотя бы один минимум коэффициента отражения, что позволяет оценить по изложенной выше методике ε исследуемого образца. Дальнейшие шаги по оценке $tg\delta$ описаны выше.

Изложенный простой способ оценки ε и $tg\delta$ диэлектрических образцов позволяет не только определить электрические параметры неизвестных композитных материалов, но и исследовать влияние на эти параметры температуры, влажности, давления, что важно для практики.

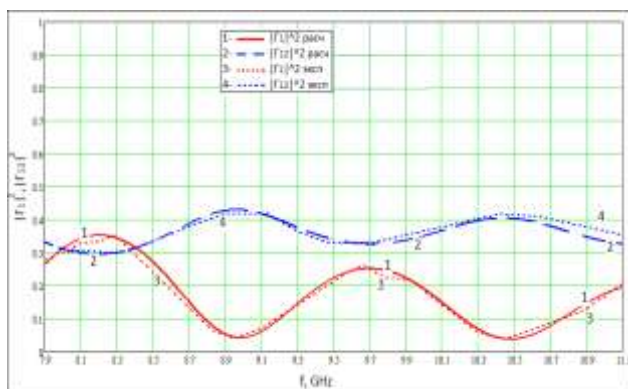


Рис. 7. Расчетные и экспериментальные зависимости $|\Gamma_1|^2$ и $|\Gamma_{12}|^2$ от частоты для образца из эпоксидной смолы $\varepsilon=2,9$; $C=11$ мм; $tg\delta=0,025$.

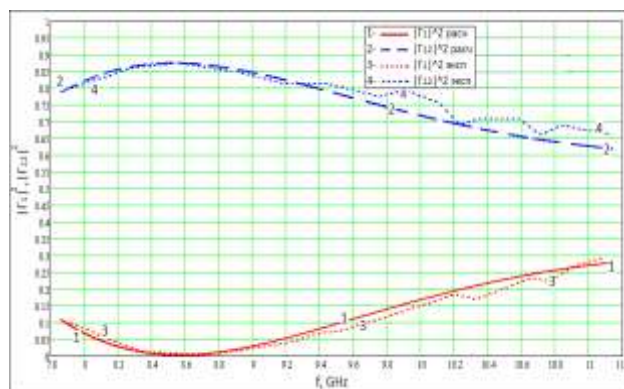


Рис. 8. Экспериментальные и расчетные зависимости $|\Gamma_1|^2$ и $|\Gamma_{12}|^2$ от частоты для образца из эпоксидной смолы $\varepsilon=2,93$; $C=54$ мм.

Расчет дал значение $\varepsilon = 2,916$, дополнительный подбор – $\varepsilon = 2,93$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чухов В.В. Радіочастотні методи та засоби вимірювань параметрів хвильоводів із діелектричним заповненням : дис.канд. техн. наук /В.В. Чухов . – Житомир, 2007. – 234 с.
2. Онищенко А.А. Попова Н.Я. Определение параметров диэлектриков через их радиотехнические характеристики //Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. – 1980. – № 11. – С. 21-23.
3. Чупров И.И., Минкус А.П. Определение диэлектрической и магнитной проницаемостей с помощью анализаторов СВЧ цепей //Техника средств связи. Сер. Радиоизмерительная техника. – 1984. – Вып. 6. – С. 1-13.
4. Полищук В.И. Метод и установка для измерения электрических параметров слабопоглощающих диэлектриков на базе панорамного измерителя КСВН и ослаблений //Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. – 1988. – Вып. 9(413). – С. 52-56.
5. Семенов Н.А. Техническая электродинамика. – М.: Связь, 1973. – 480 с.
6. Чухов В.В. Визначення сталих поширення шаруватих структур //Вісник Житомирського інженерно-технологічного інституту. Технічні науки. – 1999. – № 9. – С. 171-177.
7. Бахтин В.Д., Кулаенко Б.С., Мартыненко Л.Г., Слюсарский В.А. Определение диэлектрической проницаемости по отношению амплитуд E -компонент отраженной и прошедшей через диэлектрик волн //Изв. вузов, радиоэлектроника. – 1969. – Т.12.-№ 6. – С.-643.
8. Буртовой Д.П., Мироненко В.Л., Терещенко А.И. Применение открытого цилиндрического предельного резонатора для исследования диэлектрических свойств вещества. //Изв. вузов, радиоэлектроника. – 1970. – Т.13.– № 9. – С. -1085
9. Справочник по электротехническим материалам: В 3 т. Т. 1./Под ред. Ю.В. Корицкого и др. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 368 с.