

УДК 621.372.8.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТРАКТА
СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫХ УСТРОЙСТВ**

Джафарзаде М. Б.

*Азербайджанский технический университет,
проспект Г. Джавида 25, АЗ1073, Баку, Азербайджан*

jafarzademb@yahoo.com

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТРАКТУ
НАДВИСОКОЧАСТОТНИХ ПРИСТРОЇВ**

Джафарзаде М. Б.

*Азербайджанський технічний університет,
проспект Г. Джавида 25, АЗ1073, Баку, Азербайджан*

jafarzademb@yahoo.com

**EXPERIMENTAL RESEARCH OF PARAMETERS OF THE PATH OF THE
MICROWAVE OVEN OF DEVICES**

Jafarzade M.B.

*Azerbaijan Technical University
25, H. Javid avenue, AZ1073, Baku, Azerbaijan*

jafarzademb@yahoo.com

Аннотация. Предложен метод определения импеданса в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ), основывающийся на измерении комплексного коэффициента отражения от образца, расположенного в прямоугольном короткозамкнутом волноводе. Приведены результаты измерения зависимости импеданса от величины внешнего постоянного магнитного поля для прямоугольного анизотропного волновода. Проведено измерение импеданса в прямоугольном волноводе, в результате которого определены действительная и мнимая части импеданса при различных значениях магнитного поля. Изучено явление дисперсии и затухания волн, а также методы измерения параметров, характеризующих дисперсию и затухание в прямоугольном волноводе с анизотропным заполнением.

Анотація. Запропоновано метод визначення імпедансу в діапазоні надвисоких частот (НВЧ), що ґрунтується на вимірі комплексного коефіцієнта відбиття від зразка, розміщеного в прямокутному короткозамкнутому хвилеводі. Наведено результати вимірювання залежності імпедансу від величини зовнішнього постійного магнітного поля для прямокутного анізотропного хвилеводу. Проведено вимір імпедансу в прямокутному хвилеводі, в результаті якого визначені дійсна і уявна частини імпедансу за різних значень магнітного поля. Вивчено явище дисперсії і загасання хвиль, а також методи вимірювання параметрів, що характеризують дисперсію і загасання в прямокутному хвилеводі з анізотропним заповненням.

Annotation. The method of definition of impedance in a range microwave the frequencies, based on measurement of complex factor of reflection from the sample located in a rectangular short-circuited wave guide is offered. Results of measurement of dependence of impedance from singular an external constant magnetic field for a rectangular anisotropic wave guide are resulted. Impedance measurement in a rectangular wave guide in which result the valid and imaginary parts of an impedance are defined at various values of a magnetic field is spent. The phenomenon of a dispersion and attenuation of waves, and also methods of measurement of the parameters characterizing a dispersion and attenuation in a rectangular wave guide with anisotropic filling is studied.

Измерения дисперсии и затухания волн в СВЧ тракте прямоугольного волновода. На СВЧ диапазоне передача энергии по волноводу не может быть охарактеризована значением токов и напряжений. При прохождении волны по волноводу величины токов и напряжений зависят от точек измерений и не являются однозначными характеристиками. К

тому же нет надёжных способов, позволяющих измерить на таких частотах абсолютные значения напряжений и токов. Последнее относится и к измерению напряжённостей электрического и магнитного полей, которые являются, вообще говоря, более адекватными характеристиками волн в волноводах, чем токи и напряжения. Поэтому основной характеристикой в различных видах измерений чаще выступает величина мощности, переносимой волной, дисперсии и затухания. Другой характеристикой передающего тракта является его волновое сопротивление (полное сопротивление или импеданс), которое определяется как отношение поперечных компонент электрического и магнитных полей. Для неоднородного тракта сопротивление одинаково в любом поперечном сечении. Соотношение сопротивлений различных элементов тракта и включённых в него устройств определяет эффективность передачи энергии. Так, максимальная передача мощности имеет место только при равенстве волновых сопротивлений всех элементов; отличие в сопротивлениях приводит к возникновению отражений. Поскольку волновое сопротивление в общем случае зависит от частоты, отражение от различных элементов может также характеризоваться частотной зависимостью. Из сказанного выше вытекают и основные виды измерений, которыми являются измерение дисперсии и затухания волн и импеданса. Измерения сопротивления тонкой металлической проволоки при их нагреве за счёт поглощения СВЧ энергии используется в болометрических измерителях. Болометрические измерители, в которых применяются чувствительные мостовые схемы, рассчитаны обычно на измерения малых уровней мощности (микроватты, милливатты). Привлекательным качеством тепловых измерителей мощности является возможность их калибровки постоянным током или переменным током на низкой частоте, когда через термистор пропускают ток такой величины, чтобы измерение сопротивления этого элемента было равно изменению его сопротивления при поглощении СВЧ сигнала. При этом рассеянная мощность постоянного тока, которую определить легко, практически равна поглощённой мощности СВЧ. Для измерения относительных уровней мощности могут также использоваться детекторы, но в этом случае необходимо знать характер зависимости величины отклика от величины падающей мощности, т.е. детекторную характеристику.

Функциональная схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

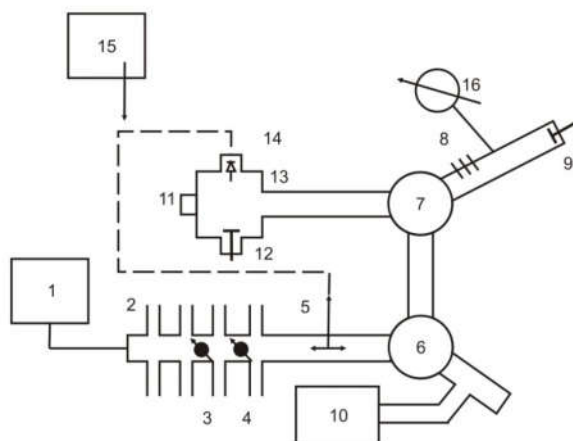


Рисунок 1 – Функциональная схема установки

Генератор СВЧ (1) работает в трёхсантиметровом диапазоне длин волн. Источником излучения в нем служит отражательный клистрон. Значение частоты генерации во всем интервале перестройки отражательного клистрона определяется по встроенному в генератор цифровому индикатору. Атенюаторы (3) и (4) используются по измерению затухания методом замещения и для изменения уровня мощности по определению характеристик детектора. Измерительная линия (5) используется для определения длины волны в волноводе и для измерения КСВ. Поскольку сигнал, снимаемый с зонда мал, измерения КСВ проводятся только в режиме амплитудной модуляции генератора СВЧ, что позволяет для определения величин

ны продетектированного сигнала, идущего от измерительной линии, пользоваться измерителем отношения напряжений (15), который предназначен для измерения отношения напряжений переменного тока, последовательно поступающих на его вход (например, при работе с измерительными линиями), а также для усиления малых напряжений переменного тока с возможностью цифровой индикации выходных сигналов в относительных единицах. При работе с измерительной линией он должен быть настроен на частоту модуляции СВЧ сигнала. Отсчет величины сигнала, поступающего на вход, производится по вольтметру измерителя отношения напряжений. С помощью волноводных переключателей (6) и (7) тракт, идущий от генератора, может либо замыкаться накоротко (для осуществления в основном тракте режима чисто стоячей волны), либо соединяться с различными элементами установки. Для измерения мощности, проходящей по основному тракту, используется измеритель мощности термисторного типа (10). Мощность измеряется в режиме непрерывной генерации. Детекторная секция (9) используется для определения относительного уровня мощности при калибровке аттенуатора, а также в упражнении по определению характеристик детектора. На выходе детектора расположен микроамперметр (16). Трехшлейфовый трансформатор полных сопротивлений (8), включенный в тракт перед детекторной секцией, служит для ее согласования с трактом. Двойной Т-мост (11) используется для измерений с реактивными нагрузками в плечах сравнения. Одна из них представляет собой отрезок волновода с перемещающимся коротко-замыкающим поршнем (12), другая - короткозамкнутый отрезок волновода фиксированной длины (13).

Для измерения длины волны в волноводе используется измерительная линия. Поставив волноводный переключатель (6) в положение, промежуточное между положениями, соединяющими основной тракт с переключателем (7) и измерителем мощности (10), получим короткозамкнутый волновод в котором устанавливается чисто стоячая волна. Перемещая каретку измерительной линии вдоль волновода и отсчитывая показания по измерителю отношения напряжений, можно построить график зависимости напряжения, снимаемого с детектора измерительной линии от координат вдоль оси волновода.

Явление затухания в передающих линиях выражается в экспоненциальном уменьшении амплитуды поля электромагнитной волны по мере прохождения ее вдоль линии передачи за счёт несовершенной проводимости поверхностей тракта передачи, потерь в диэлектрических элементах конструкции и т.п. Если отрезок СВЧ тракта, обладающий затуханием, достаточно однороден и коэффициентами отражения на входе и выходе его можно пренебречь, то для коэффициента передачи этого отрезка тракта длиной l справедливо следующее выражение:

$$\tau = e^{-\alpha l}, \quad (1)$$

где l – длина испытываемого отрезка СВЧ тракта; α – коэффициент затухания на единицу длины.

Если на конце отрезка такой линии передачи создать коэффициент отражения, равный 1, то по мере приближения к генератору (от точки отражения) он будет экспоненциально уменьшаться. Чтобы вычислить коэффициент затухания по величине измеренного коэффициента отражения, можно воспользоваться следующей формулой:

$$\alpha l = \operatorname{arctg} \frac{l}{k}, \quad (2)$$

где k – измеренное значение КСВ.

Для измерения затухания с помощью измерительной линии в волноводном тракте необходимо только короткозамыкатель. Испытуемый отрезок СВЧ тракта должен быть достаточно однороден, чтобы на его входе не появились отражения из-за местных неоднородностей. Методика измерения состоит в следующем: измеряется КСВ на входе испытываемого тракта при подключенном короткозамыкателе на его выходе и по величине этого КСВ рассчитывается затухание СВЧ тракта исследуемого волновода. Установка для снятия кривых

дисперсии и затухания волн в волновом тракте состоит из двух генераторов высокочастотных колебаний, измерительной линии, измерительного усилителя и исследуемого прямоугольного волновода типа с размерами поперечного сечения $a \times b = 72,14 \times 34,04$ мм со сплошным анизотропным заполнением длиной $l = 3$ м, замкнутого на конце металлической заглушкой.

Необходимые формулы для проведения эксперимента следующие:

$$l_{1,2} = \frac{z_1 + z_2}{2}, \quad (3)$$

где $l_{1,2}$ – соответствующие длины каретки, z – поперечное расстояние между отверстиями;

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (4)$$

λ – длина волны,

$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_a \cdot \mu_a}}$ – скорость волны, свободно распространяющейся в безграничной среде;

$$\Delta = 2(l_{2\min} - l_{1\min}), \quad (5)$$

Δ – шаг отверстий в волноводе (продольное расстояние);

$$E_{AB} = \frac{\pi \cdot \Delta z}{\Delta}, \quad (6)$$

E_{AB} – напряжённости между точками А и В.

На основе полученных результатов построены дисперсионная зависимость (рис. 2) и зависимость затухания в СВЧ тракте (рис. 3) данных устройств.

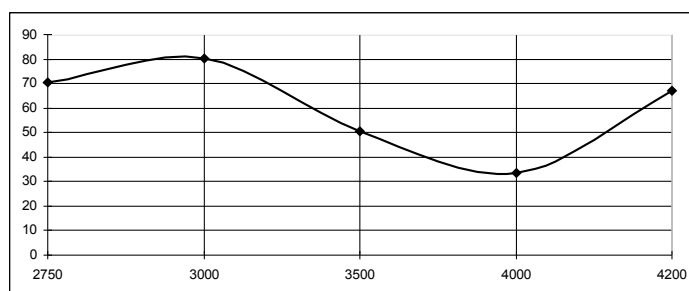


Рисунок 2 – Дисперсионная зависимость

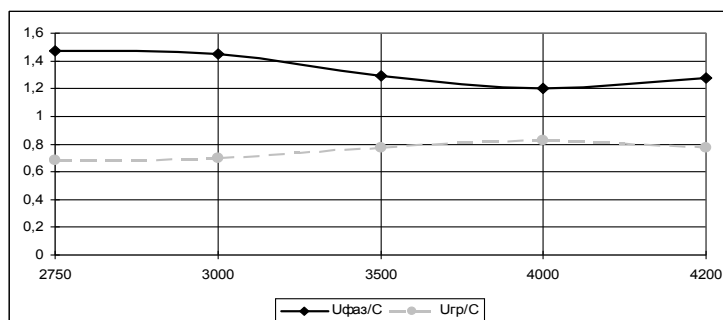


Рисунок 3 – Зависимость затухания в СВЧ тракте

Измерение полного сопротивления в прямоугольном волноводе. В диапазоне сверхвысоких частот измерения полного сопротивления обычно проводятся с использовани-

ем измерительных линий. Полное сопротивление – импеданс, вычисляется в квазистатическом приближении по измеренному с помощью векторного анализатора цепей комплексному коэффициенту отражения R [1]. Требование выполнения условий квазистатики приводит к тому, что для частот порядка нескольких гигагерцах длина образцов не должна превышать 12 мм, что затрудняет их размещение в коаксиальной измерительной ячейке. В [2] предложен волноводный метод измерения импеданса, основанный на измерении с помощью скалярного анализатора цепей модулей коэффициентов отражения. Модуль R составляет при этом порядка нескольких процентов и сравним с собственным коэффициентом отражения согласованной нагрузки, что приводит к большой относительной погрешности измерения R и соответственно его импеданса. Метод реализован на измерительной установке, изображённой на рис. 4. Установка состоит из генератора качающейся частоты, двух одинаковых волноводных секций $S1, S2$ сечением $23 \text{ мм} \times 10 \text{ мм}$ и длиной $0,425 \text{ м}$, снабжённых направленными ответвителями и разделённых симметричной индуктивной диафрагмой толщиной $0,1 \text{ мм}$ с раскрытием окна 9 мм , держателя образца, состоящего из двух коротких волноводных секций $D1, D2$ длиной соответственно $4,06$ и $4,76 \text{ мм}$, и коротко замкнутой секции $S3$ длиной $10,02 \text{ мм}$. В держателе расположен нормально широкой стенке волновода на расстоянии $x_0 = 11,5 \text{ мм}$ от узкой стенки. Непосредственно измеряемой величиной является многорезонансная зависимость $P(\omega) = V_2/V_1$, где V_1, V_2 – сигналы, снимаемые со скалярных детекторов направленных ответвителей. Обработка функции методом, изложенным в [3], позволяет определить коэффициент отражения R . В держатель образец позиционируется в положении x_0 с помощью насечек на секции $D1$, после чего секции $D1, D2$ стягиваются винтами. При этом стеклянная оболочка раздавливается и обеспечивается его электрический контакт с волноводом.

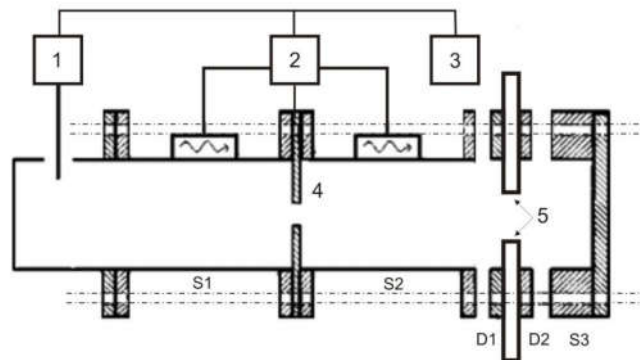


Рисунок 4 – Установка для измерения импеданса (1 – генератор качающейся частоты, 2 – скалярный анализатор цепей, 3 – компьютер, 4 – диафрагма, 5 – волновод)

Измерения импеданса проводились при наложении вдоль оси провода внешнего постоянного магнитного поля с напряжённостью H , создаваемого электромагнитом. Для решения задачи рассеяния в короткозамкнутом прямоугольном волноводе применён подход, аналогичный [4]. При выборе временного множителя в виде $\exp(+i\omega t)$ коэффициент отражения R в плоскости имеет вид

$$R = -e^{2i\Gamma_i} - \frac{2(1 - e^{2i\Gamma_i})^2 \sin^2 \frac{\pi x_0}{a}}{2a\Gamma_1 Z + 2F(r) - F(2l+r) - (2l-r)\omega\mu_0}; \quad (7)$$

$$F(s) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{Q_1}{Q_n} \sin^2 \frac{n\pi}{a} x_0 \exp(iQ_n S),$$

где Q_n – постоянная распространения волны типа H_{m0} , a – размер широкой стенки волновода, $r = d/2$, d – диаметр провода, l – расстояние от провода до закоротки, $i = \sqrt{-1}$, μ_0 – магнитная проницаемость среды, Z – импеданс. Абсолютная погрешность вычисления R

по формуле (7) оценивается аналогично [4, 5] и по порядку величины равна $(d/\lambda)^2$, где λ – длина волны в волноводе. Таким образом, при значениях $d \sim 10$ мкм, $\lambda \sim 1$ см относительная погрешность имеет порядок 10^{-6} . Формула (7) использовалась для определения величины Z по измеренным значениям R . С целью улучшения сходимости ряда $F(S)$ из него выделялась и аналитически суммировалась главная часть. Относительные погрешности ΔZ для величин X и Y определялись путём внесения в измеренные значения R образца абсолютных погрешностей $\Delta|R| = 0,01$ и $\Delta \arg R = 1^\circ$ для модуля и фазы R , которые соответствуют точности много-резонансного метода измерения R [4] и точности современных векторных анализаторов цепей. Величина погрешности ΔZ не превышает 5 %.

Таким образом, предложенный волноводный метод измерения импеданса в диапазоне сверхвысоких частот более прост экспериментально и является более точным по сравнению с известными методами. Точность измерения импеданса практически полностью определяется только точностью измерения комплексного коэффициента отражения в волноводе, поскольку при выводе формул (7) не используется квазистатическое приближение. При использовании современной техники при измерении R относительная погрешность измерения импеданса не превышает 0,05.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложен метод определения импеданса в диапазоне сверхвысоких частот, основывающийся на измерении комплексного коэффициента отражения от образца, расположенного в прямоугольном короткозамкнутом волноводе. Приведены результаты измерения зависимости импеданса от величины внешнего постоянного магнитного поля для прямоугольного анизотропного волновода. Проведено измерение импеданса в прямоугольном волноводе, в результате которого определены действительная и мнимая части импеданса при различных значениях магнитного поля.

2. Изучено явление дисперсии и затухания волн, а также методы измерения параметров, характеризующих дисперсию и затухание в прямоугольном волноводе с анизотропным заполнением.

3. Проведена оценка погрешностей параметров СВЧ тракта анизотропного волновода, которые является вполне удовлетворительным для практики.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ. Москва: Высшая школа, т. 1., 1970, 439 с.
2. Пономаренко В.И., Попов В.В. Приборы и техника эксперимента. 2005, № 1, с. 94–100.
3. Распространение электромагнитных волн в неоднородных волноводных системах. Москва: ДГУ, 1987, 83 с.
4. Yu M. Y., Shukla P. K., El-Nadi A. Linear and nonlinear instabilities of the electron convection mode // Phys. Rev. A: I. Phys, 1985. Vol. 32, № 1, p. 613–616.
5. Исламов И. Дж. Математические модели затухания при распространении электромагнитных волн в средах с конечной проводимостью. Изв. НАН Азерб. Серия физико-мат. и тех. наук. Изд. «Элм», Баку, 2005.

REFERENCES:

1. Lebedev, I. V. *Machinery and Microwave Devices*. Moscow: n.p., 1970. Print. Ser. 1.
2. Ponomarenko, V. I., and V. V. Popov. "Machinery and Microwave Devices" 1 (2005): 94–100. Print.
3. *The Propagation of Electromagnetic Waves in Inhomogeneous Waveguide Systems*. Moscow: n.p., 1987. Print.
4. Yu, M. Y., P. K. Shukla, and A. El-Nadi. "Phys. Rev. A: I. Phys." *Linear and Nonlinear Instabilities of the Electron Convection Mode* 32.1 (1985): 613–16. Print.
5. Islamov, I. *Mathematical Models of Attenuation in the Propagation of Electromagnetic Waves in a Medium with Finite Conductivity*. Baku: n.p., 2005. Print.