

МИРОШНИК М. А., д-р техн. наук, проф. (УкрГУЖТ),
ЗАЙЧЕНКО Н. Я., студ. гр. РЕА-13-1 (ХНУРЕ)

Погрешность рассогласования микроволнового ваттметра на основе поглощающей стенки

В статье рассмотрена связь между погрешностью рассогласования и уравнением теплопроводности поглощающей стенки. Дано аналитическое описание и проведено моделирование распределения электромагнитной и тепловой стоячей волны в волноводе для КСВН=1,5. В результате моделирования получено, что разность между максимальным и минимальным значением погрешности рассогласования в 3 раза меньше для предложенной модели, чем для традиционной.

Ключевые слова: СВЧ, тепловое поле, первичный преобразователь, уравнение теплопроводности, прямоугольные координаты, теорема о среднем значении функции на отрезке, функция Грина, погрешность рассогласования.

Введение

Современные темпы развития техники сверхвысоких частот (СВЧ) и ее прикладных областей, таких как радиолокация, радиовещание, телевидение, телеметрическая связь, радиоастрономия, радиоспектроскопия, ядерная физика и др., предъявляют высокие требования к метрологическому обеспечению. В настоящее время совершенствование методов измерений и, соответственно, радиоизмерительных приборов направлено на повышение точности и надежности, миниатюризацию, расширение частотных и динамических диапазонов. Несмотря на достигнутые успехи в области метрологического обеспечения СВЧ-устройств, поиск новых методов измерения по-прежнему остается актуальным [1].

Анализ публикаций и постановка задачи исследования

Последние публикации относятся к разработке теплового сканера для исследования электромагнитного поля в волноводной линии передачи. В статье [1] приведено описание устройства, позволяющего проводить исследования электромагнитного поля вдоль волноводной линии передачи прямоугольного сечения посредством оценки распределения температуры на участке широкой стенки волновода. Таким образом, данное исследование связано с важной практической задачей измерения мощности СВЧ-сигнала и тепловой сканер является частью ваттметра СВЧ.

В свою очередь основным элементом теплового сканера является поглощающая стенка. Участок стенки волновода, материал которого имеет меньшую удельную электропроводность, чем материал основного тракта, называют поглощающей стенкой. Толщина поглощающей стенки значительно меньше толщины стенки основного тракта, но больше нескольких толщин скин-слоя, чтобы прохождение волны сквозь нее было пренебрежимо малым. Теория такого рода устройств достаточно подробно рассмотрена в [2, 3]. В частности указывается, что этот метод предназначен для относительно согласованных трактов, потому что в СВЧ-тракте из-за рассогласования нагрузки образуется стоячая волна

$$P = P_{nao}(1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos(2\gamma z + \varphi)), \quad (1)$$

где Γ – модуль коэффициента отражения нагрузки, φ – фаза коэффициента отражения нагрузки, P_{nao} – падающая мощность, P – значение поля в произвольной точке, z – координата в направлении переноса энергии, $\gamma = \frac{2\pi}{\lambda_g}$ – постоянная распространения, λ_g – длина волны в волноводе, которая приводит к существенному уменьшению точности измерений.

Недостатком универсальной модели погрешности рассогласования [2] является то, что она не учитывает принцип действия конкретного датчика. Для СВЧ-диапазона могут применяться первичные преобразователи с разными принципами действия, в том числе и не тепловыми, например, диодные, гальваномагнитные на нормальном и аномальном эффекте Холла, ферритовые, пондеромоторные и др.,

но наиболее распространенными и серийно выпускаемыми являются первичные преобразователи с тепловым принципом действия, то есть термисторы, болометры, термопары. Поглощающая стенка относится к тепловым датчикам. В ней стоячая электромагнитная волна трансформируется в тепловую стоячую волну, которая в свою очередь приводит к возникновению термоЭДС в термоэлектрическом преобразователе, приложенном к поглощающей стенке с её наружной стороны.

Поскольку ваттметр с тепловым сканером является измерительным прибором, а для измерительного прибора важны метрологические характеристики, то с целью оценки точности измерений необходимо тщательно исследовать физические явления, приводящие к СВЧ-нагреву, исследовать влияние на нагрев поглощающей стенки характеристик электромагнитной волны, которая находится внутри волноводного тракта, на котором размещена поглощающая стенка. Для этого необходимо усовершенствовать физико-математическую модель, приведенную в [3], которая представляется уравнением теплопроводности с нулевыми граничными условиями.

Целью статьи является повышение точности измерений за счет анализа и учета связей между погрешностью рассогласования и физико-математической моделью поглощающей стенки.

Модель распределения тепловой стоячей волны одномерной поглощающей стенки как решение уравнения теплопроводности с помощью функции Грина, представленной в виде рядов по собственным функциям

Как известно [3], согласно закону сохранения энергии внутри элементарного объема поглощающей стенки аккумулируется некоторое количество тепла пропорциональное коэффициенту теплоемкости C и массе, а также, по закону Фурье, через замкнутую поверхность в перпендикулярном к ней направлении вытекает количество тепла, пропорциональное коэффициенту теплопроводности K и скорости потока тепла, третье слагаемое в уравнении теплового баланса представляет, по закону Ньютона-Рихмана, тепло, уходящее из элементарного объема за счет теплообмена с окружающей средой путем конвективно-кондуктивного теплообмена, характеризующееся коэффициентом теплообмена α . В установившемся состоянии не рассматривается временная зависимость и слагаемое, пропорциональное теплоемкости C , отсутствует [8].

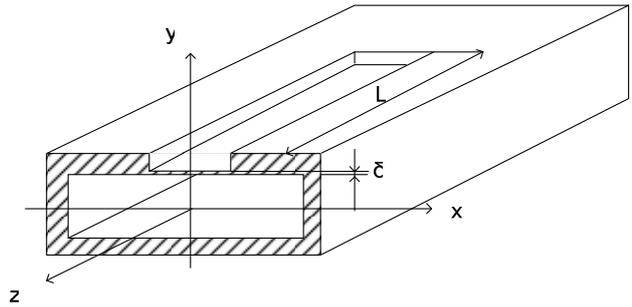


Рис. 1. Поглощающая стенка в волноводе для прямоугольной системы координат

В используемой далее декартовой системе координат уравнение теплопроводности, которое описывает преобразование электромагнитного поля внутри волновода в температуру,

$$\pm \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{2\alpha^2}{K\delta} T = -\frac{I}{K\delta}, \quad (2)$$

где α – коэффициент теплообмена; K – коэффициент теплопроводности; δ – толщина поглощающей стенки; I – поверхностная плотность мощности на участке широкой стенки волновода.

Выражение для тепловых источников на широкой стенке волновода [1, 3]

$$I = N_1 \cdot F, \quad (3)$$

где N_1 – коэффициент пропорциональности; распределение тепловых источников, повторяющее распределение стоячей волны (1), что доказано в [3]

$$F = 1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos(2\gamma z + \varphi). \quad (4)$$

Поглощающая стенка греется сильнее в максимуме стоячей волны и образуется тепловой поток, текущий от мест с большей температурой в места с меньшей температурой. Место расположения максимума стоячей волны коэффициента отражения нагрузки заранее до измерений неизвестно.

Построение математической модели начинается с задания системы координат (рис.1), в данном случае используется прямоугольная система координат. Тепловой поток может как совпадать с направлением осей координат, так и быть направленным противоположно. А в уравнении теплопроводности (2) знак перед первым слагаемым правой части может быть различным. При знаке «минус» перед первым слагаемым выражения (2) можно использовать представление решения уравнения теплопроводности с помощью функции Грина [5]

$$G(z, s) = \frac{2}{L} \sum_{n=0}^{\infty} \sin\left(\frac{\pi n}{L} s\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi n}{L} z\right), \quad (5)$$

то есть в виде бесконечных рядов по собственным функциям. Бесконечный ряд заменяется конечным с количеством элементов, обеспечивающим заданную точность.

От уравнения в частных производных (5) можно перейти к интегральным уравнениям [4].

$$T(z) = \int_0^L G(z, s) f(s) ds, \quad (6)$$

где $G(z, s)$ – функция Грина, $f(s) = -\frac{I}{K\delta}$ – правая часть уравнения теплопроводности.

Тогда выражение (6) с учетом выражений (5) и (4) примет вид

$$T(z) = \int_0^L G(z, s) f(s) ds = \int_0^L \left(\frac{2}{L} \sum_{n=0}^{\infty} \sin\left(\frac{\pi n}{L} s\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi n}{L} z\right) \right) \cdot (1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos(2\gamma z + \varphi)) ds, \quad (7)$$

Выражение (7) показывает распределение температуры по поглощающей стенке при данном распределении стоячей электромагнитной волны. Сравнение двух распределений показывает их идентичность с некоторым коэффициентом подобия.

Погрешность рассогласования с учетом теплового принципа действия первичного преобразователя в виде поглощающей стенки

Метрологической характеристикой точности измерений в рассогласованном тракте является

$$P_{cp} = \frac{N_2}{z_2 - z_1} \int_{z_1}^{z_2} \int_0^L \left(\frac{2}{L} \sum_{n=0}^{\infty} \sin\left(\frac{\pi n}{L} s\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi n}{L} z\right) \right) \cdot (1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos(2\gamma z + \varphi)) ds, \quad (11)$$

где N_2 – коэффициент пропорциональности, учитывающий преобразование температуры (неэлектрической величины), поглощающей стенки в термоЭДС на термоэлектрическом преобразователе в

погрешность рассогласования, которая показывает, насколько измеренная усредненная мощность СВЧ

$$P_{cp} = P_{nad} \left(1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos(2\gamma(z_2 + z_1) + \varphi) \frac{\sin \gamma(z_2 - z_1)}{\gamma(z_2 - z_1)} \right) = \frac{1}{z_2 - z_1} \int_{z_1}^{z_2} (1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos(2\gamma z + \varphi)) dz, \quad (8)$$

и представляет собой теорему о среднем значении функции на отрезке.

Выражение для усредненной на поглощающей стенке мощности (8) отличается от определения проходящей мощности СВЧ, т.е.

$$P_{np} = P_{nad} (1 - \Gamma^2). \quad (9)$$

Для описания погрешности рассогласования используется выражение [2], представляющее собой относительную погрешность

$$\delta_{racc} = \frac{P_{nad} \left(1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos(2\gamma(z_2 + z_1) + \varphi) \frac{\sin \gamma(z_2 - z_1)}{\gamma(z_2 - z_1)} \right)}{P_{nad} (1 - \Gamma^2)} - 1 = \frac{P_{nad} \frac{1}{z_2 - z_1} \int_{z_1}^{z_2} (1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos(2\gamma z + \varphi)) dz}{P_{nad} (1 - \Gamma^2)} - 1, \quad (10)$$

Подставим в выражение (10) под знак интеграла решение уравнения теплопроводности из выражения (7) и получим для средней мощности

$$\delta_{racc} = \frac{N_2}{z_2 - z_1} \int_{z_1}^{z_2} \int_0^L \left(\frac{2}{L} \sum_{n=0}^{\infty} \sin\left(\frac{\pi n}{L} s\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi n}{L} z\right) \right) \cdot (1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos(2\gamma z + \varphi)) ds}{P_{nad} (1 - \Gamma^2)} - 1. \quad (12)$$

Точность результатов измерений при последующей обработке повышают путем умножения результатов измерений на корректирующий множитель, рассчитываемый исходя из данной погрешности рассогласования

$$k = \frac{1}{1 + \delta_{\text{расс}}} \quad (13)$$

При тестировании предложенной модели на числовых значениях и нахождении погрешности рассогласования используем методы вычислительной математики [6, 7] и промоделируем зависимость погрешности рассогласования от фазы коэффициента отражения нагрузки.

Получились следующие результаты (рис. 2).

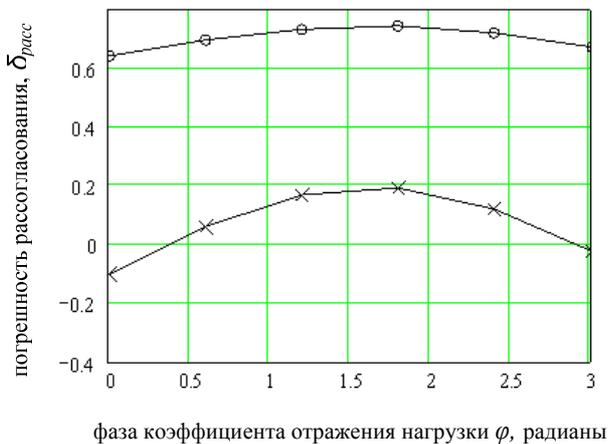


Рис. 2. Зависимость погрешности рассогласования от фазы стоячей волны:

××× — для электромагнитной стоячей волны,
 ○○○ — для тепловой стоячей волны

Абсолютное значение погрешности рассогласования, полученное с предложенной моделью, получилось больше, чем для традиционной. Для минимального значения $\delta_{\text{расс.min}}$, при фазе коэффициента отражения нагрузки $\varphi = 0$ радиан для традиционной модели оно составляет $-0,10$, а для второй модели $-0,64$, для максимального значения, которое наблюдается при фазе коэффициента отражения нагрузки $\varphi = 1,5$ радиан $\delta_{\text{расс.max}}$ равняется $0,19$ для традиционной модели, а для предлагаемой модели равняется $0,74$.

Однако разность максимального и минимального значения погрешности рассогласования $\Delta = \delta_{\text{расс.max}} - \delta_{\text{расс.min}}$ для предложенной модели

меньше почти в 3 раза, а именно, $\Delta = 0,098$ для предложенной модели и $\Delta = 0,29$ для традиционной модели. Выражение (13) даст значение поправочного коэффициента [10], на который надо умножить результат измерений. Соответственно, использование поправочного коэффициента в 3 раза эффективнее для предложенной модели, чем для традиционной. Погрешности рассогласования рассчитывались при среднерассогласованном тракте, т.е. модуль коэффициента отражения $0,2$, что соответствует коэффициенту стоячей волны КСВН=1,5 и при самых неблагоприятных фазовых соотношениях.

Выводы

В ходе исследования, которому посвящена данная статья, была усовершенствована физико-математическая модель поглощающей стенки на основе решения уравнения теплопроводности. Предложенная модель отличается, с одной стороны, универсальностью разложения в ряд по собственным функциям функции Грина, с другой стороны, она адекватна только при определенных координатах положения максимума стоячей волны и направлении теплового потока в поглощающей стенке, которое представлено в уравнении теплопроводности знаком при первом слагаемом, в противном случае возникает погрешность от неадекватности модели.

Кроме того, усовершенствована метрологическая модель погрешности рассогласования и метод ее оценки. Данная модель отличается учетом принципа действия первичного преобразователя, который заключается в двойной трансформации стоячей волны в тепловую стоячую волну и затем в напряжение на термопаре. Поскольку причиной возникновения стоячей волны является неизвестная фаза коэффициента отражения нагрузки СВЧ-тракта, но в то же время именно фаза нагрузки определяет положение подвижного максимума стоячей волны относительно неподвижной поглощающей стенки, то погрешность неадекватности модели при решении уравнения теплопроводности можно отнести на счет погрешности рассогласования, и затем оценить ее значение и скомпенсировать результат через поправочный множитель. В результате более точной физико-математической модели достигается поставленная цель повышения точности измерений.

В качестве перспективных направлений исследования можно указать переход от одномерной модели к двухмерной модели, а также анализ других конструкций первичных преобразователей, например, первичных преобразователей в форме диска или многоэлементных преобразователей [11].

Список использованных источников

1. Кузнецов, В. Н. Разработка теплового сканера для исследования электромагнитного поля в волноводной линии передачи [Текст] / В.Н. Кузнецов, А.С. Гранкин // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2012. – Т. 55. – №. 1. – С. 62–67.
2. Измерение мощности на СВЧ [Текст] / М. И. Билько [и др.]. – М.: Радио и связь – 1976. – 168 с.
3. Волков, В. М. Проектирование средств измерения проходящей мощности [Текст] / В.М. Волков. – Харьков: ХТУРЭ, 2000. – 158 с.
4. Смирнов, В. И. Курс высшей математики [Текст] / В.И. Смирнов. – 6-е изд. – М.: Наука, 1981. – 551 с.
5. Тихонов, А. Н. Уравнения математической физики [Текст]: учебн. пособие для вузов / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. – 5-е изд., стереотип. – М.: Наука, 1977. – 735 с.
6. Поршнев, С. В. Вычислительная математика [Текст]: курс лекций / С. В. Поршнев. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 320 с.
7. Беленкова, И. Численные методы на базе Mathcad [Текст] / И. Беленкова, С. В. Поршнев. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 464 с.
8. Зайченко, О. Б. Влияние параметров первичного преобразователя на основе поглощающей стенки на точность измерения параметров СВЧ сигналов и трактов [Текст] / О.Б.Зайченко, Л.Г. Мартыненко // Радиотехника: всеукр. межвед. научн.-техн. сб. – 2011. – Вып.167. – С. 14–18.
9. Волков, В. М. Метрологические характеристики многозондовых микроволновых мультиметров [Текст] / В.М. Волков, О.Б. Зайченко, А.В. Огуй // Радиоэлектроника и информатика: научно-техн. журнал. – 2000. – №4(13). – С. 15–18.
10. Мирошник, М. А. Калибратор для многозондового микроволнового мультиметра [Текст] / М.А. Мирошник, Р.И. Цехмистро, О.Б. Зайченко // Системи обробки інформації: зб. наук. праць. – Харків: Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, 2014. – Вип. 5(121). – С. 74-76.
11. Спосіб вимірювання параметрів сигналів і трактів НВЧ [Текст]: пат. 113161 Україна: МПК51 G01R21/04(2006.01), G01R27/06(2006.01) / Мирошник М.А., Зайченко О.Б., Ключник І.І. / заявник та патентотримач Харківський національний університет радіоелектроніки № u201608483; заявл. 01.08.16; опубл. 10.01.17, Бюл. №1. – 3 с.

Мірошник М.А., Зайченко Н.Я. Похибка неузгодженості мікрохвильового ватметра на основі поглинаючої стінки. У статті розглянуто зв'язок між похибкою неузгодженості і рівнянням теплопровідності поглинаючої стінки. Надано

аналітичний опис і проведено моделювання розподілу електромагнітної і теплової стоячої хвилі у хвилеводі для КСХН = 1,5. В результаті моделювання отримано, що різниця між максимальним і мінімальним значенням похибки неузгодженості в 3 рази менше для запропонованої моделі, ніж для традиційної.

Ключові слова: НВЧ, теплове поле, первинний перетворювач, рівняння теплопровідності, прямокутні координати, теорема про середнє значення функції на відрізьку, функція Гріна, похибка неузгодженості.

Miroschnik M.A., Zaichenko N.Y. Microwave powermeter on the basis of the absorbing wall mismatch error. The article considers the relationships between mismatch error and the physical and mathematical model of the absorbing wall. Physical and mathematical model is represented by the heat equation with zero boundary conditions. Since the direction of heat flow in the absorbing wall may vary depending on the position of the temperature maximum, which in turn depends on the phase of the load reflection coefficient, the sign in the heat equation with the term describes the thermal conductivity may be different due to same direction of coordinate axis and heat flow or not. Changing the sign of the term leads to the fact that the representation of the solution of Green's function in the form of an infinite series of eigenfunctions in half of the cases does not match the type of equation. An analytical description and the simulation of electromagnetic and thermal distribution of a standing wave in the waveguide for VSWR = 1.5 is given in the article. As result of simulation there was proved that although the absolute value of the mismatch error for the proposed model is more than one for traditional model, but the difference between the maximum and minimum value mismatch error is less than 3 times, then when measurement results is multiplied by a correction factor it is possible to get more precise final value.

Keywords: microwave, thermal field transducer, the heat equation, rectangular coordinates, the mean value theorem on the interval function, Green's function, the mismatch error.

Поступила 30.01.2017 г.

Мірошник М.А., д.т.н., професор кафедри СКС, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна.

Зайченко Н.Я., студ. гр. РЕА-13-1, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна.

Miroshnyk M.A., doctor of technical science, professor, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine.

Zaichenko N.Y., student REA-13-1, Kharkov National University of Radioelectronics, Kharkiv, Ukraine.