

ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ КВАЗИТОЧЕЧНОГО ДАТЧИКА ПРОХОДЯЩЕЙ МОЩНОСТИ СВЧ НА ОСНОВЕ ПОГЛОЩАЮЩЕЙ СТЕНКИ

В последние годы стал актуальным вопрос о контроле передающих СВЧ трактов с большими и сверхбольшими уровнями мощности. Это касается установок СВЧ нагрева, ускорителей заряженных частиц, локационных, навигационных и связных станций, различных испытательных стендов. Прежде всего в связи с ростом уровня мощности возросли требования к датчикам по электрической и тепловой прочности, стабильности, частотному и динамическому диапазонах коэффициента преобразования, быстродействию. Применение традиционных методов и средств измерения стало затруднительным, а зачастую и невозможным потому, что используемые датчики или их элементы связи в большинстве своем снижают электрическую или тепловую точность волновода. В таких условиях предпочтительным является метод поглощающей стенки (ПС), суть которого заключается в изучении распределения температуры на поверхности тонкостенного участка волновода, которая адекватна распределению мощности внутри него. По значениям температуры на поверхности стенки, полученных при помощи подвижных или дискретных неподвижных термопреобразователей, по ее геометрическим, электрическим и теплофизическим параметрам можно определить падающую, отраженную и проходящую в реальную нагрузку мощность, модуль и фазу коэффициента отражения, длину волны, наличие внеполосных составляющих в спектре сигнала.

До последнего времени широкому использованию этого метода препятствовали трудности, связанные со сложной технологией изготовления ПС, плохими частотными свойствами, плохим быстродействием.

В статье рассматривается методика расчета температурного поля датчика нового типа, предложенного автором, практически лишенного отмеченных недостатков, обеспечивающего взаимозаменяемость, высокую точность и надежность во всем диапазоне СВЧ [1].

Разработанный датчик представляет собой цилиндрический полый корпус, который ввинчивается в стенку волновода таким образом, что его торец с напаянной на него поглощающей стенкой находится заподлицо с внутренней поверхностью полости волновода, не внося, соответственно, неоднородностей в передающий тракт. Поглощающая стенка представляет собой тонкую стенку из константана, нихрома, никеля, а при очень больших мощностях в волноводе из меди или латуни. Внутри цилиндрического корпуса на внешнюю по отношению к поверхности волновода поверхность устанавливается батарея пленочных термопар в форме окружности, горячие спаи которых расположены в области центра окружности, а холодные – в области ее периферии.

Рассмотрим задачу о значении установившейся температуры поглощающей стенки круглой формы. Она состоит в решении стационарного уравнения теплопроводности, учитывающего теплообмен с окружающей средой:

$$\Delta T - T\gamma = -\frac{I}{K\delta}, \quad (1)$$

где Δ – оператор Лапласа; I – поверхностная плотность СВЧ мощности на стенке; T – приращение температуры относительно границы диска; K – коэффициент теплопроводности материала стенки.

$$\gamma^2 = 2\alpha/K\delta, \quad (2)$$

где α – коэффициент теплообмена; δ – толщина стенки.

В качестве граничного условия примем, что приращение температуры на границе равно нулю.

На практике датчик в форме круглого диска может быть расположен в широкой или узкой стенке прямоугольного волновода.

Поверхностная плотность мощности вычисляется по формуле [2]

$$I = \frac{1}{2} R_s |H_{tg}|^2, \quad (3)$$

где H_{tg} – тангенциальная составляющая магнитного поля на поверхности стенки; $R_s = \sqrt{\omega\mu_0/2\tau}$ – поверхностное сопротивление; μ – проводимость материала стенки.

Подставив в формулу (3) выражения для магнитного поля в прямоугольном волноводе, найдем, что на узкой стенке поверхностная плотность мощности распределяется по следующему закону [3]:

$$I_y(y, z) = N_1 F^+(z) \cos^2(K_y y) + N_2 F^-(z) \sin^2(K_y y), \quad (4)$$

где $F^+(z) = 1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos(2K_z z + \varphi_0)$; $F^-(z) = 1 + \Gamma^2 - 2\Gamma \cos(2K_z z + \varphi_0)$; $N_1^H = H_0^2 / 2\sigma\Delta$; $N_2^H = H_0^2 / 2\sigma\Delta \left(K_z \left(K_y / K_{\perp}^2 \right) \right)^2$; $N_1^E = 0$; $N_2^E = E_0^2 / 2\sigma\Delta \left(\left(K_z / Z^E \right) \left(K_x / K_{\perp}^2 \right) \right)^2$; $K_x = m\pi/a$; $K_y = n\pi/b$; $K_{\perp}^2 = K_x^2 + K_y^2$; $K_z^2 = K_0^2 - K_{\perp}^2 = 2\pi/b\lambda$; $K_0 = 2\pi/\lambda$; $Z^E = Z_0 \sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{кр})^2}$; $\lambda_{кр} = 2/\sqrt{(m/a)^2 + (n/b)^2}$; $\Delta = \sqrt{2/\omega\mu_0\sigma}$ – глубина скин-слоя; Γ , φ_0 – модуль и фаза коэффициента отражения нагрузки; a и b – размеры широкой и узкой стенок волновода (ось x направлена вдоль широкой стенки, ось y – вдоль узкой стенки, ось z – вдоль волновода); λ , λ_b , $\lambda_{кр}$ – длина волны в свободном пространстве, в волноводе и критическая соответственно; z_0 – волновое сопротивление свободного пространства; m и n – индексы моды волны, распространяющейся в волноводе; E и H – индексы, указывающие на тип волны; E_0 и H_0 – амплитуды электрического и магнитного полей.

С переносимой по волноводу мощностью P E_0 и H_0 связаны следующими отношениями:

$$E_0^2 = \frac{8z_0 P}{abz_0 \sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{кр})^2}} \left(\lambda/\lambda_{кр} \right)^2, \quad H_0^2 = \frac{4(2 - \delta_{m_0} - \delta_{n_0}) P}{abz_0 \sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{кр})^2}} \left(\lambda/\lambda_{кр} \right)^2,$$

где δ_{m_0} и δ_{n_0} – символы Кронекера.

Для широкой стенки закон распределения поверхностной плотности мощности выглядит так:

$$I_u(x, z) = N_3 F^+(z) \cos^2 K_x x + N_4 F^-(z) \sin^2 K_x x, \quad (5)$$

где $N_3^H = H_0^2 / 2\sigma\Delta$; $N_4^H = H_0^2 / 2\sigma\Delta \left(K_z \left(K_x / K_{\perp}^2 \right) \right)^2$; $N_3^E = 0$; $N_4^E = E_0^2 / 2\sigma\Delta \left(\left(K_z / Z^E \right) \left(K_y / K_{\perp}^2 \right) \right)^2$.

Определенная трудность решения уравнения (1) при виде его правой части, определяющейся формулами (4) и (5), состоит в том, что поглощающая стенка – это круг, а $I_u(x, z)$ и $I_y(y, z)$ записаны в прямоугольных координатах. Следовательно, целесообразно использовать один из численных методов, например, метод сеток. Сетку из радиусов и окружностей при этом применять неразумно, так как невозможно задать граничное условие в центре круга, – ведь значение температуры и ее производной там неизвестны. Поэтому используем стенку в виде прямоугольника. Уравнение (1) для широкой стенки запишем в декартовых координатах:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \gamma^2 T = - \frac{I_u(x, z)}{K\delta}. \quad (6)$$

Для узкой стенки вид уравнения будет тем же, лишь производная $\partial^2 T / \partial x^2$ заменяется на $\partial^2 T / \partial y^2$, а $I_u(x, z)$ на $I_y(y, z)$.

Производные в уравнении (6) представим в виде конечных разностей:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{T_{i+1,j} - 2T_{i,j} + T_{i-1,j}}{h_x^2}, \quad \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{T_{i,j+1} - 2T_{i,j} + T_{i,j-1}}{h_z^2},$$

где i и j – номера узлов сеток вдоль осей x и z соответственно, h_x, h_z – шаги сетки вдоль этих осей. Производные вычисляются для узла с индексами i и j .

Подстановка этих формул в выражение (6) дает:

$$\frac{T_{i-1,j} + T_{i+1,j}}{h_x^2} + \frac{T_{i,j-1} + T_{i,j+1}}{h_z^2} - \left[\gamma^2 + 2 \left(\frac{1}{h_x^2} + \frac{1}{h_z^2} \right) \right] T_{i,j} = - \frac{I_{i,j}}{K\delta}, \quad (7)$$

где $I_{i,j}$ – значение функции $I_{in}(x, z)$ в узле с индексами i и j .

Выражение (7) представляет собой систему линейных уравнений, решением которой являются значения температуры в узлах стенки. Для ее решения удобно использовать метод последовательных приближений, из чего следует

$$T_{i,j} = \frac{1}{\gamma^2 + 2 \left(\frac{1}{h_x^2} + \frac{1}{h_z^2} \right)} \left(\frac{T_{i-1,j} + T_{i+1,j}}{2} + \frac{T_{i,j-1} + T_{i,j+1}}{2} + \frac{I_{i,j}}{K\delta} \right). \quad (8)$$

Начальное значение температуры, например $T = 0$, подставляется в правую часть выражения (8), и находится первое приближение решения. Полученный массив значений $T_{i,j}$ снова подставляется в правую часть выражения (8), находится следующее приближение, и так до тех пор, пока разница между двумя последовательными приближениями не станет меньше заданной погрешности решения.

Чтобы использовать значения температуры на окружности диска, используем прямоугольную сетку, у которой шаг может меняться.

На рис. 1 изображено несколько узлов такой сетки вблизи края диска, который здесь не проходит ни через один узел. Введем коэффициенты a_1, a_2, b_1, b_2 , смысл которых ясен из рисунка. Выражения для производных тогда будут записаны так:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 2 \frac{\frac{T_{i+1,j} - T_{i,j}}{a_2} - \frac{T_{i,j} - T_{i-1,j}}{a_1}}{(a_1 + a_2)h^2},$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 2 \frac{\frac{T_{i,j+1} - T_{i,j}}{b_2} - \frac{T_{i,j} - T_{i,j-1}}{b_1}}{(b_1 + b_2)h^2}.$$

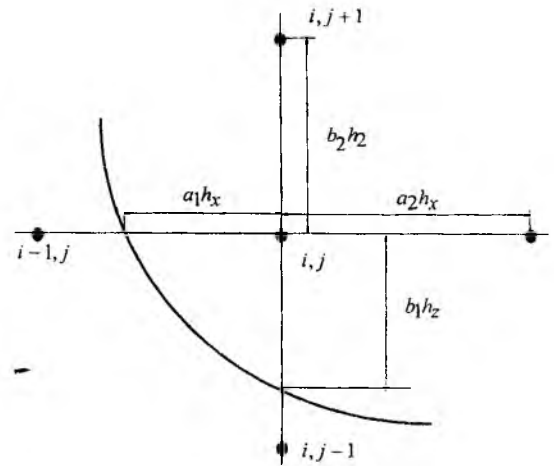


Рис. 1

Здесь мы считаем, что шаги сетки h вдоль осей x и z одинаковы. Рабочее уравнение для вычисления значения температуры в узле сетки с индексами i и j выглядит так:

$$T_{i,j} = \frac{2 \left(\frac{T_{i-1,j}/a_1 + T_{i+1,j}/a_2}{a_1 + a_2} + \frac{T_{i,j-1}/b_1 + T_{i,j+1}/b_2}{b_1 + b_2} \right) + \frac{I_{i,j}}{K\delta}}{\gamma^2 + \frac{2}{h^2} \left(\frac{1}{a_1 a_2} + \frac{1}{b_1 b_2} \right)}. \quad (9)$$

Если $a_1 = a_2 = b_1 = b_2 = 1$, то уравнение (9) переходит в уравнение (8). При расчетах для каждого узла сетки вычисляются коэффициенты a_1, a_2, b_1, b_2 . Если узел находится вдали от края диска, расчеты ведутся по формуле (8). Для узлов, близких к краю диска, некоторые коэффициенты оказываются меньшими единицы. Тогда в качестве температуры в таких “смешанных” узлах берется температура на границе диска, т. е. $T = 0$.

На рис. 2 показаны некоторые результаты расчетов. Они проводились для датчика с константовым диском диаметром 1 см и толщиной 50 мкм, расположенным на середине широкой стенки во многих точках через 1 см вдоль прямоугольного волновода сечением $120 \times 5,7$ мм. В нем распространяется волна H_{10} мощностью 1000 Вт при длине волны в свободном пространстве 16,5 см. Коэффициент теплообмена равен $5 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}$. На рисунке показано, как меняется вдоль оси волновода поверхностная плотность мощности $I_{\text{ш}}$ и температура в центре диска $T_{\text{ц}}$. Видно, что изменения температуры повторяют изменения плотности мощности, причем “тепловой” КСВ $= \sqrt{T_{\text{max}}/T_{\text{min}}}$ равен КСВ по электромагнитному полю. Следовательно, с помощью таких датчиков проходящей мощности можно измерять параметры стоячей волны в волноводе и использовать их в многозондовых микроволновых мультиметрах и тепловых дискретных измерительных линиях [4]. Основным их достоинством является равенство значений КСВН и КСВТ, а при использовании контактных или бесконтактных термопреобразователей обеспечивается минимум систематической погрешности, обусловленной градиентным “растеканием” тепла по поверхности поглощающей стенки.

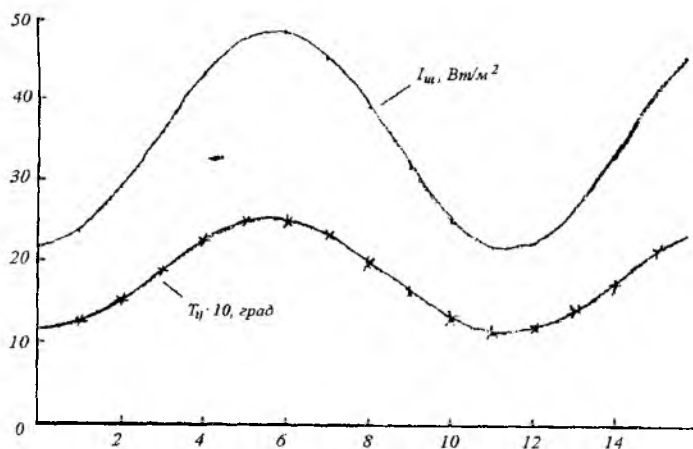


Рис. 2

Список литературы: [1] Универсальный датчик Волкова В.М. для измерения проходящей мощности СВЧ: Решение о выдаче патента Украины по заявке №97094823 от 3.09.1997.. [2] Волков В.М. Применимость теории сильного скин-эффекта при вычислении потерь в слабопроводящих стенках волноводов. // Известия вузов. Радиоэлектроника. 1997. – Т. 10. – №10. – С. 67-69. [3] Волков В.М. Частотные свойства диссипативных потерь в многоволновых волноводах. // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч-техн. сб. – 2000. – Вып. 113. [4] Патент №10612А Украины. Тепловая дискретная измерительная линия / Волков В.М., 1993.

Харьковский государственный технический университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 29.05.2000