

К ВОПРОСУ О РАЗРАБОТКЕ ДАТЧИКА ПРОХОДЯЩЕЙ МОЩНОСТИ СВЧ НА ПОГЛОЩАЮЩЕЙ СТЕНКЕ С ОПТИМАЛЬНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

В. М. Волков, Л. А. Дидык, Н. И. Кравченко, В. Д. Кукуш

Х а р ь к о в

Разработка новой измерительной аппаратуры для мощных волноводных трактов (до 100 *квт* при мощности в импульсе 30—40 *Мвт*), используемых в радиолокационных, навигационных, связных системах, в линейных ускорителях элементарных частиц, в настоящее время весьма актуальна. В связи с необходимостью контроля работы высокочастотных трактов таких систем и трудностью этого контроля из-за понижения электрической прочности при внесении датчиков в волновод, представляет интерес исследование таких принципов измерения, которые обеспечивают однородность мощных трактов и позволяют свести измерение режима передачи энергии внутри волновода к измерению эффектов, сопровождающих передачу вне волновода.

Таким методом является, в частности, метод поглощающей стенки. Он хорошо известен [1, 2], однако до настоящего времени в литературе отсутствует более или менее строгий расчет распределения температуры на внешней поверхности стенки, времени установления стационарного режима, расчет и выбор оптимальных конструктивных параметров датчика.

В настоящей работе приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований, проведенных в Харьковском институте радиоэлектроники в 1967—1970 гг. по разработке датчика проходящей мощности СВЧ сверхбольших уровней, предназначенного для измерения среднего значения импульсно-модулированных колебаний в волноводном тракте клистора КИУ-15.

1. Решение тепловой задачи для поглощающей стенки

Поглощающая стенка представляет собой участок волноводного тракта с большей активной составляющей поверхностью импеданса, чем у волновода, но настолько, что возникновением высших типов волн, а также отражением основной волны (H_{10}) можно пренебречь. Нагревание стенок волновода связано с теплопроводностью металла и происходит за счет рассеяния электромагнитной энергии, поэтому физические процессы, вызванные тепловым действием электромагнитных волн на поглощающую стенку, могут быть описаны уравнением теплопроводности. Полагая, что поглощающая стенка изотропна, теплофизические константы металла поглощающей стенки не зависят от температуры и агрегатное состояние вещества поглощающей стенки в пределах температурного поля не изменяется, уравнение теплопроводности для поглощающей стенки будет иметь вид

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \kappa \Delta v(x, y, z, t) + \nu(v - v_0) + \omega(z), \quad (1)$$

где $v(x, y, z, t)$ — температура поглощающей стенки;

v_0 — температура окружающей среды;

κ — коэффициент температуропроводности;

ν — коэффициент пропорциональности;

$w(z) = \frac{\delta' P}{\delta^2 d l c \rho} (1 + |\Gamma|^2 + 2|\Gamma| \cos 2\beta_{10} z)$ — диссипативная функция [3];

δ' — глубина скинслоя;

δ, d, l — толщина, ширина, длина стенки;

P — мощность потерь H_{10} -волны в стенке;

c, ρ — удельная теплоемкость и плотность металла стенки;

Γ — коэффициент отражения нагрузки;

β_{10} — постоянная распространения.

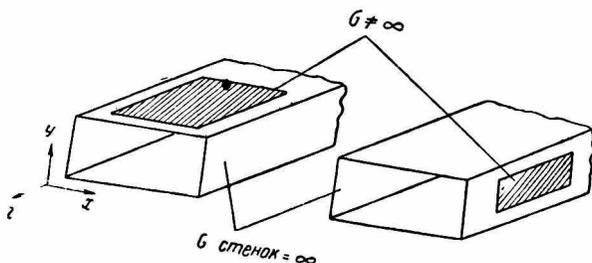


Рис. 1. Волноводные секции с поглощающей стенкой.

Введя функцию прироста температуры в поглощающей стенке (твердом теле в форме прямоугольного параллелепипеда):

$$\theta(x, y, z, t) = v(x, y, z, t) - v_0, \quad (2)$$

выражение (1) можно свести к уравнению параболического типа

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \kappa \Delta \theta + \nu \theta + w(z) \quad (3)$$

с пространственно-временными краевыми условиями

$$\theta(x, y, z, t) = 0; \quad z = 0; \quad z = l;$$

$$\mp \frac{\partial \theta}{\partial t} + h \theta(x, y, z, t) = \begin{cases} 0; & x = 0; \\ \frac{P}{K}; & x = \delta; \end{cases}$$

$$\theta(x, y, z, t) = 0; \quad y = 0; \quad y = d, \quad \theta(x, y, z, t) = 0; \quad t = 0,$$

где $h = \frac{\alpha}{K}$ — относительный коэффициент теплообмена;

α — коэффициент теплоотдачи;

K — коэффициент теплопроводности.

Строгое решение уравнения (3) представляется в виде суммы стационарной и нестационарной составляющих, математическое описание которых довольно громоздко [4]. Стационарное температурное поле выражается в виде знакпеременных рядов, исследование сходимости которых для толщин стенки от 0,1 до 500 мк при значениях относительного коэффициента теплообмена $h = 1 \div 4$ 1/м на ЭЦВМ М-20 позволило

выделить малый параметр $\alpha_{mnl}\delta$. Учитывая этот факт, после некоторых упрощений получим:

$$\theta(x, y, z) = \frac{P}{a} \left\{ 1 - \frac{\delta'}{\delta} \cdot \frac{4 \left(\cos \alpha_1 x + \frac{h}{a} \sin \alpha_1 x \right)}{\left[2 + (\alpha_1^2 + h^2) \frac{\delta}{h} \right]} \times \right. \\ \left. \times \left[\frac{\operatorname{ch} \gamma_{11} \left(\frac{l}{2} - z \right)}{\operatorname{ch} \gamma_{11} \frac{l}{2}} - \frac{\operatorname{ch} \beta_{11} \left(\frac{d}{2} - y \right)}{\operatorname{ch} \beta_{11} \frac{d}{2}} \right] \right\}. \quad (4)$$

Нестационарное температурное поле выражается в виде распространяющихся тепловых волн, амплитуды которых затухают по экспоненциальному закону. Исследование точного выражения для нестационарной составляющей температурного поля на ЭЦВМ М-20 [4] показывает, что для обеспечения погрешности асимптотики в 1% при толщине стенки от 10 до 500 мк необходимо учитывать не менее девяти членов трехкратной суммы, а при толщине менее 10 мк можно ограничиться только первым членом:

$$\theta_1(x, y, z, t) = \frac{64P}{\pi^2 a} \sum \frac{(1 + |\Gamma|^2) \psi_{e, m, n}(x, y, z)}{\left[2 + (\alpha_{m, n}^2 + h^2) \frac{\delta}{h} \right]} \cdot l^{(\nu - \lambda^2)t}, \quad (5)$$

где α_i — корни характеристического уравнения

$$\operatorname{tg} \alpha_i \delta = \frac{2h\alpha_i}{\alpha_i^2 - h^2};$$

β_m — корни характеристического уравнения

$$\sin \beta_m d = 0;$$

γ_n — корни характеристического уравнения

$$\sin \gamma_n l = 0;$$

$$\psi_{e, m, n} = (\cos \alpha_i x + \frac{h}{a} \sin \alpha_i x) \sin \beta_m y \sin \gamma_n z;$$

$$\lambda^2 = \alpha_i^2 + \beta_m^2 + \gamma_n^2;$$

$$P = \frac{2P^+ \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_c} \right)^2 Z_s (1 + |\Gamma|^2 + 2|\Gamma| \cos 2\beta_{10} z)}{ab \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_c} \right)^2} z_T}$$

— плотность потока мощности электрических потерь;

$z_s = \sqrt{\frac{\pi f \mu}{\sigma_0}}$ — поверхностный импеданс поглощающей стенки;

P^+ — падающая мощность;

a, b — размеры волновода;

f — частота колебаний;

σ_0 — удельная проводимость;

μ — магнитная проницаемость;

λ_0 — длина волны в свободном пространстве;

λ_s — длина волны в волноводе: $z_T = 377 \text{ ом}$.

2. Анализ решения, выбор оптимальных параметров датчика

Решение уравнения (3) позволяет получить распределение температуры на поглощающей стенке, а также определить постоянную времени датчика. Рассмотрим поглощающую стенку размерами $0,1 \times 30 \times 120$ мм,

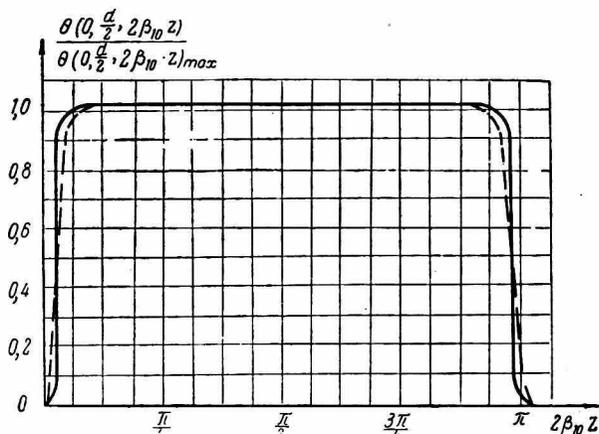


Рис. 2. Распределение стационарной температуры по длине поглощающей стенки при $\Gamma = 0$:

сплошная кривая — расчетная, штриховая — экспериментальная.

выполненную из константана с относительным коэффициентом теплообмена $h = 2 \frac{1}{\text{м}}$. При этом $\alpha_1 = 0,2 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{м}}$; $\beta_1 = 33,3\pi \frac{1}{\text{м}}$; $\gamma_1 = 8,3\pi \frac{1}{\text{м}}$. Распределение стационарной температуры на внешней поверхности поглощающей стенки в волноводном тракте 120×57 мм при бегущей волне

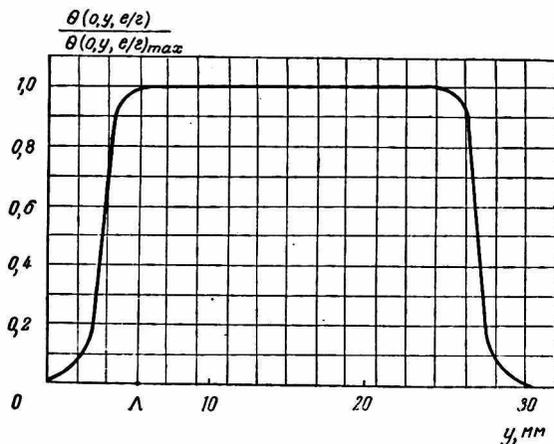


Рис. 3. Распределение стационарной температуры по ширине поглощающей стенки.

($\Gamma = 0$) приведено на рис. 2, 3. Превышение температуры стенки относительно температуры волновода при средней мощности в тракте 20 квт достигает $11,2^\circ$. Из рис. 2 видно хорошее согласие расчета с экспериментом. Характер распределения, как и следовало ожидать для $\Gamma = 0$,

легко объясним, количественные же характеристики являются решающими при выборе оптимальной геометрии поглощающей стенки, типа преобразователя и индикатора.

Особый интерес представляет распределение стационарной температуры при рассогласованной нагрузке. Расчет показывает, что температурное поле на внешней поверхности поглощающей стенки повторяет

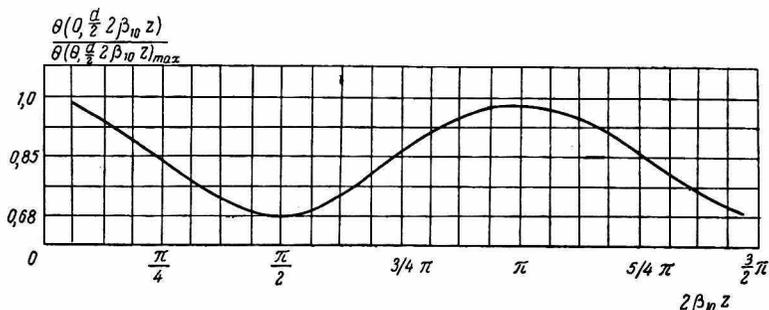


Рис. 4. Распределение стационарной температуры по длине поглощающей стенки при $\Gamma = 0,1$ для волновода 120×57 (расчет).

распределение квадрата электромагнитного поля вдоль волноводной линии передачи. На рис. 4 приведено распределение стационарной температуры при $|\Gamma| = 0,1$ для рассматриваемой стенки в волноводе 120×57 мм при мощности СВЧ 5 квт. Экспериментальные исследования в волноводе 180×85 мм для $|\Gamma| = 0,1$ подтверждают этот результат (рис. 5). Таким образом, температурное поле на внешней поверхности стенки может характеризовать режим передачи мощного волнового тракта.

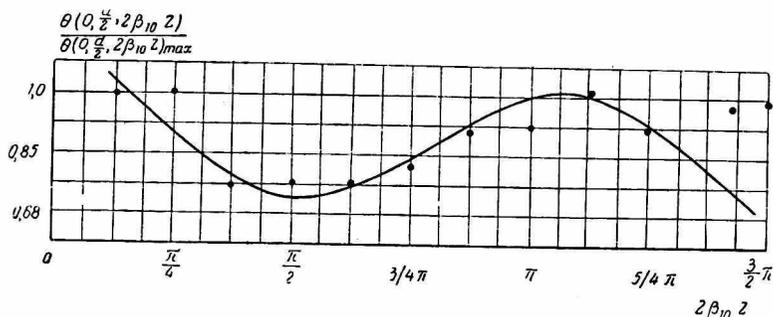


Рис. 5. Распределение стационарной температуры по длине поглощающей стенки при $\Gamma = 0,1$ для волновода 180×85 мм (эксперимент).

Выражение (4) справедливо при толщине поглощающей стенки от 10 до 500 мк и позволяет определить зависимость нестационарного температурного поля. На рис. 6 приведен график установления стационарного состояния. Результат расчета в достаточной степени согласуется с экспериментом. Небольшое несовпадение кривых объясняется наличием массивного термоземента в макете поглощающей стенки. На рис. 7 приведена зависимость постоянной времени установления (время, за которое амплитуда температуры увеличится в e раз) от толщины стенки, рассчитанная на ЭЦВМ-М-20 для рассматриваемой поглощающей стенки из константана.

Полученные результаты позволяют определить оптимальные параметры стенки.

Под оптимальными параметрами поглощающей стенки, используемой в качестве основного элемента датчика проходящей мощности СВЧ, следует понимать геометрию и теплофизические свойства, обеспечивающие:

- 1) однородность волноводного тракта;
- 2) максимальную чувствительность датчика;
- 3) минимальную погрешность, вызванную рассогласованием нагрузки;
- 4) минимальное время установления стационарного режима.

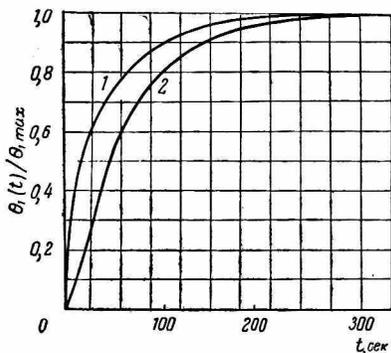


Рис. 6. График установления стационарного состояния поглощающей стенки:

кривая 1 — расчетная, 2 — экспериментальная.

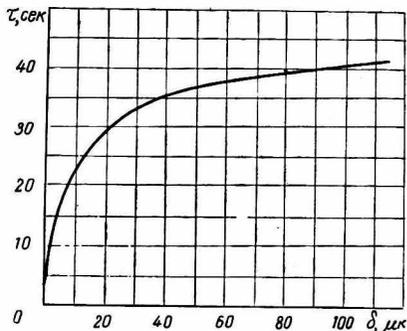


Рис. 7. Зависимость постоянной времени установления стационарной температуры от толщины пленки.

Выбор геометрии поглощающей стенки при конструировании измерителей проходящей мощности СВЧ необходимо начинать с длины, обеспечивающей минимальную погрешность измерения проходящей мощности СВЧ, обусловленную рассогласованием нагрузки. Известно [1,2], что эта погрешность минимальна и не зависит от фазы коэффициента отражения в случае, если длина поглощающей стенки кратна половине длины волны в волноводе ($l = n \frac{\lambda_g}{2}$).

Однако, как показывает полученное решение (4), (рис. 2), длина поглощающей стенки должна быть большей на 2Λ . Величину Λ легко определить из рис. 2, 3, используя аналитическое выражение стационарной температуры.

Однородность волноводного тракта измерителя проходящей мощности, как показывают исследования [4], обеспечивается практически для всех металлов (никель, константан, нержавеющая сталь, пермаллой).

Собственный КСВН не превышает 1,05.

Чувствительность поглощающей стенки можно определить как приращение температуры (4) на внешней поверхности стенки при распространении по согласованному волноводу единицы мощности

$$\beta_0 = \frac{2Z_s \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_c}\right)^2}{abZ_{T\alpha} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_c}\right)^2}} \left\{ 1 - \frac{4 \frac{\delta'}{\delta} \operatorname{ch} \beta_{11} \left(\frac{d}{2} - y\right)}{\left[2 + (a_1^2 + h^2) \frac{\delta}{h}\right] \operatorname{ch} \beta_{11} \frac{d}{2}} \right\}. \quad (6)$$

Аналитическое выражение чувствительности (6) и асимптотическое представление нестационарного температурного поля (5) позволяют найти оптимальную ширину стенки. Из (5) видно, что время установления

стационарного состояния уменьшается с уменьшением ширины пленки, однако уменьшение ее до величины, меньшей 2Δ , приводит к потере чувствительности. Поэтому ширина стенки d должна быть на 2Δ больше ширины применяемого термопреобразователя.

Из рис. 7 видно, что минимальное время установления стационарного режима, а следовательно и время измерения, обеспечивают весьма тонкие пленки, однако конструктивные трудности, а также возможность излучения через стенку при сверхвысоких измеряемых уровнях мощности СВЧ ограничивают уменьшение толщины до десятков микрон (в нашем случае 100 мк). Для средних уровней измеряемой мощности СВЧ и в коротковолновом участке сантиметрового диапазона волн в связи с этим интересно создание малоинерционных датчиков на основе применения тонкопленочной поглощающей стенки, выполненной путем вакуумного напыления на тонкую слюду.

ЛИТЕРАТУРА

1. H. W. Barlow. Proc. IEE, 102, № 2, 1955.
2. L. M. Stephenson. Proc. IEE, 106, № 25, 1959.
3. И. В. Лебедев. Труды МЭИ, вып. XVIII, 1956.
4. Отчет по теме № 67-102. Харьковский институт радиоэлектроники, 1969.