

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЛИНИИ**

Развитие электроники в области СВЧ колебаний больших и сверхбольших уровней мощности требует разработки новых принципов измерения параметров СВЧ колебаний в волноводных трактах. Одним из таких принципов является принцип поглощающей стенки, описанный в [1]. Заменяя одну стенку прямоугольного волновода металлической фольгой, электрическая проводимость которой намного меньше проводимости меди, можно изучать параметры электромагнитных колебаний внутри полости волновода по распределению температуры на внешней поверхности этой фольги. На использовании данного принципа создан опытный образец тепловой измерительной линии, содержащий отрезок стандартного волновода с удаленной частью узкой стенки, в которую заподлицо с внутренней поверхностью волновода впаяна нихромовая фольга толщиной 9 мкм, по поверхности которой скользит подвижный термозонд.

В качестве подвижного термозонда использовались две пары последовательно соединенных хромель-копелевых термопар, одна из которых скользит вдоль середины нихромовой фольги, а вторая — по массивной стенке волновода.

При прохождении электромагнитной энергии по волноводному тракту часть СВЧ энергии рассеивается на поглощающей стенке, благодаря чему повышается температура нихромовой фольги. Величина термо-ЭДС измерялась прибором Ф116/2, а при автоматическом снятии кривых распределения температуры подавалась на вход вертикального отклонения двухкоординатного самописца ПДС-021.

В качестве механизма перемещения термодатчика использовался механизм перемещения стандартной щелевой измерительной линии. Для выравнивания температуры вдоль волновода и уменьшения влияния температурных колебаний внешней среды на погрешность измерений волноводная секция с поглощающей стенкой помещалась в массивную оправу из материала с хорошей теплопроводностью.

Наличие непосредственного контакта между термозондом и поглощающей стенкой приводит к оттоку тепла по термозонду и в связи с этим к искажению температурного поля поглощающей стенки, т. е. к погрешности измерения. Эта погрешность в отдельных случаях может достигать нескольких десятков процентов [2], что существенно исказит результат измерений. Так как для контактных методов измерения температуры методические погрешности обусловлены характером теплообмена термозонда и исследуемого тела, а также степенью искажения температурного поля тела в процессе измерения, то, градуируя пока-

зания термодатчика в значениях температуры поглощающей стенки, можно исключить методическую погрешность измерений.

Градуировка термозонда проводилась следующим образом. Вместо впаивной нихромовой поглощающей стенки в окно узкой стенки волновода помещалась никелевая фольга толщиной

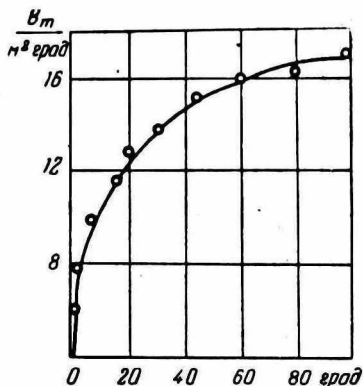
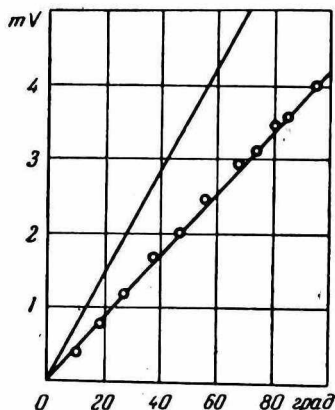


Рис. 1. Градуировочные кривые чувствительности термодатчика.

Рис. 2. Конвективный коэффициент теплообмена поглощающей стенки с внешней средой.

16 мкм, которая электрически изолировалась от стенок волновода и подключалась в одно из плеч двойного моста Р329. Рассеиваемая мощность постоянного тока, проходящего по никелевой фольге, величина которого зависит от напряжения питания моста, повышает ее температуру. Поскольку удельное сопротивление никеля обладает практически линейной зависимостью от температуры, то, измеряя изменение сопротивления никелевой фольги, можно определить приращение ее температуры. Помещая одну термопару на середину никелевой фольги, а другую на толстую стенку волновода, фиксируют ЭДС термодатчика.

На рис. 1 показана зависимость ЭДС последовательно соединенных термопар от разности температур между никелевой фольгой и массивной стенкой волновода (кривая 1) и ЭДС этих же термопар в зависимости от разности их температуры (кривая 2). Из рисунка видно, что отвод тепла термопарой понижает температуру поглощающей стенки в месте контакта, и при температуре стенки, превышающей температуру всего волновода на 60 градусов, это понижение достигает 40%. Построенная градуировочная кривая позволяет учесть систематическую погрешность измерения температуры поверхности поглощающей стенки.

Так как крепление нагретой никелевой фольги осуществляется таким способом, что тепловой поток, уходящий через крепежные соединения, составляет доли процента полного потока,

то в установившемся тепловом режиме вся рассеиваемая мощность постоянного тока при помощи конвективного теплообмена рассеивается во внешнем пространстве.

Измеряя рассеиваемую мощность постоянного тока в никелевой фольге и зная при этом ее температуру,

можно вычислить интегральный коэффициент теплообмена никелевой фольги с окружающей средой. На рис. 2. приведена кривая зависимости коэффициента теплообмена  $\alpha$  между поглощающей стенкой и массивными стенками волновода сечением  $12,6 \times 28,5$  мм в зависимости от ее температуры. Эти результаты в пределах погрешности измерений хорошо согласуются с приведенным в [3] значением для коэффициента теплообмена в ограниченном пространстве.

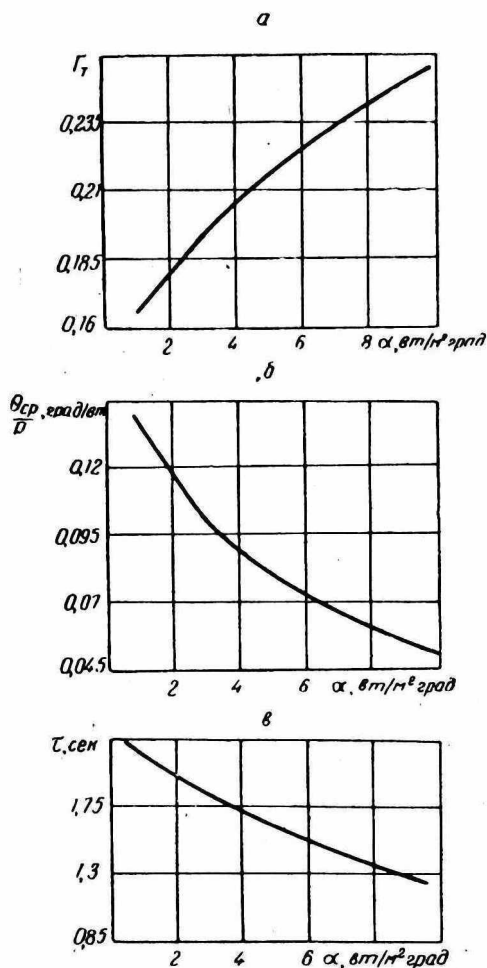


Рис. 3. Зависимость параметров тепловой линии от коэффициента теплообмена поглощающей стенки с внешней средой:

а — для коэффициента отражения; б — для средней температуры по длине поглощающей стенки; в — для постоянной времени.

На рис. 3 показаны расчетные зависимости чувствительности поглощающей стенки  $\Theta/P$  (где  $\Theta$  — температура поглощающей стенки, а  $P$  — падающая мощность в волноводном тракте), постоянной времени установления стационарного режима  $\tau$  и коэффициента отражения, вычисленного по формуле

$$\Gamma_T = \frac{\sqrt{\theta_{\max}/\theta_{\min}} - 1}{\sqrt{\theta_{\max}/\theta_{\min}} + 1},$$

где  $\theta_{\max}$ ,  $\theta_{\min}$  — экстремальные значения температуры вдоль поглощающей стенки, от коэффициента теплообмена. Из графика

ков видно, что повышение теплообмена уменьшает чувствительность поглощающей стенки, увеличивает ее способность поддерживать относительную неравномерность распределения температур. Таким образом, коэффициент теплообмена должен рассматриваться как внешний фактор, управляющий свойствами поглощающей стенки.

На рис. 4. показаны расчетные кривые распределения температуры вдоль нихромовой стенки толщиной 9 мкм, установленной в узкой стенке волновода сечением  $12,6 \times 28,5$  мм, для раз-

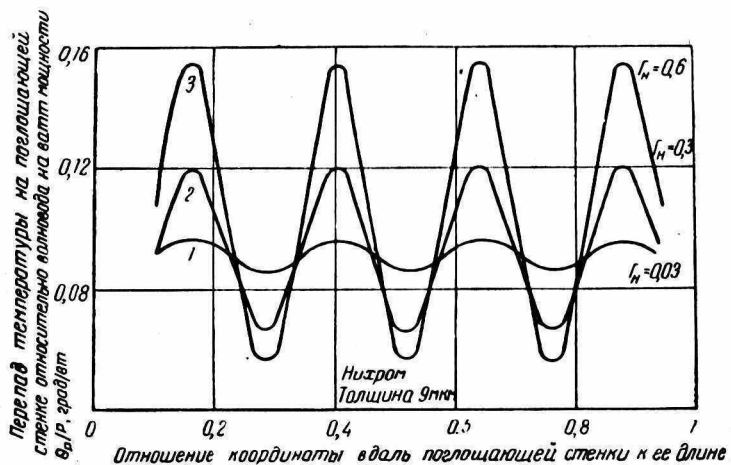


Рис. 4. Распределение температуры вдоль поглощающей стенки для различных коэффициентов отражения.

личных значений коэффициента отражения нагрузки при коэффициенте теплообмена, равном  $3 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}$ . Обращает на себя внимание то, что при малых коэффициентах отражения  $\Gamma_n$  нагрузки характер распределения температуры на поверхности стенки весьма точно соответствует распределению квадрата амплитуды поля. Коэффициент отражения  $\Gamma_T$ , вычисленный по температурной кривой 1, отличается от действительного лишь на 5%. При больших значениях  $\Gamma_n$  это отличие существенно и при  $\Gamma_n = 0,6$  (кривая 3) составляет 60%.

Основная погрешность определения коэффициента отражения по экспериментальным значениям температуры на поглощающей стенке систематическая и имеет отрицательный знак, т. е.  $\Gamma_T$  всегда занижено. Это объясняется наличием теплового потока в стенке в направлении градиента температур, обусловленного неравномерным распределением тепловых источников, и действующего шунтирующим образом на распределение экстремальных значений температуры. Эффект теплового шунтирования может быть уменьшен путем уменьшения тепловой проводимости поглощающей стенки (толщины, теплопроводности материала).

Заметим, что тепловая измерительная линия позволяет хорошо различать малые значения КСВ нагрузки (0,01—1,05) при хорошем воспроизведении кривой стоячей волны.

Экспериментальные исследования проводились на уровне мощности порядка 5 Вт. По-видимому, эту величину следует считать минимальной для тепловой линии волновода данного сечения. Максимальный уровень мощности, при котором возможно использование макета, определить не удалось из-за отсутствия соответствующих источников электромагнитных колебаний. Однако учитывая, что собственный КСВ измерительной линии не превышает 1,01; а поглощающая стенка может быть в тепловом отношении разгружена путем увеличения коэффициента теплоотдачи при улучшении информативных свойств о режиме передачи в тракте, можно предположить, что средняя мощность порядка нескольких киловатт не является пределом для данного сечения волновода.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что тепловая измерительная линия может быть практически осуществлена и в других сечениях волноводов, обеспечив измерение коэффициента отражения нагрузки непосредственно в рабочих условиях мощного волноводного тракта практически без нарушения его электрической прочности.

В заключение авторы выражают благодарность А. К. Грущенко за отлично выполненный макет поглощающей стенки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Тепловое действие волны на поглощающую стенку прямоугольного волновода. «Инж. физ. журн.». 1972, т. XXII, № 1, с. 158—160. Авт.: Кравченко Н. И. Волков В. М., Кукуш В. Д. и др.
2. Кулаков М. В., Макаров Б. И. Измерение температуры поверхности твердых тел. М., «Энергия», 1969. 142 с.
3. Дульнев Г. Н., Семяшкин Э. М. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. Л., «Энергия», 1968. 359 с.