

В. Н. КУЗНЕЦОВ, А. С. ГРАНКИН

## РАЗРАБОТКА ТЕПЛОВОГО СКАНЕРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ВОЛНОВОДНОЙ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ

Приведено описание устройства, позволяющего проводить исследования электромагнитного поля вдоль волноводной линии передачи прямоугольного сечения посредством оценки распределения температуры на участке широкой стенки волновода.

*Ключевые слова:* радиоизмерения, прямоугольный волновод, измерение длины волны, измерительная линия.

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.

Для исследования картины распределения электромагнитного поля вдоль волноводной линии передачи используются измерительные линии [1]. Такая линия (рис. 1) представляет собой отрезок прямоугольного волновода 1, вдоль которого прорезана узкая щель 2. Вдоль щели перемещается каретка 3, несущая головку с емкостным зондом 4, введенным на не-

большую глубину в волновод. Измерительная линия устанавливается в исследуемый СВЧ-тракт. Наведенное в зонде напряжение возбуждает связанные резонаторы 5 и 6 зондовой головки. Благодаря настройке резонаторов с помощью поршней 7 и 8 достигается оптимальный резонанс, и входная проводимость зондовой головки оказывается чисто активной. Сигнал резонатора 5 детектируется, при этом обеспечивается согласование резонаторной системы с входным сопротивлением детектора, использующего кристаллический диод 9. Постоянная составляющая с выхода детектора подается на индикаторное устройство, представляющее собой, при достаточной мощности генератора, магнитоэлектрический микроамперметр. Показания индикаторного устройства пропорциональны напряженности электрического поля в линии передачи либо связаны с ней известной зависимостью.

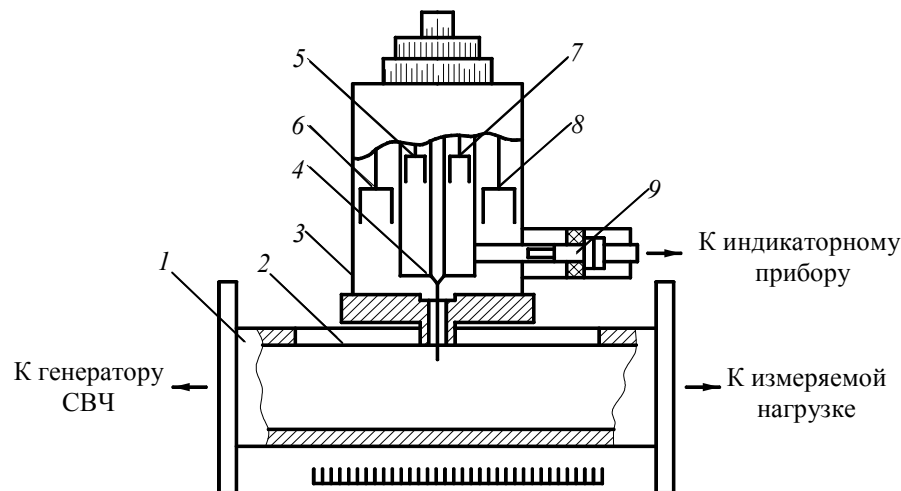


Рис. 1

Рассматриваемое устройство, несмотря на такие достоинства, как простота конструкции и высокая надежность (за счет минимума применяемой электроники), имеет очевидные недостатки. Во-первых, существует погрешность, обусловленная влиянием собственного электромагнитного поля детекторной головки на электромагнитное поле внутри волновода; во-вторых, отсутствует возможность контроля уровня распространяемой СВЧ-мощности; кроме того, процесс измерения осуществляется при низком уровне автоматизации и полностью отсутствует его визуализация.

В качестве альтернативы измерительным линиям предлагается разработанное авторами статьи более совершенное устройство, построенное на базе бесконтактного метода исследования электромагнитного поля вдоль линии передачи [2]. Метод заключается в исследовании температурного поля на поверхности широкой стенки волноводной линии передачи прямоугольного сечения. Работы по исследованию нагрева стенок волноводов проходящим СВЧ-сигналом [3] и результаты моделирования [4] позволяют судить о соответствии картин электромагнитного и температурного полей на поверхностях стенок волновода.

Для создания ярко выраженной температурной зависимости производится замена участка широкой стенки волновода на стенку, выполненную из материала с высоким удельным сопротивлением, — поглощающую стенку (ПС). Для ПС установлены зависимости температуры нагрева от мощности СВЧ-сигнала, распространяемого через волновод.

Распределение температуры по поверхности ПС может быть оценено аналитически путем совместного решения уравнений Максвелла для электромагнитного поля, уравнения теплопроводности и уравнений Навье — Стокса, описывающих кондуктивно-конвективный и лучистый теплообмен с внешней средой. Такая задача довольно сложна и в настоящее время еще не решена. Ее можно значительно упростить, причем почти без потери точности для практически важных случаев, если принять некоторые ограничения, например: ПС не создает электромагнитного поля в линии передачи; температура в точках соединения ПС со стенками

основного тракта постоянна. При таких условиях задача сводится к решению уравнения теплопроводности для участка стенки линии передачи, нагреваемого внутренними источниками тепла, распределение температуры в которых определяется структурой электромагнитного поля. Это уравнение имеет следующий вид:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{2\alpha^2}{K\delta} T = -\frac{I_{\text{ш}}(x, z)}{K\delta}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  — коэффициент теплообмена;  $K$  — коэффициент теплопроводности;  $\delta$  — толщина поглощающей стенки;  $I_{\text{ш}}(x, z)$  — поверхностная плотность мощности на участке широкой стенки волновода.

Существует ряд методов для решения данного уравнения, наиболее универсальными из которых являются численные методы. На рис. 2, а, б представлены соответственно картины распределения температуры и плотности мощности на поверхности ПС, полученные в результате решения уравнения теплопроводности численным методом для прямоугольного волновода  $120 \times 57$  мм, при длине волны 16,5 см, мощности 1 кВт и толщине поглощающей стенки (из константана), равной 20 мкм. На рисунках видны стационарные зоны, в которых температура на поверхности ПС волновода характеризует распределение электромагнитного поля внутри него.

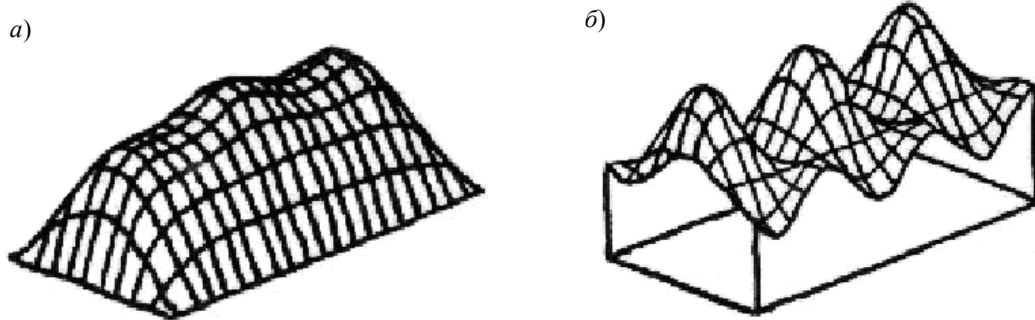


Рис. 2

Соответствие картин температурного поля на поверхности ПС и электромагнитного поля внутри волновода позволяет судить о возможности измерения не только мощности, но и длины волны в волноводе, а следовательно, и коэффициента стоячей волны. Очевидно, что

для измерения длины волны достаточно знать расстояние между двумя соседними температурными максимумами на поверхности ПС. Данное наблюдение, по мнению авторов, меняет представление о классическом методе с использованием поглощающей стенки как о методе, применяемом исключительно для измерения проходящей СВЧ-мощности [1].

В качестве практической реализации бесконтактного метода измерения предлагается многофункциональное устройство — тепловой сканер для исследования электромагнитного поля вдоль волноводной линии передачи. Механическая часть теплового сканера (рис. 3) представляет собой отрезок прямоугольного волновода  $I$  с фланцами для включения ее в реальную линию передачи. Участок широкой стенки отрезка волновода заменен на ПС прямоугольной формы 2, выполненную, например, из константана.

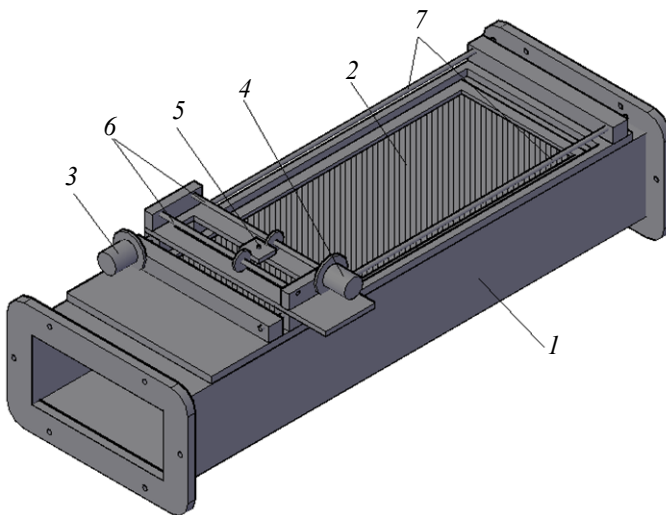


Рис. 3

представляет собой отрезок прямоугольного волновода  $I$  с фланцами для включения ее в реальную линию передачи. Участок широкой стенки отрезка волновода заменен на ПС прямоугольной формы 2, выполненную, например, из константана.

Непосредственно на отрезке волновода расположена сканирующая система регистрации температурных значений. Ее основным элементом является инфракрасный (ИК) датчик 5 (см. рис. 3), позволяющий бесконтактным методом измерять температуру в конкретной точке ПС. От правильного выбора ИК-датчика зависят результаты эксперимента.

В рассматриваемом устройстве предлагается применить датчик MLX90614 фирмы “Melexis” (Бельгия), уникальный на сегодняшний день датчик в плане точности измерений, массогабаритных характеристик и удобства сбора информации. Датчик MLX90614 имеет 17-разрядный встроенный АЦП, память с произвольным доступом (RAM) для хранения измеряемых значений, интерфейс SMBus для передачи значений температуры, обеспечивая точность измерений до  $\pm 0,1^\circ\text{C}$ . Кроме того, MLX90614 имеет встроенный датчик измерения температуры окружающей среды, который необходим для организации температурной компенсации. При этом сам датчик имеет размеры 10 мм в диаметре и толщину 4 мм.

Организации перемещения датчика над поверхностью ПС также следует уделить внимание. Применяемые двигатели и механическая часть перемещающей системы должны обеспечивать быстрое действие и точность позиционирования датчика. Максимальное быстрое действие определяется временем, необходимым для считывания датчиком сигнала на определенном участке ПС, а точность — размерами этого участка. В разного рода сканирующих системах широко распространены шаговые двигатели, преимуществами которых являются высокая точность позиционирования, отсутствие необходимости в организации обратной связи по положению, относительно легкая программная реализация перемещения с использованием современной микропроцессорной техники. В рассматриваемом устройстве предлагается использовать два шаговых двигателя 3 и 4 (см. рис. 3): один перемещает датчик по направляющим 6 и 7 вдоль оси волновода, другой — перпендикулярно оси. В качестве двигателей могут быть применены униполярные шаговые двигатели M42SP-4NP фирмы “Mitsumi” (Япония), используемые в сканерах изображения, или биполярные шаговые PL15S-020 фирмы “Minebea — Matsushita” (Япония) со встроенной червячной передачей, часто применяемые для позиционирования лазера в оптических приводах.

Немаловажным элементом сканирующей системы, наряду с датчиком и системой позиционирования, является микроконтроллер (МК). В данном случае выбран высокопроизводительный 8-разрядный МК ATmega128 фирмы “Atmel” (США). Наличие большого количества портов ввода/вывода позволяет подключить к МК в рамках разрабатываемого сканера такие периферийные устройства, как клавиатура и жидкокристаллический дисплей. Встроенный универсальный синхронно-асинхронный последовательный приемопередатчик обеспечивает организацию связи с датчиком и компьютером при помощи двухпроводного интерфейса. Таким образом, данные, считанные и обработанные МК, через последовательный порт передаются в компьютер для последующей обработки. Скорость передачи последовательного порта вполне достаточна для рассматриваемой системы, тем не менее существует возможность средствами того же микроконтроллера организовать связь через современный высокоскоростной протокол USB.

Рассмотрим алгоритм работы теплового сканера на примере его структурной схемы (рис. 4). При подаче питания ИК-датчик перемещается в начальное положение, что контролируется концевыми выключателями X и Y. Затем оператор при помощи устройства ввода (УВ) задает размеры площадки сканирования. Визуальное взаимодействие оператора с измерительным устройством осуществляется через устройство отображения (УО). После ввода координат осуществляется процесс сканирования. При перемещении датчика на шаг измеряется температура в конкретной точке поглощающей стенки с передачей данных в МК. Драйверы представляют собой набор ключей, которыми определенным образом коммутируются обмотки двигателей. Открытие и закрытие ключей осуществляется посредством выдачи соответствующих двоичных последовательностей через порты МК. Значению температуры, передаваемому в МК, ставятся в соответствие две

координаты положения, которые генерируются программным счетчиком. Таким образом, определяются три координаты, необходимые для построения трехмерной картины распределения температуры на поверхности поглощающей стенки. Одновременно со сканированием производятся вычисления необходимых параметров, запись данных в оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) МК и их передача через последовательный СОМ-порт в компьютер (ПК). Переданные в ПК данные позволяют строить картину распределения температурного, а соответственно и электромагнитного поля вдоль линии передачи.

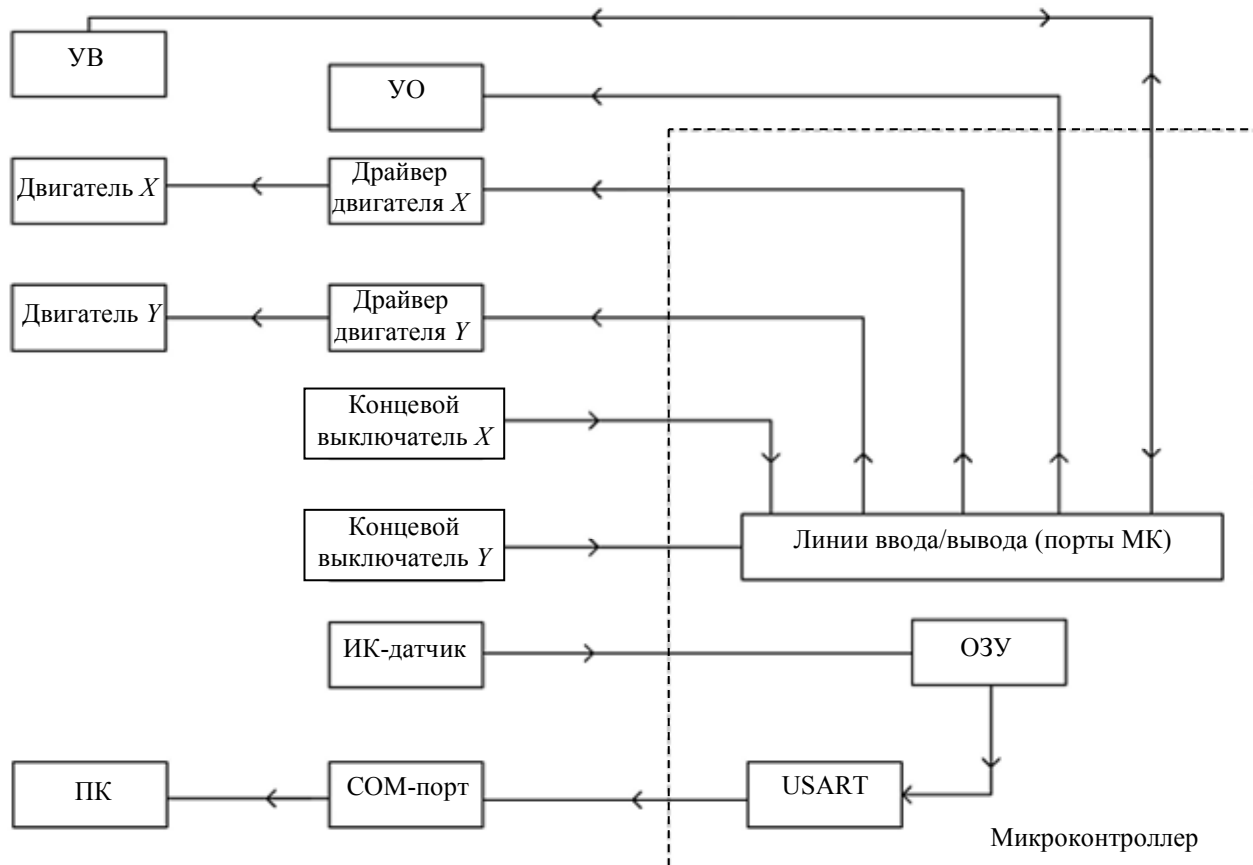


Рис. 4

Предложенное измерительное устройство позволяет реализовать все функциональные возможности бесконтактного метода измерения параметров СВЧ-сигнала в линии передачи прямоугольного сечения [2]. Описанный принцип исследования картины электромагнитного поля может быть использован для измерения длины волны, коэффициента стоячей волны по напряжению, модуля коэффициента отражения и поступающей в нагрузку мощности. Применение высокопроизводительных программируемых МК обеспечивает высокий уровень автоматизации процесса измерения. Созданные с использованием современных микропроцессорных средств, интеллектуальных датчиков и высокоскоростных протоколов такие радиоизмерительные устройства обладают высокой точностью, надежностью, гибкостью (за счет программной реализации), широкими функциональными возможностями, низким энергопотреблением и хорошими массогабаритными характеристиками.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дворяшин Б. В. Основы метрологии и радиоизмерения: Учеб. пособие. М.: Радио и связь, 1993. 320 с.
2. Гранкин А. С., Лисютченков С. Н., Кузнецов В. Н. Бесконтактный метод измерения параметров СВЧ-сигналов в прямоугольном волноводе // Тр. 5-й Регион. конф. Старый Оскол: СТИ МИСиС, 2009. Т. 2.
3. Волков В. М. Проектирование средств измерения проходящей мощности: Учеб. пособие. Харьков, 2000. 160 с.

4. Волков В. М., Кузнецов В. Н., Гранкин А. С. Применение методов математической физики при исследовании теплового действия волны Н10 на широкую стенку прямоугольного волновода // Тр. Междунар. конф. „Современные проблемы информатизации в системах моделирования, программирования и телекоммуникациях“. М.: Изд-во Рос. акад. естествознания, 2009.

*Сведения об авторах*

- Владлен Николаевич Кузнецов** — канд. техн. наук, профессор; Старооскольский технологический институт (филиал) Национального исследовательского технологического университета „Московский институт стали и сплавов“, кафедра автоматки и промышленной электроники; E-mail: vnk@sti-misis.ru
- Анатолий Сергеевич Гранкин** — аспирант; Старооскольский технологический институт (филиал) Национального исследовательского технологического университета „Московский институт стали и сплавов“, кафедра автоматки и промышленной электроники; E-mail: a\_grankin@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
автоматки и промышленной электроники

Поступила в редакцию  
14.12.10 г.