

УДК 621.317.089.6:621.317.784.023

## **ЭТАЛОНЫ-ПЕРЕНОСЧИКИ МОЩНОСТИ СВЧ В ВОЛНОВОДНЫХ ТРАКТАХ НА ОСНОВЕ МНОГОЗОНДОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

**А.И. Матвеев, В.А. Перепёлкин**

*ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.  
lab201@vniiftri.ru*

*Главное внимание публикуемой работы уделяется прослеживаемости единицы мощности электромагнитных колебаний от рабочих средств измерений (ваттметров СВЧ) к Государственному первичному эталону единицы мощности СВЧ, а также роли, которую играют эталоны-переносчики для передачи единицы мощности СВЧ между эталонами. Приводятся их основные характеристики, конструкция четырёхзондового преобразователя эталона-переносчика. Показана частотная зависимость КСВН входа четырёхзондового преобразователя в тракте 16×8 мм. Сообщается, что все необходимые операции при настройке и работе эталона-переносчика реализуются с помощью многоканального измерительного блока и соответствующего программного обеспечения.*

*Разработанный образец эталона-переносчика для волноводных трактов от 35×15 до 16×8 мм изготовлен и обеспечивает КСВН входа преобразователей менее 1,05.*

*Ключевые слова: эталоны-переносчики, мощность СВЧ, волноводные тракты, многозондовые преобразователи прослеживаемости передачи единицы, погрешность.*

## **STANDARDS-CARRIERS OF MICROWAVE POWER IN WAVEGUIDE DUCTS ON THE BASIS OF MULTI-PROBE TRANSDUCERS**

**A.I. Matveev, V.A. Perepyolkin**

*FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region  
lab201@vniiftri.ru*

*The main focus of the published work is on the traceability of a unit of power of electromagnetic oscillations from working measuring instruments (microwave watts) to the State primary standard of a unit of microwave power, as well as the role played by standards-carriers for transferring a unit of microwave power between the standards. Their main characteristics, the construction of the four-probe transducer of the standard-carrier are given. The frequency dependence of the VSWR input of the four-probe transducer in the 16 × 8 mm duct is shown. It is reported that all the necessary operations during the setting up and operating of the standard-carrier are implemented with the help of a multi-channel measuring unit and the corresponding software.*

*The developed sample of the standard-carrier for waveguide ducts from 35 × 15 to 16 × 8 mm is produced and provides input VSWR of transducers with less than 1.05.*

*Key words: standards-carriers, microwave power, waveguide ducts, multi-probe transducers of transmission unit traceability, error.*

Прослеживаемость единицы мощности электромагнитных колебаний от рабочих средств измерений мощности (ваттметров СВЧ) к Государственному первичному эталону единицы мощности СВЧ регламентируется соответствующей поверочной схемой [1]. Современные ваттметры СВЧ характеризуются низкой основной погрешностью, что приводит к относительно небольшому запасу по точности между разрядами поверочной схемы. В связи с этим повышаются требования к погрешности методов передачи размера единицы мощности СВЧ. Основной вклад в погрешность метода передачи вносит погрешность рассогласования, обусловленная отличием полного сопротивления входа и выхода ваттметров СВЧ, сличаемых в процессе передачи единицы, от волнового сопротивления волноводного тракта. Это отличие характеризуется величиной КСВН входа для ваттметров оконечного типа и величиной эквивалентного коэффициента отражения выхода для ваттметров проходного типа.

Для передачи единицы мощности СВЧ между эталонами (первичным, вторичными и рабочими) часто применяются эталоны-переносчики, в качестве которых обычно используются ваттметры и преобразователи мощности оконечного типа. Основными характеристиками эталонов-переносчиков, определяемыми их назначением, являются стабильность частотных коэффициентов и КСВН входа. В конце 80-х во ФГУП «ВНИИФТРИ» были разработаны волноводные эталоны-переносчики с КСВН входа не более 1,05. Была выпущена ограниченная партия таких эталонов под названием «Меры возимые МВ-35...МВ-7,2» для волноводов с поперечными размерами от 35×15 до 7,2×3,4 мм. Мерами были оснащены крупные метрологические центры, где они эксплуатируются до настоящего времени. Каждая из возимых мер представляет собой термоэлектрический преобразователь мощности СВЧ, на входе которого установлен развязывающий аттенюатор в виде направленного ответвителя с переходным ослаблением 10 дБ. Для индикации мощности СВЧ совместно с мерами применяется измерительный блок Я2М-66. Основными недостатками таких мер являются значительные масса и габариты, обусловленные использованием волноводных направленных ответвителей.

Поскольку в настоящее время остаётся потребность в хорошо согласованных эталонах-переносчиках мощности СВЧ, были предприняты усилия по разработке альтернативного решения с лучшими массогабаритными характеристиками по сравнению с возимыми мерами МВ-35...МВ-7,2. С этой целью был использован опыт разработки и применения многозондовых проходных преобразователей мощности [2]. Длительная эксплуатация таких преобразователей продемонстрировала высокую стабильность частотных коэффициентов зондов как по модулю, так и по фазе на временных интервалах более 10 лет [3]. Это даёт основание надеяться, что при использовании аналогичных зондов в конструкции преобразователя оконечного типа будет обеспечиваться его стабильность.

Конструкция четырёхзондового преобразователя эталона-переносчика приведена на рис. 1.

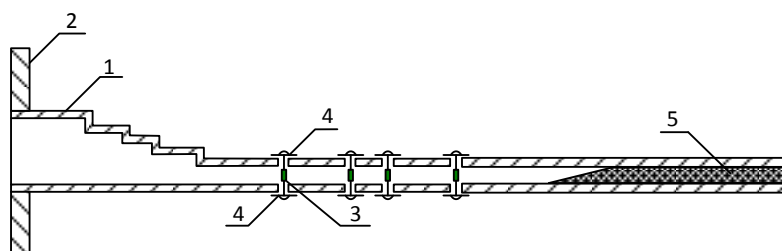


Рис. 1. Многозондовый преобразователь оконечного типа

Волновод 1 стандартизованного типа с фланцем 2 с помощью ступенчатого перехода соединяется с волноводом пониженной высоты, в котором размещаются термисторные зонды 3. Выводы термисторов пропускаются в отверстия в широких стенках волновода и припаиваются к металлическим пластинам 4, образующим с волноводом конструктивные ёмкости. За термисторными зондами располагается поглощающая нагрузка 5. Зонды расположены вдоль средней линии широкой стенки волновода.

Коэффициент отражения входа преобразователя определяется отражениями от всех его элементов — ступенчатого перехода, термисторных зондов и нагрузки. Волноводный переход рассчитывался по методике [4]. Полученные размеры ступенек принимались за первое приближение и уточнялись с помощью компьютерной программы электродинамического моделирования HFSS. В результате КСВН изготовленных переходов от волновода стандартного размера на волновод высотой 1 мм не превышал 1,15.

Расстояния между зондами в первом приближении рассчитывались путём аппроксимации коэффициента отражения решётки зондов полиномом Чебышева второго порядка [5]. При этом потери в зондах и взаимные переотражения между ними не учитывались. Это приемлемо для зондов, мало возмущающих поле в тракте. В нашем случае это условие не выполняется, так как зонды располагаются по центру волновода и имеют заметную проводимость, с тем чтобы в термисторах поглотилась существенная доля мощности СВЧ, падающей на вход преобразователя. Поэтому дальнейшее уточнение расстояний между зондами производилось с помощью разработанной компьютерной программы, в которой каждый термистор рассматривался в виде комплексного шунтирующего сопротивления в линии передачи. Активная и реактивная части этого сопротивления, а также реактивное сопротивление выводов рассчитывались исходя из модели индуктивного стержня в прямоугольном волноводе [6]. В качестве исходных данных для расчёта выступали диаметр и длина термистора, диаметр и длина выводов, сопротивление

термистора постоянному току и диэлектрическая проницаемость материала, из которого он изготовлен.

Каждый из термисторов включается в свой автобалансный термисторный мост, поддерживающий заданное значение сопротивления термистора постоянному току. Мощность СВЧ, поглощённая каждым зондом, измеряется методом замещения мощностью постоянного тока. Для этого производится измерение напряжения постоянного тока на каждом из мостов до и после включения мощности СВЧ. Исходя из полученных значений напряжения, рассчитывается мощность замещения с учётом рабочего сопротивления термистора и резисторов моста.

Преобразователь настраивается на минимальное значение КСВН на фиксированных частотах путём подбора сопротивления термисторов постоянному току. Дополнительным элементом настройки является поглощающая нагрузка, которая при настройке перемещается вдоль волновода и затем фиксируется. Найденные при настройке значения сопротивлений термисторов сохраняются и используются в дальнейшем при работе на данной частоте. На рис. 2 показана частотная зависимость КСВН входа четырёхзондового преобразователя в тракте  $16 \times 8$  мм. Каждая из двенадцати кривых соответствует одной из рабочих частот, на которых была проведена настройка преобразователя. Из рисунка видно, что на всех фиксированных рабочих частотах КСВН преобразователя не превышает 1,03, при условии, что погрешность установки частоты не превышает 0,5 %.

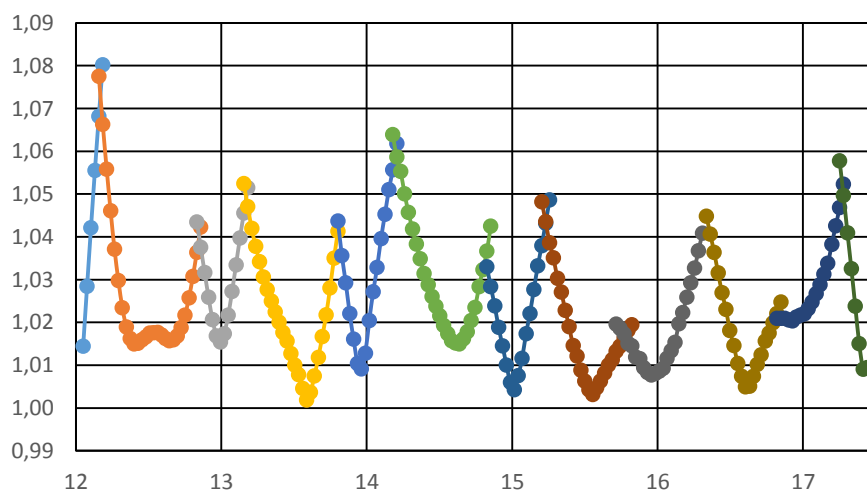


Рис. 2. КСВН входа преобразователя в тракте  $16 \times 8$  мм

Все необходимые операции при настройке и работе эталона-переносчика реализуются с помощью многоканального измерительного блока и соответствующего программного обеспечения, работающего на внешнем персо-

нальном компьютере с операционной системой Windows. Функциональная схема блока приведена на рис. 3.

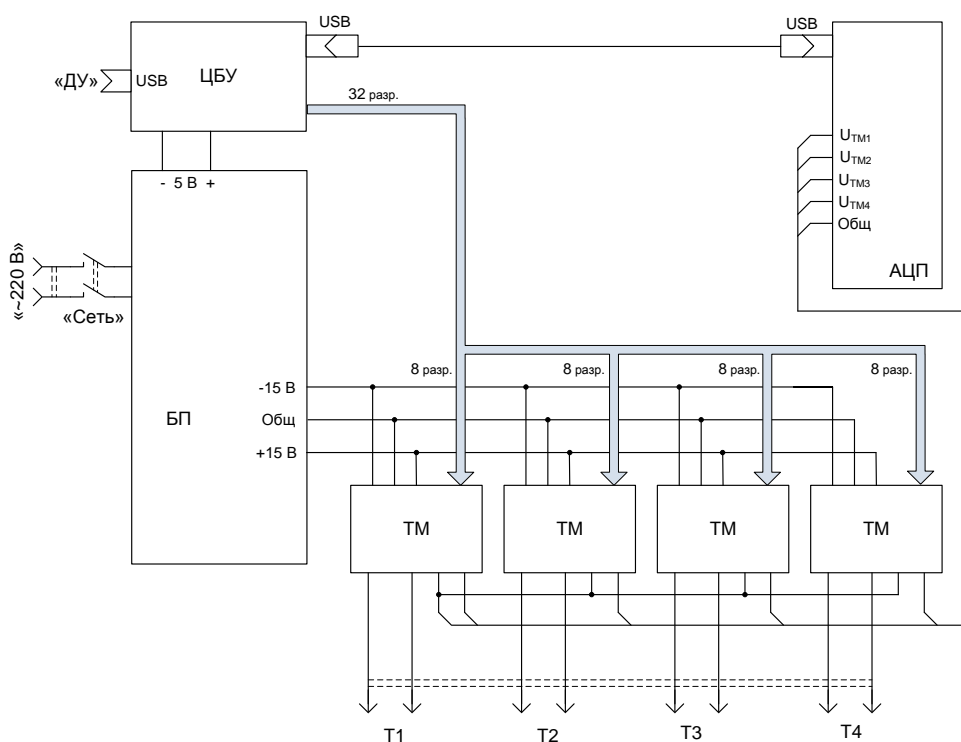


Рис. 3. Блок-схема измерительного блока

Измерительный блок содержит четыре самобалансирующихся термисторных моста ТМ с дистанционно управляемым сопротивлением, четырёхканальный АЦП и цифровой блок управления ЦБУ с контроллером интерфейса USB. Управляющий восьмиразрядный код поступает на каждый из термисторных мостов от блока управления ЦБУ. Блок обеспечивает установку соответствующих выбранной частоте сопротивлений термисторов в диапазоне от 100 до 1500 Ом, разбитом на 256 уровней. Функциональная схема термисторного моста приведена на рис. 4.

Мост представляет собой систему автоматического регулирования, поддерживающую заданное значение сопротивления термистора постоянному току при наличии возмущающих воздействий, к которым относятся изменение внешней температуры и нагрев термистора поглощённой им мощностью СВЧ. В качестве элемента сравнения и регулирования использован операционный усилитель постоянного тока. Управляющим воздействием является выходное напряжение усилителя  $U_M$ . Обратная связь организована в виде двух ветвей, напряжение с которых поступает на разные входы усилителя.

На инвертирующий вход подаётся напряжение с ветви, содержащей резистор  $R_S$  и термистор  $R_T$ . Напряжение на второй вход поступает с сумматора  $\Sigma$ . Напряжение на входы сумматора подаются с двух делителей. Делитель, имеющий коэффициент передачи  $K_2$ , образован резисторами  $R_3$  и  $R_4$ . Этот делитель определяет нижнюю границу диапазона устанавливаемых значений сопротивления термистора. Второй делитель состоит из двух последовательных частей. Первая часть — это резистивный делитель  $R_1$ – $R_2$  с коэффициентом передачи  $K_1$ , с которого сигнал поступает на регулируемый делитель  $D$ . Коэффициент передачи этого делителя изменяется с помощью восьмибитного управляющего сигнала в пределах от 0 до 1. Управляющий сигнал поступает на делитель через оптическую развязку  $OP$ , разделяющую цифровые и аналоговые цепи блока. Коэффициент передачи резистивного делителя  $K_1$  определяет верхнюю границу диапазона устанавливаемых значений сопротивления термистора. В состоянии баланса напряжение между входами усилителя близко к нулю. В этом случае сопротивление термистора  $R_T$  определяется формулами (1). Мощность подогрева термистора  $P_{\text{под}}$  рассчитывается по формуле (2).

$$R_T = R_S \cdot \frac{K}{1-K}; \quad K = K_1 \cdot K_D \cdot K_2; \quad (1)$$

$$P_{\text{под}} = U_M^2 \cdot \frac{R_T}{(R_T + R_S)^2}. \quad (2)$$

С помощью АЦП одновременно измеряется напряжение на четырёх мостах. Измеренные значения напряжений передаются в компьютер, после чего выполняется расчёт суммарной мощности замещения в четырёх термисторах преобразователя.

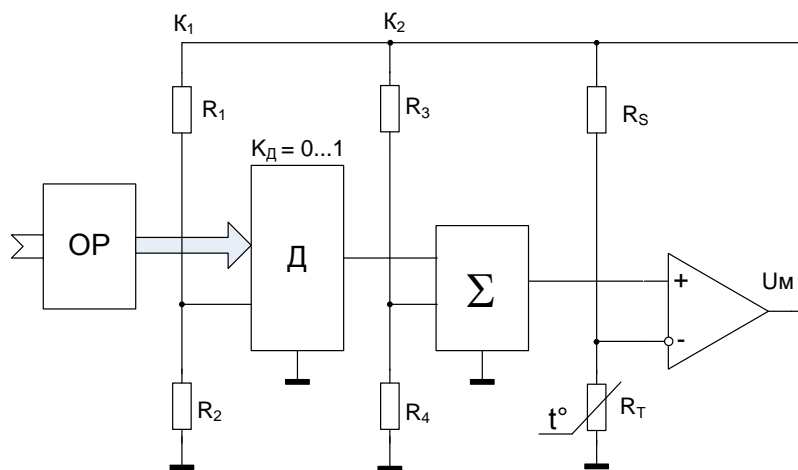


Рис. 4. Функциональная схема термисторного моста

Разработанный и изготовленный образец эталона-переносчика для волноводных трактов от  $35 \times 15$  до  $16 \times 8$  мм обеспечивает КСВН входа преобразователей менее 1,05. Масса и размеры преобразователей существенно меньше массы и размеров преобразователей из комплекта возимых мер МВ-35... МВ-16. Блоки измерительные имеют сравнимые массогабаритные показатели, но блок разработанного эталона-переносчика лучше приспособлен к использованию в современных автоматизированных измерительных системах.

Внешний вид эталона-переносчика на диапазон частот 5,64–17,44 ГГц с комплектом преобразователей и блоком измерительным приведён на рис. 5.

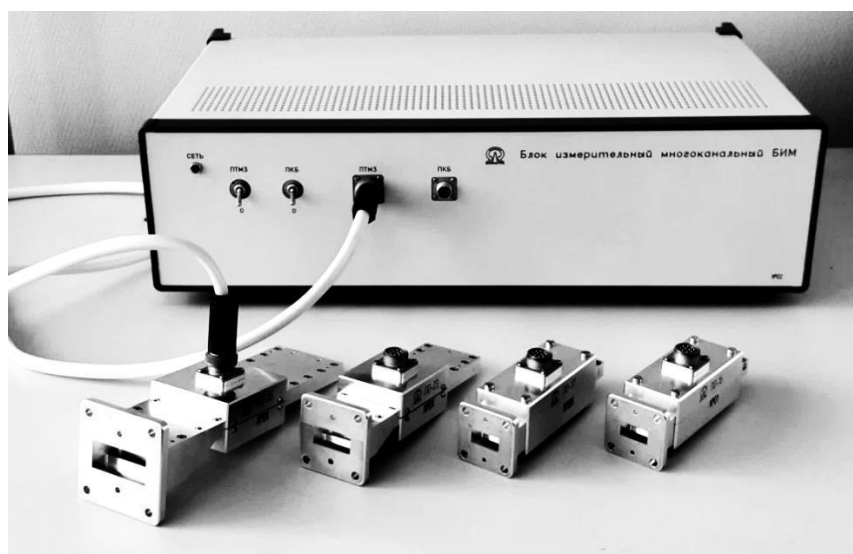


Рис. 5. Эталон переносчик с комплектом преобразователей на диапазон частот 5,64–17,44 ГГц и блоком измерительным

### Литература

1. ГОСТ Р 8.562-2007. Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений мощности и напряжения переменного тока синусоидальных электромагнитных колебаний.
2. Перепёлкин В.А. Микроволновый мультиметр на основе четырёхзондового преобразователя проходящей мощности СВЧ // Измерительная техника. 1994. № 3. С. 57.
3. Механников А.И., Перепёлкин В.А. Долговременная нестабильность многозондовых преобразователей проходящей мощности диапазона СВЧ // Измерительная техника. 1997. № 5. С. 39–40.
4. Механников А.И. Синтез неэквидистантных волноводных устройств // Вопросы радиоэлектроники, серия РТ. 1971. Выпуск I.

5. Механников А.И. Синтез волноводных приёмных преобразователей проходящей мощности // Метрология. 1973. № 4. С. 27–36.
6. Справочник по волноводам / пер. с англ. под ред. Я.И. Фельда. М.: Сов. радио, 1952. 432 с.