

Волноводные термисторные ваттметры оконечного типа в диапазоне частот 16,7–37,5 ГГц

Алексей Игоревич Матвеев

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Московская обл., Россия, mtvv@vniiftri.ru

Аннотация. Для повышения точности передачи мощности электромагнитных колебаний в волноводных трактах в диапазоне частот 16,7–37,5 ГГц разработан многозондовый преобразователь оконечного типа, входящий в состав волноводного термисторного ваттметра. Точность передачи мощности предложено увеличивать путём уменьшения коэффициента отражения входа ваттметров оконечного типа и погрешности рассогласования. Изготовлены и экспериментально исследованы макеты волноводных термисторных ваттметров с многозондовыми преобразователями в диапазоне частот 16,7–37,5 ГГц. Показано, что данные ваттметры можно использовать в качестве возимого и вторичного эталонов для передачи единицы мощности электромагнитных колебаний или как исходное средство измерений в составе рабочих эталонов, а также применять для контроля стабильности модуля эффективного коэффициента отражения выхода ваттметра проходного типа.

Ключевые слова: передача единицы мощности электромагнитных колебаний, волноводные преобразователи, термисторный сверхвысокочастотный зонд

Для цитирования: Матвеев А. И. Волноводные термисторные ваттметры оконечного типа в диапазоне частот 16,7–37,5 ГГц // Измерительная техника. 2022. № 1. С. 58–61. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-1-58-61>

End-of-line waveguide thermistor power meters in the frequency range 16.7-37.5 GHz

Alexey I. Matveev

Russian Metrological Institute of Technical Physical and Radio Engineering Measurements, Mendeleevo, Moscow region, Russia, mtvv@vniiftri.ru

Abstract. The problem of ensuring the uniformity of measurements of the power of electromagnetic oscillations in waveguide paths, which is relevant in the development, maintenance and operation of electronic equipment, is considered. It is proposed to increase the transmission accuracy by reducing the reflection coefficient of the input of the terminal type power meters and reducing the mismatch error. A multi-probe end-type converter has been developed, which is part of a waveguide thermistor wattmeter. The prototypes of waveguide thermistor power meters with multi-probe converters in the frequency range 16.7–37.5 GHz have been manufactured and experimentally investigated. It is shown that this wattmeter can be used as a portable and secondary standards for transmitting the size of a unit of power of electromagnetic oscillations or as an initial measuring instrument as part of working standards, and also used to control the stability of the effective reflection coefficient of the output of a pass-through power meter.

Keywords: transmission of a unit of power of electromagnetic oscillations, waveguide power meter, thermistor microwave probe

Введение. Коаксиальные сверхвысокочастотные (СВЧ) ваттметры работают в широком диапазоне частот 0–67 ГГц. На частотах свыше 18 ГГц рационально применять волноводные измерители мощности, поскольку с увеличением частоты увеличиваются и коэффициент отражения, и погрешность измерений коаксиальных ваттметров. Волноводные термисторные ваттметры используются в диапазоне частот 16,7–37,5 ГГц для измерений мощности и отношения мощностей электромагнитных колебаний на выходе генераторов, передатчиков, а также при градуировке и настройке СВЧ-трактов. В заданном диапазоне частот для измерений применяют два волноводных тракта с сечениями 11×5,5 и 7,2×3,4 мм.

Термисторный ваттметр состоит из термисторного измерителя мощности (измерительного блока) и одного или нескольких первичных термисторных преобразователей, обладающих высокой долговременной стабильностью частотных

коэффициентов на временных интервалах более 10 лет [1]. Долговременная стабильность достигается путём покрытия терморезистора влагостойким лаком или капсулированием в стеклянную оболочку, что позволяет стабилизировать тепловые процессы. Высокая долговременная стабильность термисторных ваттметров также обусловлена использованием метода замещения СВЧ-мощности мощностью постоянного тока, обеспечивающего постоянство рабочего сопротивления термистора при различных параметрах внешней среды и при изменении его характеристик в результате старения. От установленного сопротивления термистора зависит коэффициент отражения входа ваттметров оконечного типа. Повысить точность передачи единицы мощности электромагнитных колебаний можно путём уменьшения коэффициента отражения входа ваттметра оконечного типа.

Цели исследования – уменьшение погрешности передачи мощности электромагнитных колебаний и разработка

термисторного ваттметра оконечного типа с регулируемым коэффициентом отражения входа в диапазоне 0,01–0,33.

Использование многозондовой системы термисторов в преобразователях мощности оконечного типа. С целью снижения модуля коэффициента отражения входа автором настоящей статьи предложено использовать многозондовую систему термисторов в волноводных преобразователях (термисторных ваттметрах) оконечного типа. Применение многозондовой системы термисторов позволяет повысить коэффициент эффективности преобразователя, а также отрегулировать коэффициенты отражения каждого термисторного СВЧ-датчика и преобразователя в целом. Схема преобразователя представлена на рис. 1.

Предложенную многозондовую систему схематично можно разделить на несколько ступенчатых волноводных переходов. В ходе исследования автором разработан волноводно-волноводный ступенчатый переход из стандартного прямоугольного волновода в волновод с узкой стенкой, высота которой меньше высоты узкой стенки стандартного волновода. Такой переход необходим для согласования терморезисторов с измерительным трактом. Переходы симметричны относительно участка волновода с уменьшенной по высоте узкой стенкой. На этом участке волновода расположены чувствительные элементы.

Модуль коэффициента отражения входа преобразователя определяется отражениями от всех его элементов – ступенчатого перехода, терморезистора, а также согласующего элемента [2] или короткозамыкателя. Для дальнейших исследований изготовлен образец ступенчатого перехода волноводного тракта сечением 11×5,5 мм. Получены результаты аналитического расчёта [3] коэффициента отражения ступенчатого перехода. Верификация полученных расчётов проведена с использованием данных электродинамического моделирования и измеренных значений коэффициента отражения изготовленного макета ступенчатого перехода. На рис. 2 приведены рассчитанные и измеренные значения модуля коэффициента отражения $|\Gamma|$ волноводно-волноводного ступенчатого перехода.

Расстояния между термисторными СВЧ-датчиками в первом приближении получены аппроксимацией коэффициента отражения терморезисторов полиномом Чебышёва второго порядка. Расстояния между зондами рассчитаны с помощью разработанной компьютерной программы, основанной на методике [4]: каждый термистор смоделирован в виде комплексного сопротивления в бесконечной идеальной линии передачи. Активная и реактивная части этого сопротивления, а также реактивное сопротивление выводов рассчитаны исходя из модели индуктивного стержня в прямоугольном волноводе. В результате расчёта получены расстояния L_{12} , L_{23} , L_{34} между термисторами (см. рис. 1).

По результатам моделирования изготовлен и исследован макет волноводного многозондового термисторного преобразователя мощности оконечного типа [5]. Для минимизации коэффициента отражения входа [6] на всех рабочих частотах волноводных трактов проведена индивидуальная подстройка рабочего сопротивления каждого из четырёх термисторов. Результаты измерений модуля коэффициента отражения входа макета представлены на рис. 3. Дополнительно для разработанного преобразователя может быть реализована узкополосная

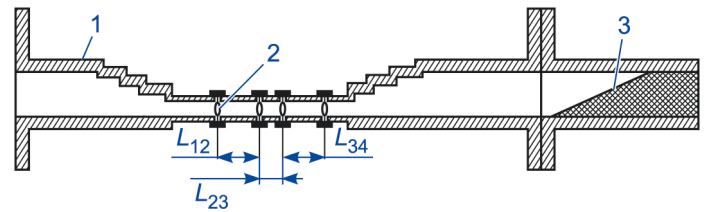


Рис. 1. Схема многозондового термисторного волноводного преобразователя оконечного типа:

1 – волноводный ступенчатый переход; 2 – термисторный СВЧ-зонд; 3 – поглощающий элемент

Fig. 1 Schematic of a multi-probe thermistor waveguide power meter of the terminal type:

1 – waveguide step transition; 2 – thermistor microwave probe; 3 – absorbing element

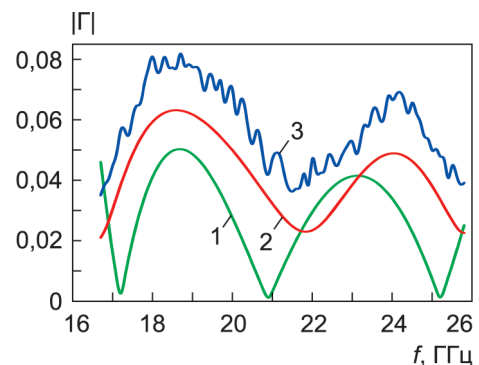


Рис. 2. Рассчитанные аналитическим (1) и энергетическим (2) методами и измеренные (3) значения модуля коэффициента отражения $|\Gamma|$ волноводно-волноводного ступенчатого перехода на примере волноводного тракта сечением 11×5,5 мм

Fig. 2 Values of the modulus of the reflection coefficient $|\Gamma|$ a waveguide-waveguide step transition using the example of a waveguide path with a cross section of 11×5.5 mm, obtained by analytical (1) and electrodynamic (2) calculations, as well as measured values of the waveguide-waveguide step transition (3)

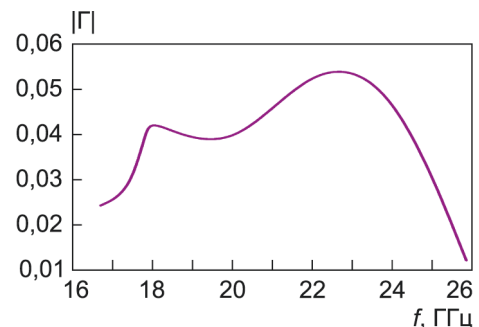


Рис. 3. Модуль коэффициента отражения входа многозондового преобразователя мощности волноводного термисторного оконечного типа

Fig. 3 Reflection coefficient module of the input of a multi-probe power meters of a waveguide thermistor terminal type

настройка коэффициента отражения входа на минимальное (не более 0,01) значение при произвольно заданной частоте волноводного тракта. Для настройки сопротивления термисторов каждый термистор включается в отдельный автобалансный термисторный мост, поддерживающий заданное значение сопротивления термистора постоянному току. СВЧ-мощность, поглощённая каждым термисторным СВЧ-датчиком, измеряется

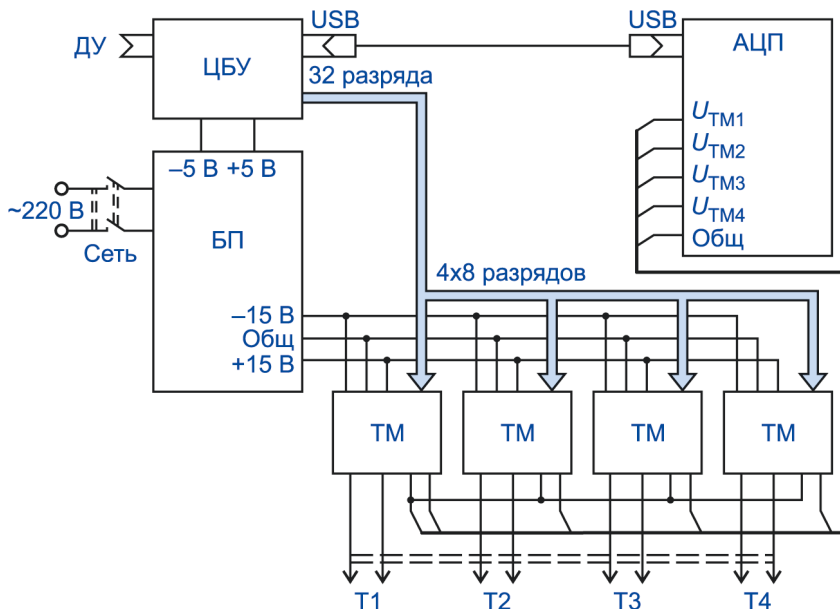


Рис. 4. Блок-схема термисторного измерителя мощности: ДУ – дистанционное управление; ЦБУ – центральный блок управления; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; БП – блок питания; ТМ – термисторный мост; Т1–Т4 – термисторы

Fig. 4. Block diagram of a thermistor power meter: RC – remote control; CCU – central control unit; ADC – analog-to-digital converter; PSU – power supply unit; TB – thermistor bridge; T1–T4 – thermistors

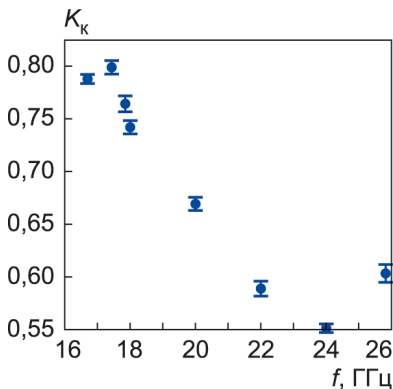


Рис. 5. Калибровочный коэффициент ваттметра оконечного типа волноводного термисторного для тракта 11×5,5 мм

Fig. 5. Calibration coefficient of the end-type waveguide thermistor wattmeter for a path of 11×5.5 mm

методом замещения [7]. Значение СВЧ-мощности термисторного преобразователя рассчитывается с учётом рабочего сопротивления термистора и резисторов моста.

Термисторный измеритель мощности с дистанционно управляемым сопротивлением. В настоящее время не выпускаются необходимые для работы с многозондовыми преобразователями термисторные измерители мощности с четырьмя термисторными мостами с регулируемым сопротивлением. Поэтому разработан и реализован термисторный измеритель мощности с дистанционно управляемым сопротивлением. Такой измеритель может обеспечить работу не только с многозондовыми преобразователями, но и с существующими термисторными преобразователями мощности.

Разработанный термисторный измеритель мощности (рис. 4) содержит четыре самобалансирующихся термисторных моста ТМ с дистанционно управляемым сопротивлением,

четырёхканальный аналого-цифровой преобразователь АЦП и цифровой блок управления ЦБУ с контроллером интерфейса USB. Управляющий восьмиразрядный код поступает на каждый термисторный мост от ЦБУ, который обеспечивает установку сопротивлений термисторов в диапазоне 100–1500 Ом, разделённом на 256 уровней. Напряжение на четырёх мостах одновременно измеряется с помощью АЦП. Измеренные значения напряжений поступают в компьютер, после чего рассчитывается суммарная мощность замещения в четырёх термисторах преобразователя.

Макет термисторного измерителя мощности с разработанными волноводными термисторными преобразователями оконечного типа образует ваттметр оконечного типа. Определены нормируемые метрологические характеристики разработанных ваттметров оконечного и проходного типов – модули коэффициента отражения входа и эффективного коэффициента отражения выхода соответственно, а также нормированы доверительные границы погрешности значений калибровочного коэффициента.

Определение калибровочного коэффициента.

При использовании многозондового термисторного преобразователя для измерения СВЧ-мощности в составе волноводного ваттметра необходимо определить калибровочный коэффициент разработанного макета ваттметра оконечного типа. Калибровочный коэффициент связывает показания ваттметра, выражаемые в виде суммарной мощности замещения четырёх термисторных СВЧ-датчиков, с падающей СВЧ-мощностью на его входе. Для определения калибровочного коэффициента применяют эталонный ваттметр проходного типа (эталонный калибратор мощности), к выходу которого присоединяют калибруемый преобразователь [8].

Значение калибровочного коэффициента K_k определяется по формуле

$$K_k = N_{B.O.} / (P_3 |1 - \Gamma_3 \Gamma_{B.O.}|^2),$$

где $N_{B.O.}$, P_3 – показания волноводного термисторного ваттметра оконечного типа и эталонного калибратора мощности соответственно; $\Gamma_{B.O.}$, Γ_3 – комплексные коэффициенты отражения входа волноводного термисторного преобразователя оконечного типа и эталонного калибратора мощности соответственно.

Если известны только модули коэффициентов $\Gamma_{B.O.}$, Γ_3 , то знаменатель второго множителя формулы принимается за единицу и к составляющим погрешности измерения калибровочного коэффициента добавляется погрешность рассогласования с границами $\pm 2|\Gamma_3||\Gamma_{B.O.}|$. Двумя другими весовыми составляющими погрешности измерения калибровочного коэффициента являются погрешность эталонного калибратора и случайная погрешность из-за неповторяемости потерь во фланцевом соединении [9] при присоединении преобразователя поглощаемой мощности к эталонному калибратору.

Результаты измерений калибровочного коэффициента и доверительные границы погрешности его значений приведены на рис. 5. Доверительные границы относительной погрешности

калибровочного коэффициента волноводного термисторного ваттметра оконечного типа не превышают 1,2 % в диапазоне частот 16,7–37,5 ГГц в случае применения для его поверки эталонного калибратора из состава Государственного первичного эталона единицы мощности электромагнитных колебаний в волноводных и коаксиальных трактах в диапазоне частот от 0,03 до 37,50 ГГц ГЭТ 26-2010 [10]. При поверке с использованием рабочих эталонов относительная погрешность измерений калибровочного коэффициента будет выше, но для достижения погрешности 1,2 % модуль коэффициента отражения входа поверяемого ваттметра должен составлять не более 0,05.

Заключение. Результаты исследований макета волноводного термисторного ваттметра поглощаемой мощности с многозондовой системой термисторов экспериментально подтвердили значительное улучшение его технических характеристик по сравнению с прототипами. Применение многозондовой системы в ваттметрах оконечного типа позволило уменьшить коэффициент отражения входа с 0,33 (для термисторных прототипов без данной системы) до 0,01 и, таким образом, уменьшить в два раза (до 1,2 %) доверительные границы относительной погрешности калибровочного коэффициента. Разработанный ваттметр может быть использован для контроля стабильности модуля эффективного коэффициента ваттметра проходного типа за счёт настройки коэффициента отражения на значение 0,33, а также применён в качестве возможного и вторичного эталонов для передачи размера единицы мощности электромагнитных колебаний в соответствии с ГОСТ Р 8.562-2007 «ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений мощности и напряжения переменного тока синусоидальных электромагнитных колебаний» и в качестве исходного средства измерений в государственных эталонах СВЧ-мощности.

Список источников

1. Механников А. И., Перепелкин В. А. Долговременная нестабильность многозондовых преобразователей проходящей мощности диапазона СВЧ // Измерительная техника. 1997. № 5. С. 39–40.
2. Многозондовый преобразователь мощности оконечного типа: пат. RU 191197 U1 / А. И. Матвеев, В. А. Перепелкин, В. А. Семенов, И. П. Чирков // Изобретения. Полезные модели. 2019. № 22.
3. Механников А. И., Перепелкин В. А. Синтез волноводных приёмных преобразователей проходящей мощности // Метрология. 1973. № 4. С. 27–36.
4. Механников А. И. Теория и расчёт неэквидистантных широкополосных устройств СВЧ: Монография. М.: Издательский сектор ВНИИФТРИ, 1969. 21 с.
5. Матвеев А. И., Перепелкин В. А. Эталоны – переносчики мощности СВЧ в волноводных трактах на основе многозондовых преобразователей // Альманах современной метрологии. 2019. № 2 (18). С. 65–72.

6. Jürg Furrer, Traceable Source Match Calibration of RF & MW Generators, 32nd ANAMET Meeting, October 2009, Teddington, UK. URL: http://resource.npl.co.uk/docs/networks/anamet/members_only/meetings/32/20091016_anamet32_furrer.pdf (дата обращения: 14.12.2021).

7. Билько М. И., Томашевский А. К., Шаров П. П., Баймуратов Е. А. Измерение мощности на СВЧ. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1986. 168 с.

8. Clagu F., A Calibration Service for Reference Standards for Microwave Power, NIST Technical Note 1374, 1995, 109 p. URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/TN/nbstechnicalnote1374.pdf> (дата обращения: 14.12.2021).

9. Чирков И. П. Разработка методов и средств воспроизведения и передачи единицы мощности электромагнитных колебаний в коаксиальных трактах в диапазоне частот от 0,03 до 67 ГГц: дис. канд. техн. наук (ВНИИФТРИ, Москва, 2016).

10. Перепелкин В. А., Семенов В. А., Чирков И. П., Чуйко В. Г. Государственный первичный эталон единицы мощности электромагнитных колебаний в волноводных и коаксиальных трактах в диапазоне частот 0,03–37,5 ГГц // Измерительная техника. 2012. № 1. С. 7–9.

References

1. Mekhannikov A. I., Perepelkin V. A., *Measurement Techniques*, 1997, vol. 40, no. 5, pp. 460–461. <https://doi.org/10.1007/BF02504217>
2. Matveev A. I., Perepelkin V. A., Semenov V. A., Chirkov I. P., Patent RU 191197 U1, *Byull. Izobret.*, no. 22 (2019).
3. Mekhannikov A. I., Perepelkin V. A., *Measurement Techniques*, 1974, vol. 17, no. 6, pp. 1051–1053. <https://doi.org/10.1007/BF00811885>
4. Mekhannikov A. I., *Theory and calculation of non-equidistant broadband microwave devices: Monograph*, Moscow, VNIIFTRI Publishing Sector, 1969, 21 p. (In Russ.)
5. Matveev A. I., Perepelkin V. A., *Al'manac of modern metrology*, 2019, no. 2 (18), pp. 65–72. (In Russ.)
6. Jürg Furrer, Traceable Source Match Calibration of RF & MW Generators, 32nd ANAMET Meeting, October 2009, Teddington, UK, available at: http://resource.npl.co.uk/docs/networks/anamet/members_only/meetings/32/20091016_anamet32_furrer.pdf (accessed: 14.12.2021).
7. Bilko M. I., Tomashevsky A. K., Sharov P. P., Baimuratov E. A., *Revised and supplemented*, 2nd ed., Moscow, Radio i svyaz Publ., 1986, 168 p.
8. Clagu F., *A Calibration Service for Reference Standards for Microwave Power*, NIST Technical Note 1374, 1995, 109 p., available at: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/TN/nbstechnicalnote1374.pdf> (accessed: 14.12.2021).
9. Chirkov I. P., Candidate's dissertation in Technical Sciences (VNIIFTRI, Moscow, 2016).
10. Perepelkin V. A., Semenov V. A., Chirkov I. P., Chuiiko V. G., *Measurement Techniques*, 2012, vol. 55, no. 1, pp. 8–12. <https://doi.org/10.1007/s11018-012-9908-z>

Статья поступила в редакцию 15.11.2021; одобрена после рецензирования 19.11.2021; принята к публикации 25.11.2021.
The article was submitted 15.11.2021; approved after reviewing 19.11.2021; accepted for publication 25.11.2021.