

УДК 621.317.089.6:621.317.784.023

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВОДНЫХ
ПРЕЦИЗИОННЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ
МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН**

В.А. Перепелкин, И.П. Чирков, А.И. Матвеев

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

Аннотация. Приведены результаты исследований волноводных прецизионных термоэлектрических преобразователей в режиме непрерывного автоматического замещения мощности СВЧ мощностью постоянного тока. Результаты получены путём измерений в микрокалориметре и методом компарирования с эталонными болометрическими преобразователями.

Ключевые слова: мощность, термоэлектрический преобразователь, сверхвысокая частота.

**INVESTIGATION OF WAVEGUIDE PRECISION
THERMOELECTRIC POWER SENSORS
OF THE MILLIMETER WAVELENGTH RANGE**

V.A. Perepelkin, I.P. Chirkov, A.I. Matveev

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

Annotation. The results of investigations of waveguide precision thermoelectric power sensors in the mode of continuous automatic substitution of microwave power by DC power are presented. The results were obtained by measurements in a microcalorimeter and by the method of comparison with standard bolometric power sensors.

Key words: power, thermoelectric power sensor, microwave.

В ведущих метрологических центрах мира для воспроизведения мощности СВЧ применяются термисторные преобразователи, аттестуемые по коэффициенту эффективности в микрокалориметре. Преобразователи используются в режиме замещения мощности СВЧ мощностью постоянного тока, что позволяет обеспечить прослеживаемость единицы мощности СВЧ к основным единицам СИ — напряжению и сопротивлению на постоянном токе. За рубежом, как правило, используются термисторные преобразователи серийного промышленного исполнения. Хотя эти преобразователи уже давно сняты с производства, их стабильность и надёжность в течение многих лет обеспечивают их успешное применение в национальных эталонах мощности СВЧ

в частотном диапазоне от десятков МГц до 50 ГГц. Термисторные преобразователи миллиметрового диапазона длин волн (частоты от 50 до 170 ГГц) также давно сняты с производства и стали большой редкостью. Кроме того, их характеристики зачастую не соответствуют требованиям, предъявляемым к эталонным преобразователям. Во многих экземплярах наблюдается паразитное излучение мощности СВЧ, частотная характеристика сильно изрезана и на отдельных участках частотного диапазона носит резонансный характер. Кроме того, преобразователи плохо согласованы с трактом СВЧ, КСВН достигает величины 2 и более. Эти и другие причины, связанные с эксплуатационными характеристиками, вызвали интерес разработчиков как рабочих средств измерений, так и эталонной аппаратуры к термоэлектрическим преобразователям мощности СВЧ.

В настоящее время ведущими мировыми производителями средств измерений, такими, например, как Keysight, Rohde & Schwarz, Anritsu, выпускается широкая номенклатура термоэлектрических преобразователей для различных трактов СВЧ в широком диапазоне частот. Одновременно к термоэлектрическим преобразователям стали проявлять интерес и сотрудники национальных метрологических лабораторий как в РФ (СССР), так и за рубежом с целью использования их в качестве исходных средств в составе национальных эталонов мощности СВЧ [1, 2]. Для того, чтобы эти преобразователи могли быть аттестованы в микрокалориметре, они подвергались доработке, которая заключалась в удалении из них электронных блоков первичной обработки сигнала термодпары и части элементов конструкции с целью уменьшения массы преобразователя. Электронные блоки удалялись из-за того, что они выделяют тепло, которое мешает правильной работе микрокалориметра, работающего с изменениями температуры порядка нескольких тысячных долей градуса.

Идя навстречу запросам метрологов, фирма Rohde & Schwarz разработала линейку термоэлектрических преобразователей NTSxxT/TWG, позиционирующихся в качестве эталонов-переносчиков при проведении метрологических работ. Преобразователи выполнены на основе термоэлектрических преобразователей NRPxxT/TWG, из которых удалены элементы, обеспечивающие интерфейс пользователя (усилитель постоянного тока, микроконтроллер, интерфейс USB), а выводы термодпары, калибровочного нагревателя и датчика температуры корпуса выведены на внешний разъём. К этому разъёму при необходимости может подключаться удалённая из преобразователя электроника, оформленная в виде отдельного блока обработки с интерфейсом USB.

Коэффициент эффективности преобразователей NRPxxT/TWG может быть определён в микрокалориметре, при условии реализации замещения мощности СВЧ мощностью постоянного тока. Способ реализации метода замещения может быть различен. Мощность СВЧ и мощность постоянного тока могут воздействовать на преобразователь поочерёдно при условии, что напряжение на выходе термодпары одинаково в обоих случаях. Этот способ был использован специалистами Национальной лаборатории РТВ и Rohde &

Schwarz (Германия) при определении коэффициента эффективности прототипов преобразователей NTS110TWG в микрокалориметре РТВ в волноводном тракте WR10 [3, 4]. Второй способ аналогичен методу замещения, применяемому к термисторным преобразователям, и предполагает одновременное воздействие на преобразователь мощности СВЧ и мощности постоянного тока при условии постоянства выходного напряжения термопары. Второй способ, по нашему мнению, предпочтителен, так как требует меньшего времени на измерение (более чем в два раза) и достаточно просто может быть автоматизирован с применением системы автоматического регулирования, поддерживающей заданное значение выходного напряжения термопары путём изменения мощности постоянного тока, поступающего в нагреватель. Указанные преимущества второго способа реализации метода замещения наиболее очевидно проявляются при работе в микрокалориметре, так как процесс установления показаний датчика температуры микрокалориметра длится несколько десятков минут. При этом процесс аттестации преобразователей на достаточно большом ряде частот может быть полностью автоматизирован и в течение длительного времени не требует участия оператора.

Метод автоматического непрерывного замещения мощности СВЧ мощностью постоянного тока был использован в лаборатории измерения мощности СВЧ ВНИИФТРИ при исследовании двух образцов термоэлектрических преобразователей NTS110TWG, любезно предоставленных фирмой Rohde & Schwarz в рамках научно-технического сотрудничества.

Исследования характеристик термоэлектрических преобразователей NTS110TWG проводились в режиме непрерывного автоматического замещения мощности СВЧ мощностью постоянного тока. Функциональная схема установки, реализующей метод замещения, приведена на рис. 1. Мощность подогрева постоянного тока $P_{\text{под}}$, рассеиваемая в нагревателе, измеряется с помощью цифрового вольтметра 34420A, имеющего два измерительных входа. На один вход подаётся напряжение на нагревателе U_1 , на второй — напряжение U_2 , снимаемое с прецизионного резистора R_0 , через который протекает ток подогрева.

Значения U_1 и U_2 считываются персональным компьютером РС, который производит вычисление сопротивления нагревателя $R_{\text{наг}}$ и мощности подогрева $P_{\text{под}}$.

$$R_{\text{наг}} = R_0 \cdot \frac{U_1}{U_2}; \quad P_{\text{под}} = \frac{U_1 \cdot U_2}{R_0}. \quad (1)$$

Величина мощности подогрева задаётся источником опорного напряжения REF, выполненного на микросхеме AD780 с резистивным делителем. Напряжение на выходе источника REF определяется исходя из требуемой величины мощности подогрева и чувствительности преобразователя по нагревателю постоянного тока S_{DC} .

$$U_{REF} = S_{DC} \cdot P_{\text{под}}. \quad (2)$$

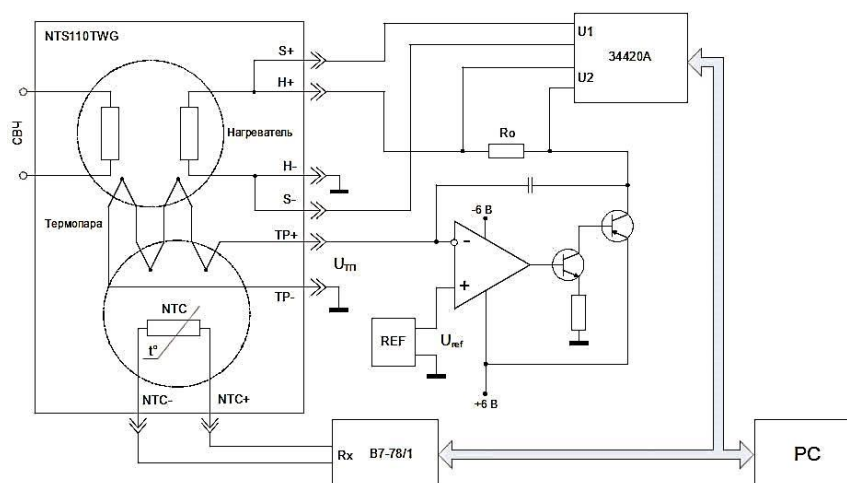


Рис. 1. Схема реализации метода замещения и контроля параметров преобразователя NTS110TWG

Температура корпуса преобразователя контролируется с помощью встроенного терморезистора NTC с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС). Сопротивление терморезистора R_{NTC} измеряется мультиметром В7-78/1. Значения R_{NTC} в омах считываются компьютером PC, и производится вычисление температуры корпуса преобразователя $t_{пр}$ по формуле (3), предложенной производителем применённого в преобразователе терморезистора:

$$t_{пр} (^{\circ}\text{C}) = \frac{1}{9,331719 \cdot 10^{-4} + (2,213984 \cdot 10^{-4} + 1,263797 \cdot 10^{-7} \cdot \ln R_{NTC} \cdot \ln R_{NTC}) \cdot \ln R_{NTC}} - 273. \quad (3)$$

При исследовании характеристик преобразователей NTS110TWG в режиме автоматического замещения мощности СВЧ мощностью постоянного тока определялись следующие параметры:

1. Калибровочный коэффициент K_K в диапазоне частот 75–118 ГГц. Коэффициент K_K связывает мощность СВЧ, падающую на вход преобразователя $P_{пад}$, с мощностью замещения $P_{зам}$ постоянного тока в нагревателе преобразователя.

$$P_{пад} = \frac{P_{зам}}{K_K}. \quad (4)$$

2. Коэффициент эффективности $K_{Э}$ в диапазоне частот 78–115 ГГц. Коэффициент $K_{Э}$ связывает мощность СВЧ, поглощённую в преобразователе $P_{погл}$, с мощностью замещения $P_{зам}$ постоянного тока в нагревателе преобразователя.

$$P_{погл} = \frac{P_{зам}}{K_{Э}}. \quad (5)$$

3. Коэффициент стоячей волны входа преобразователя КСВН в диапазоне частот 75–118 ГГц.
4. Зависимость калибровочного коэффициента K_K от мощности подогрева $P_{\text{под}}$.
5. Зависимость калибровочного коэффициента K_K от температуры корпуса преобразователя t_k (°C).

Исследования характеристик преобразователей по всем пунктам кроме 4 выполнялись при уровне мощности подогрева равном 24 мВт. Температура окружающего воздуха в помещении находилась в пределах 23 ± 2 °C.

Значения калибровочного коэффициента K_K определялись на фиксированных частотах путём сравнения с болометрическими преобразователями, аттестованными по коэффициенту эффективности в микрокалориметре. Расширенная неопределённость результатов измерения K_K не превышает 1,2 % при коэффициенте охвата 2. Результаты измерений приведены на рис. 2.

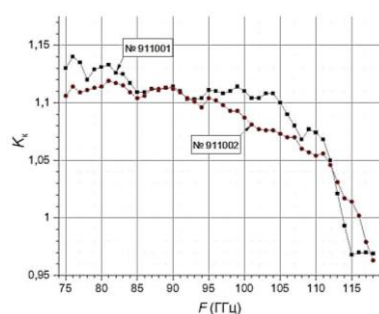


Рис. 2. Калибровочный коэффициент K_K

КСВН преобразователей измерялся с помощью автоматического анализатора цепей ZVA67 с модулем расширения частотного диапазона ZVA-Z110. Результаты измерений приведены на рис. 3.

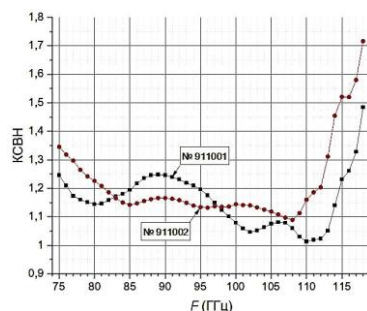
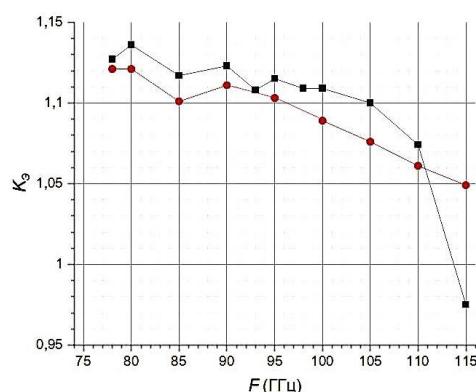


Рис. 3. КСВН входа преобразователей

Коэффициент эффективности преобразователей NTS110TWG определялся на фиксированных частотах непосредственно в микрокалориметре в тракте WR10. Расширенная неопределённость результатов измерения коэффициента эффективности $K_{\text{Э}}$ не превышает 0,9 % при коэффициенте охвата 2. Результаты измерений приведены на рис. 4.

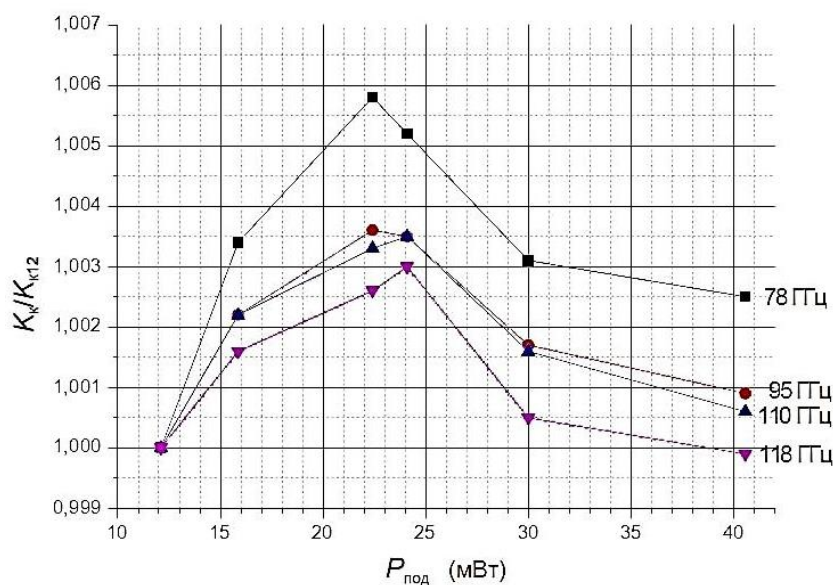
Рис. 4. Коэффициент эффективности $K_{\text{э}}$

Количество частот, на которых определялся коэффициент эффективности в микрокалориметре, заметно меньше количества частот, на которых определялся калибровочный коэффициент. Это связано с существенно большими временными затратами на проведение измерений в микрокалориметре по сравнению с измерениями методом компарирования с болометрическими преобразователями. Время установления показаний термодатчика микрокалориметра для преобразователей NTS110TWG (масса — 77,8 г) составляет 80 минут. При аттестации в микрокалориметре болометрических преобразователей (масса — 15,5 г) это время составляет 20 минут. Для сравнения на рис. 5 приведён внешний вид преобразователя NTS110TWG и болометрического преобразователя ПБП-WR10.

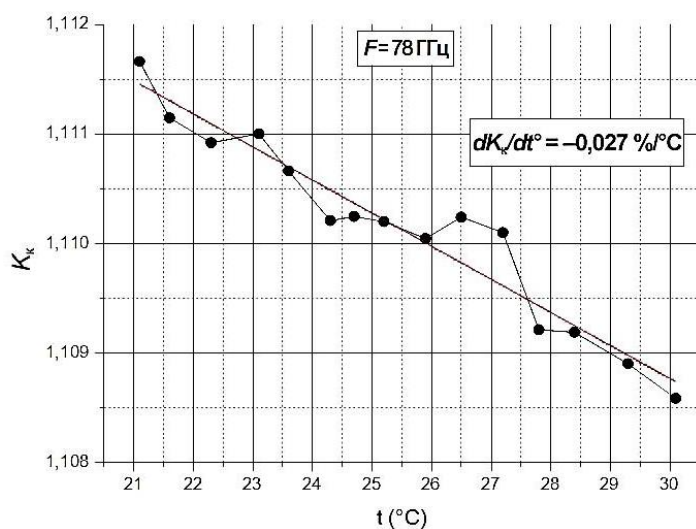


Рис. 5. Внешний вид преобразователей ПБП-WR10 и NTS110TWG

Зависимость калибровочного коэффициента $K_{\text{К}}$ от мощности подогрева $P_{\text{под}}$ определялась путём компарирования с болометрическим преобразователем. На рис. 6 представлено изменение калибровочного коэффициента $K_{\text{К}}$ преобразователя № 911002 на четырёх частотах относительно значения калибровочного коэффициента $K_{\text{К}12}$ при мощности подогрева 12 мВт.

Рис. 6. Зависимость K_K от мощности подогрева $P_{\text{под}}$

Зависимость калибровочного коэффициента K_K от температуры корпуса преобразователя t_k ($^{\circ}\text{C}$) определялась на двух частотах путём компарирования с болометрическим преобразователем. Температура корпуса измерялась с помощью встроенного в преобразователь терморезистора. На рис. 7 и 8 приведена зависимость калибровочного коэффициента преобразователя № 911002 от температуры корпуса для частот 78 и 110 ГГц.

Рис. 7. Зависимость K_K преобразователя от температуры корпуса на частоте 78 ГГц

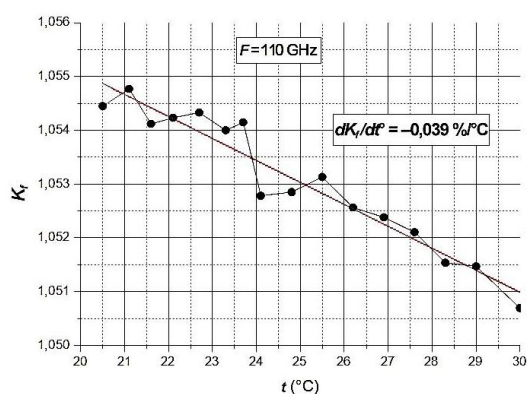


Рис. 8. Зависимость K_K преобразователя от температуры корпуса на частоте 110 ГГц

Проведённые исследования преобразователей подтверждают обоснованность их позиционирования в качестве эталонов-переносчиков для проведения метрологических работ. По нашему мнению, наиболее востребованным будет их применение в качестве возимых эталонов при международных сличениях. Используемые до настоящего времени для этих целей термисторные преобразователи миллиметрового диапазона не обладают в полной мере необходимыми техническими и метрологическими характеристиками — хорошим согласованием с трактом, достаточно ровными частотными зависимостями калибровочного коэффициента и КСВН, долговременной стабильностью основных параметров. Кроме того, преобразователи NTS110TWG могут быть с успехом использованы в качестве исходных средств измерения в национальных эталонах мощности СВЧ миллиметрового диапазона длин волн.

Список литературы

1. Колотыгин С.А., Конькова Л.Т., Чуйко В.Г. Измерение коэффициента эффективности коаксиального термопреобразователя в микрокалориметре на частотах до 18 ГГц // Измерительная техника. — 1979. — № 10. — С. 63–65.
2. Vollmer E., Ruhaak J., Janik D., Peinelt W., Butz W., Stumper D. Microcalorimeter Measurement of the Effective Efficiency of Microwave Power Sensors Comprising Thermocouples // CPEM DIGEST (Conference on precision electromagnetic measurements). — 1994. — P. 147–148.
3. Judaschke R.H., Kuhlmann K., Perndl W. and Reichel T. A W-band thermoelectric power transfer standard // CPEM DIGEST (Conference on precision electromagnetic measurements). Brazil, Rio de Janeiro, Aug. 2014. — P. 756–757.
4. Judaschke R., Kuhlmann K., Reichel T.M., Perndl W. Millimeter-wave thermoelectric power transfer standard // IEEE. Trans. Instrum. Meas. Dec. — 2015. — V. 64. — No. 12. — P. 3444–3450.

Статья поступила в редакцию: 26.03.2021 г.

Статья прошла рецензирование: 16.04.2021 г.

Статья принята в работу: 23.04.2021 г.

Альманах современной метрологии, 2021, № 2 (26)