

УДК 621.372.2

К.И. Кисиленко, А.В. Прядилов, Е.П. Тимофеев

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ ИЗМЕРЕНИЯ СВЧ МОЩНОСТИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены результаты моделирования и расчета термоэлектрических датчиков измерения СВЧ мощности. Моделирование, расчет и оптимизация электрических параметров и конструкций датчика проводился с помощью пакета программ численного моделирования. Моделирование устройства в диапазоне 0,3–36 ГГц позволило получить оптимальную конструкцию датчика измерителя СВЧ мощности.

Ключевые слова: измерение мощности, термоэлектрические датчики, СВЧ диапазон, моделирование, САПР, HFSS.

Введение

Развитие современной науки и техники требует непрерывного совершенствования радиоизмерительных средств, расширения их динамического и частотного диапазонов, повышения точности. Среди большого разнообразия радиоизмерений важнейшим является измерение мощности в широком диапазоне частот. При этом хорошо известно, что в СВЧ диапазоне измерение напряжения и тока затруднительно, так как сопровождается появлением значительных частотных погрешностей, а измерение напряжения и тока в волноводных трактах при некоторых типах волн вообще теряет смысл. В связи с этим на частотах, начиная с десятков мегагерц, непосредственное измерение мощности становится предпочтительным и более точным видом измерений, а на частотах свыше 1000 МГц – единственным, однозначно характеризующим интенсивность электромагнитных колебаний.

Одним из непосредственных методов измерения СВЧ мощности является термоэлектрический метод [1], который заключается в измерении термоэдс высокочастотных дифференциальных термопар прямого или косвенного нагрева, возникающей в результате рассеяния в них СВЧ мощности. При этом величина образуемой термоэдс пропорциональна поглощенной термопарой СВЧ мощности. Причем несмотря на то, что термоэлектрический метод так же, как и болометрический, применяется в основном для измерения малых уровней мощности, он имеет ряд значительных преимуществ. Так как величина термоэдс почти не зависит от окружающей температуры, в термоэлектрических ваттметрах схемы и узлы для температурной компенсации имеют второстепенное значение. Приемные преобразователи термоэлектрического ваттметра не требуют длительного времени прогрева. Основным элементом термоэлектрического преобразователя ваттметра является СВЧ термопара (блок термопар). Материалы для ветвей термопар выбираются из расчета обеспечения линейности, минимального температурного коэффициента сопротивления и высокой чувствительности.

В данной статье рассматривается разработка термоэлектрических измерительных преобразователей СВЧ мощности для коаксиального тракта, работающих в диапазоне частот 0.3-36 ГГц [2,3]. В конструкции преобразователей применяются батареи термопар висмут-сурьма косвенного подогрева. Коэффициент преобразования одной термопары $K = 100 \frac{\text{мкВ}}{\text{°C}}$.

Нагревательный элемент, являясь согласованной нагрузкой для коаксиального тракта (низкое значение КСВн), должен обеспечивать эффективный и сосредоточенный нагрев «горячих» спаев термопар.

В качестве подложки, несущей нагревательный элемент и батарею термопар, используется полиимидная пленка толщиной 40 мкм. Благодаря малой толщине, такая пленка не препятствует нагреву «горячих» спаев расположенных под нагревательным элементом, а ее низкая теплопроводность (около $0,25 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot^\circ\text{C}}$) позволяет уменьшить длину ветвей термопар, на которых из области нагрева выносятся «холодные» спаи.

Модель датчика для измерителя мощности СВЧ диапазона с прямоугольным нагревательным элементом

В ходе разработки были проанализированы две конструкции измерительных преобразователей. Первая – с прямоугольным нагревательным элементом – показана на рис. 1 и рис. 2.

Как было отмечено, все функциональные элементы датчика измерителя мощности, а именно термопары и нагревательный резистор выполняются на подложке из полиимидной пленки путем вакуумного напыления. Предусмотрены также контактные площадки для подачи входного сигнала и снятия термоэдс.

На рис. 1 показан вид снизу прецизионной печатной платы датчика измерителя мощности. Подложка 1 на рисунке полупрозрачна, чтобы было видно функциональные элементы на обеих сторонах платы и их взаимное расположение.

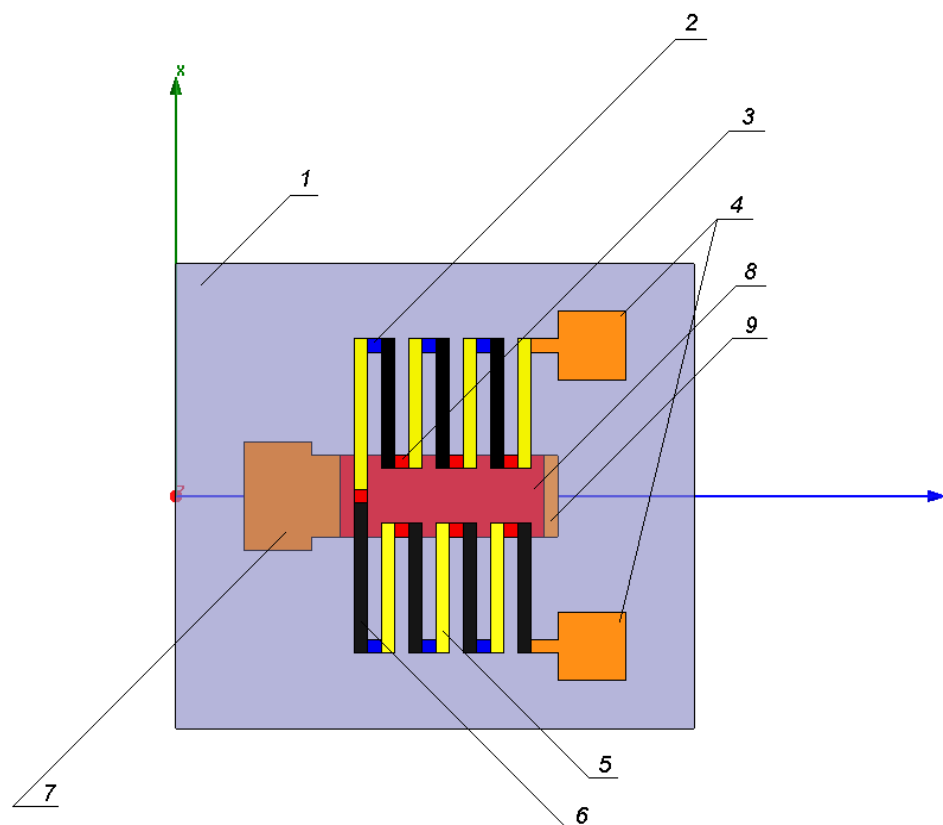


Рис. 1. Вид снизу прецизионной печатной платы датчика измерителя мощности

Обозначения на рис. 1: 1 – полиимидная подложка; 2 – «холодный» спай термопары (место соединения двух соседних термопар); 3 – «горячий» спай термопары; 4 – контактные площадки для снятия термоэдс батареи последовательно соединенных термопар; 5 – сурьма; 6 – висмут; 7 – контактная площадка для подачи входного сигнала (расположена с обратной

стороны платы); 8 – нагревательный элемент (расположен с обратной стороны платы); 9 – контактная площадка корпуса (расположена с обратной стороны платы).

На нижней стороне платы расположена батарея из семи последовательно соединенных термопар висмут – сурьма. Их «горячие» спаи 3 находятся под нагревательным элементом 8, который сформирован на верхней стороне платы. «Холодные» спаи 2 вынесены в стороны от нагревателя и имеют температуру, близкую к температуре окружающей среды, что создает разность температур «горячих» и «холодных» спаев. Контактные площадки 4 выполняются из меди, соединяются с выходом батареи термопар и служат для снятия термоэдс.

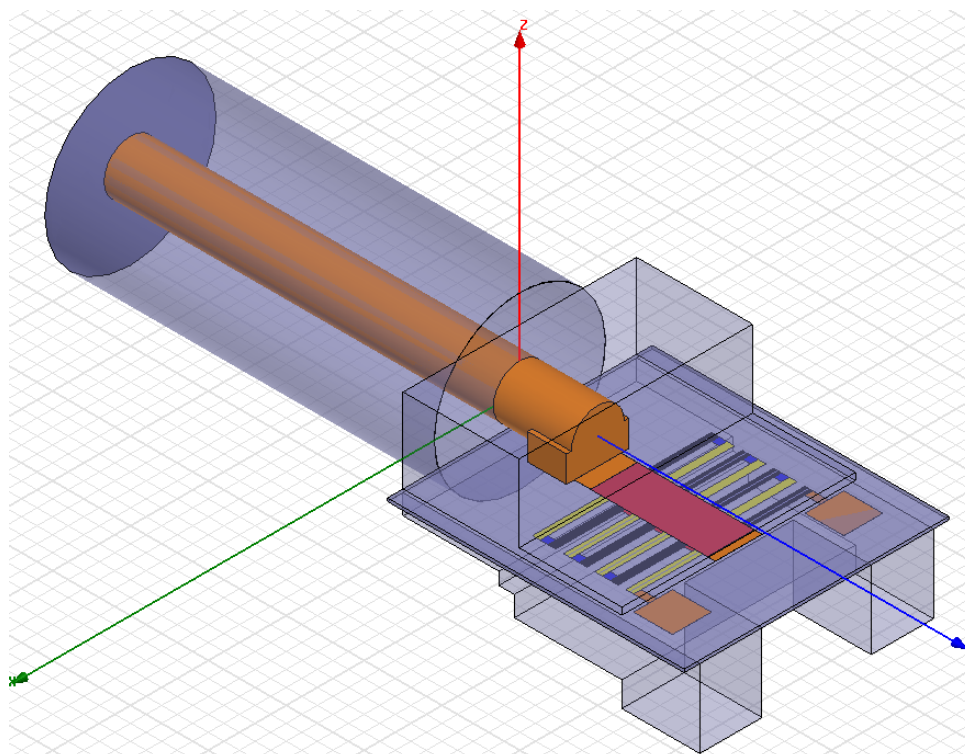


Рис. 2. Общий вид модели датчика измерителя мощности

Прецизионная плата датчика измерителя мощности располагается в металлическом корпусе, внутренняя полость которого показана на рис. 2. Сложная форма полости требуется для обеспечения широкополосного согласования и расположения конструктивных элементов.

Модель датчика для измерителя мощности сигналов СВЧ диапазона с раздвоенным нагревательным элементом

Вторая конструкция – с раздвоенным нагревательным элементом. Она показана на рис. 3 и рис. 4. Функциональные элементы и их назначение те же, что и в предыдущем случае, однако нагревательный элемент здесь состоит из двух резисторов, включенных параллельно.

На рис. 3 обозначено: 1 – полиимидная подложка; 2 – отверстие под металлический штифт, центрирующую подложку; 3 – контактная площадка корпуса (расположена с обратной стороны платы); 4 – контактная площадка для подачи входного сигнала (расположена с обратной стороны платы); 5 – раздвоенный нагревательный элемент (расположен с обратной стороны платы); 6 – «холодный» спай термопары (место соединения двух соседних термопар); 7 – «горячий» спай термопары; 8 – сурьма; 9 – висмут; 10 – контактные площадки для снятия термоэдс батареи последовательно соединенных термопар (под микросварку).

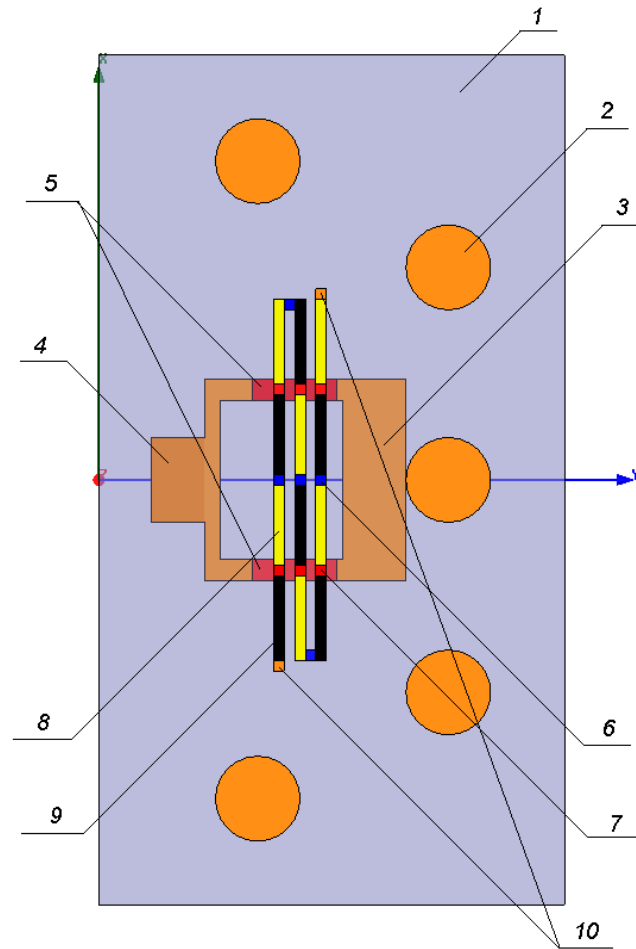


Рис. 3. Вид снизу прецизионной печатной платы датчика измерителя мощности

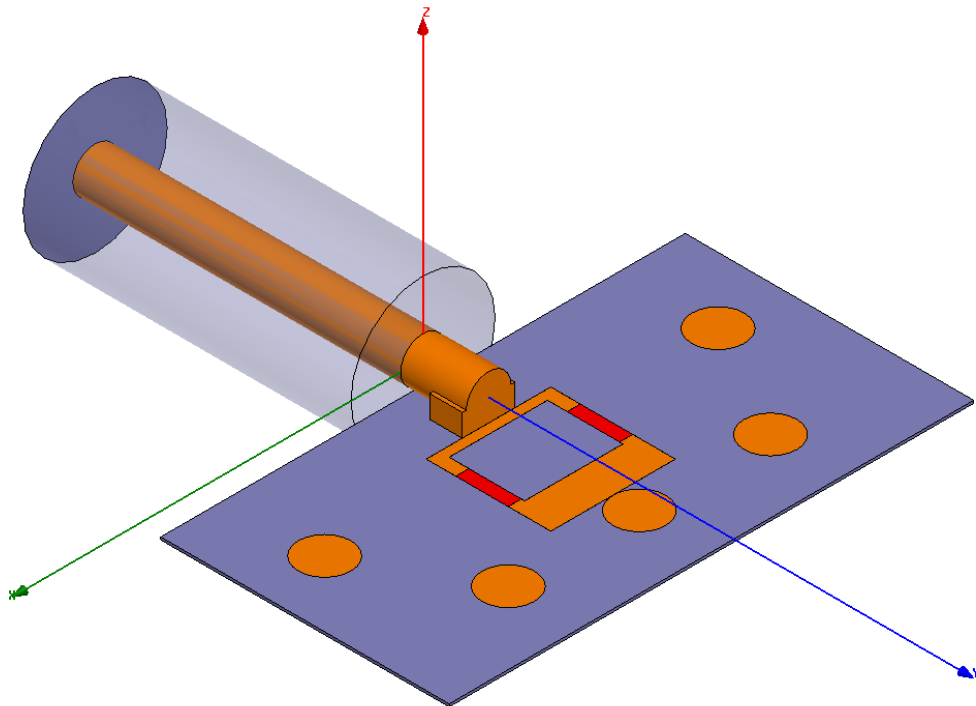


Рис. 4. Общий вид модели датчика измерителя мощности

Расчет параметров конструкций методами численного моделирования

Расчеты основных параметров данных конструкций измерительных преобразователей в среде AnsysHFSS [4] дают следующие результаты.

КСВн измерительных преобразователей в диапазоне 0,3 – 36 ГГц.

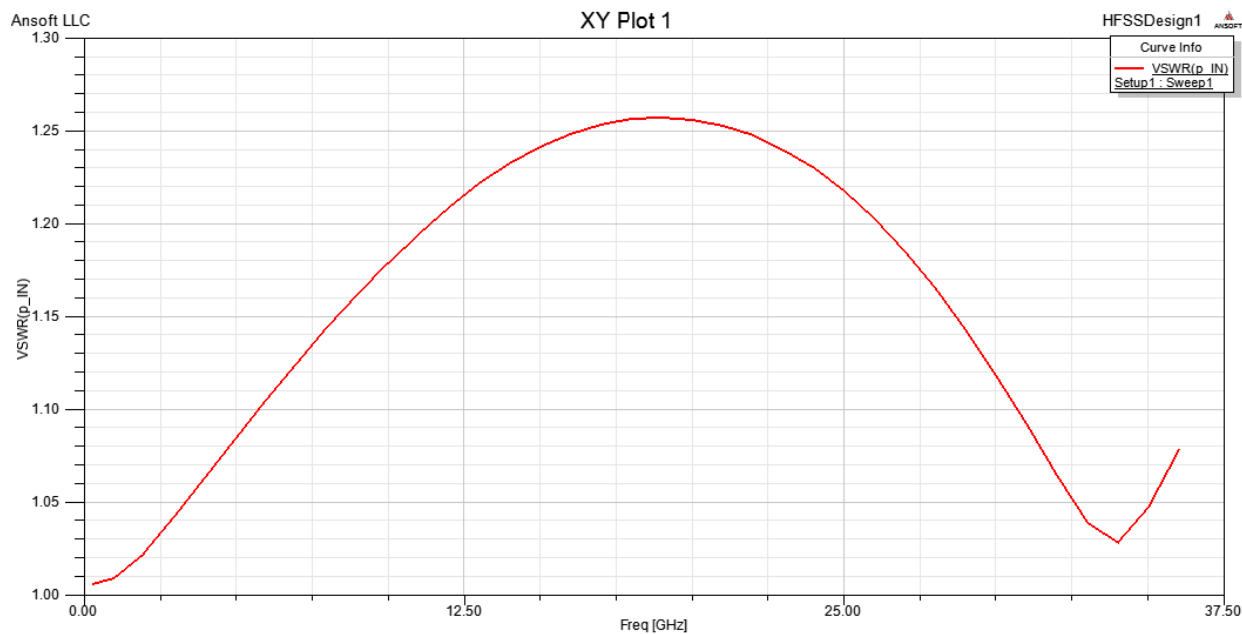


Рис.5. КСВн преобразователя с прямоугольным нагревательным элементом

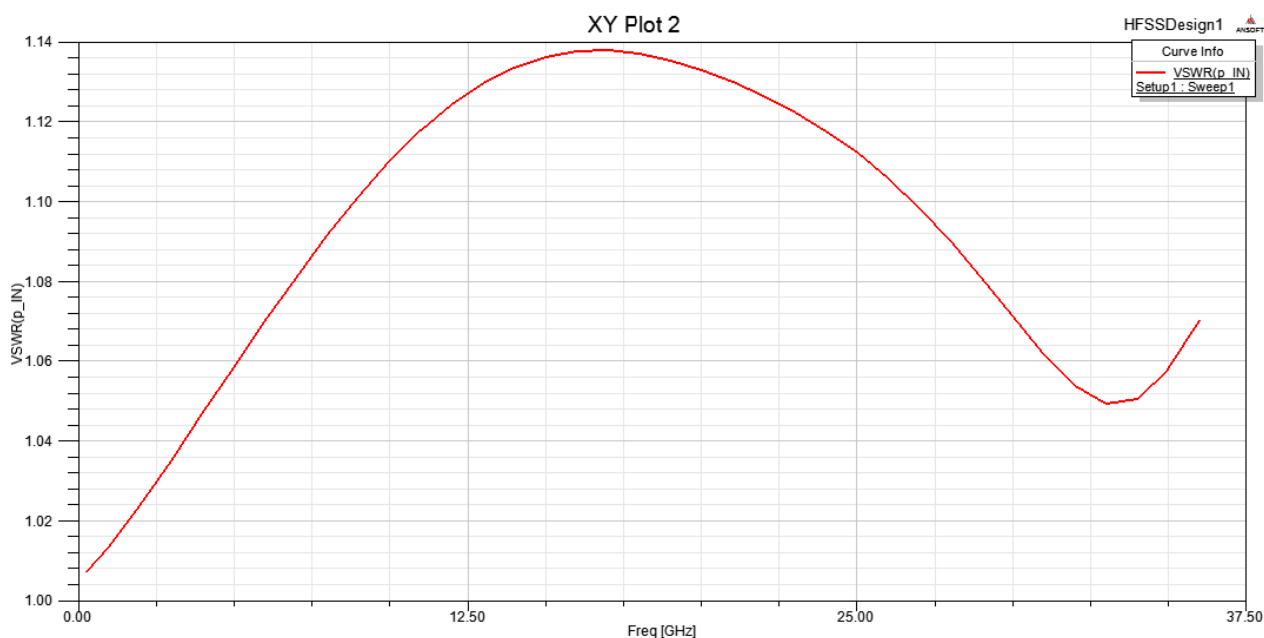


Рис. 6. КСВн преобразователя с раздвоенным нагревательным элементом

Распределение температуры по термопарам на частотах 0,3 ГГц, 18 ГГц и 36 ГГц.

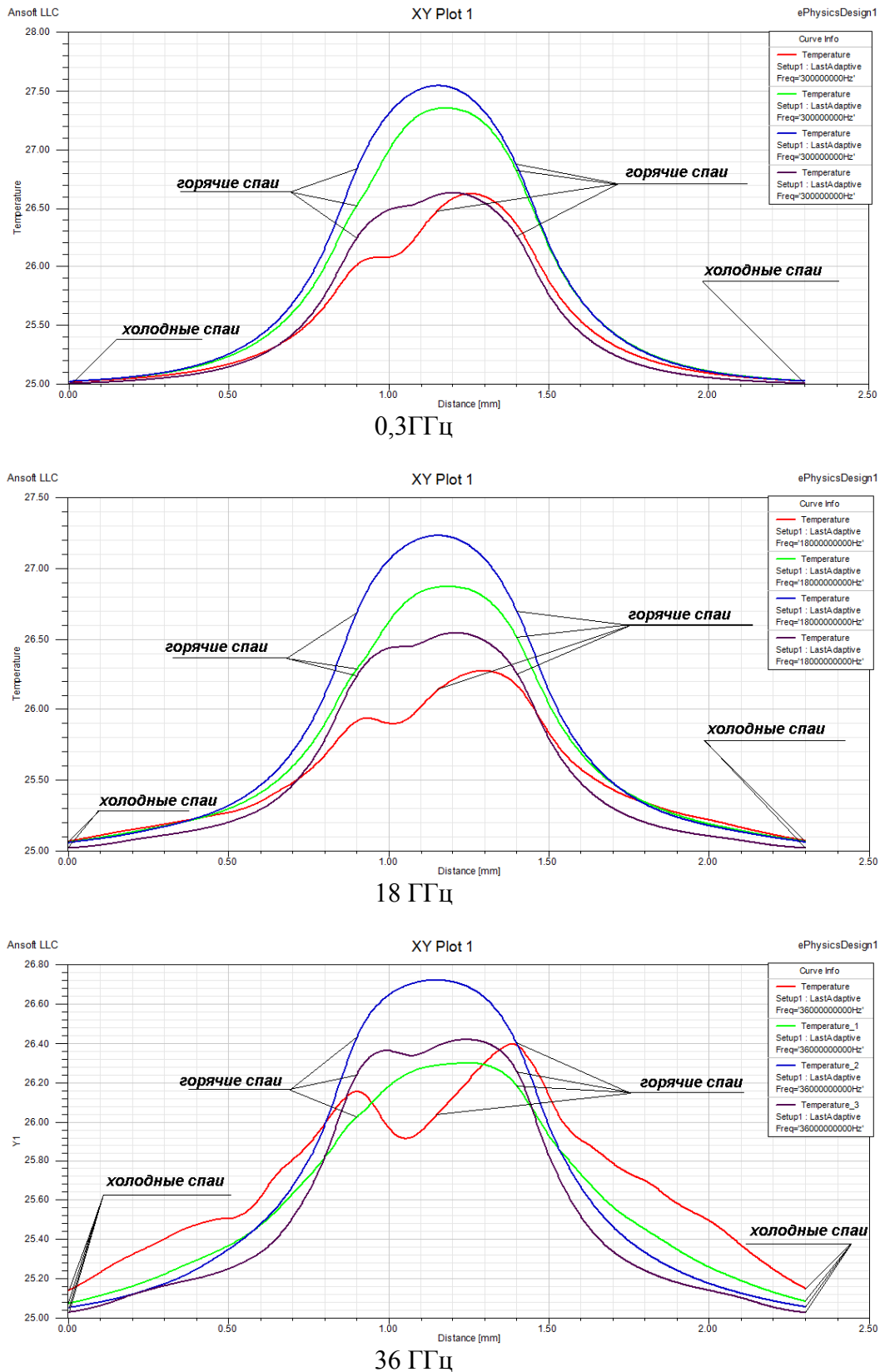


Рис. 7. Распределение температуры по термопарам в конструкции с прямоугольным нагревательным элементом

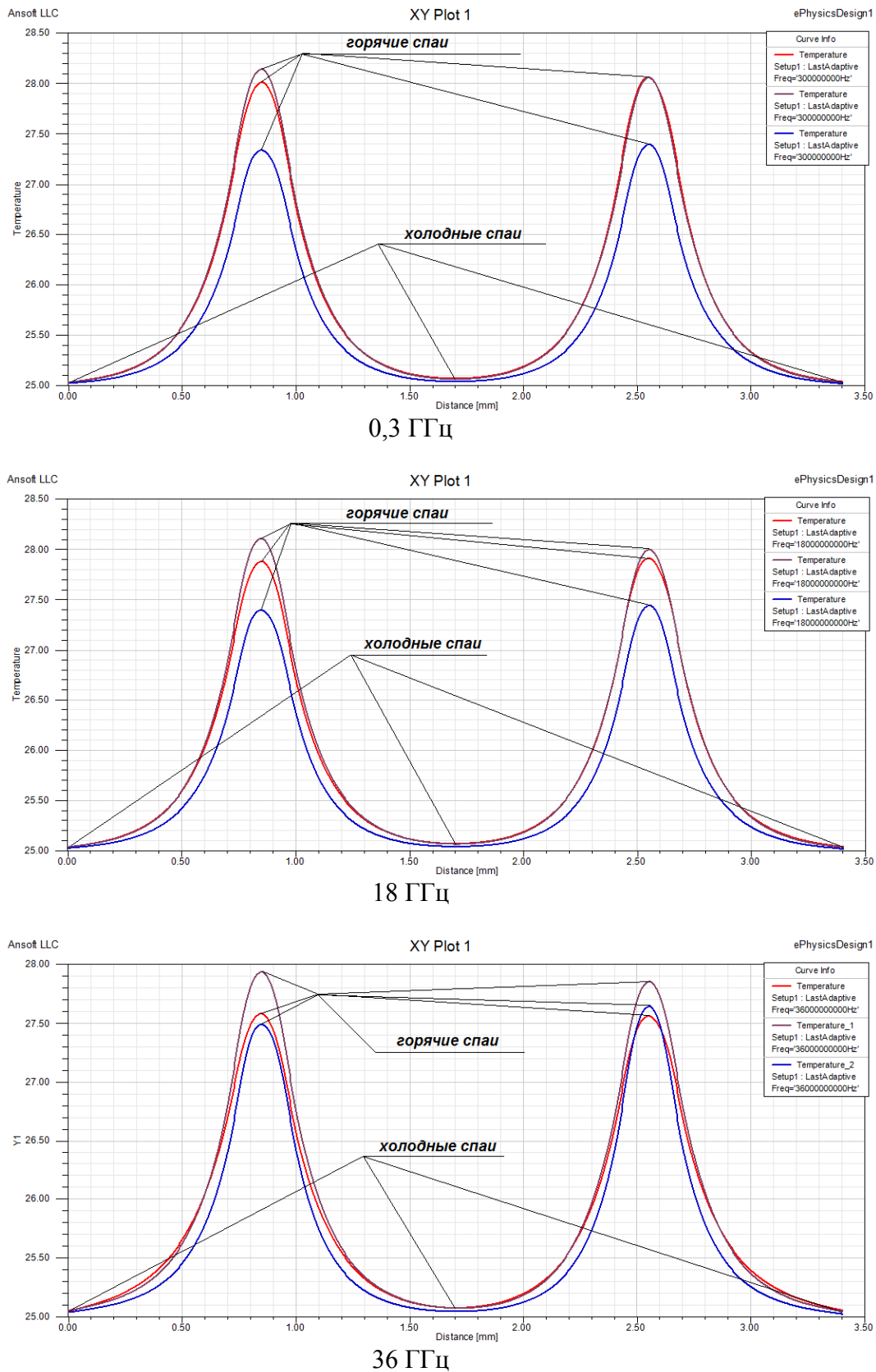


Рис. 8. Распределение температуры по термопарам в конструкции с раздвоенным нагревательным элементом

Полученные характеристики измерительных преобразователей представлены в табл. 1.

Таблица 1

Модель	Коэффициент преобразования			K_{cp}	δ_f	КСВ
	0,3 ГГц	18 ГГц	36 ГГц			
Прямоугольный НЭ	1104 мкВ/мВт	949 мкВ/мВт	817 мкВ/мВт	961 мкВ/мВт	15%	<1,26
Раздвоенный НЭ	1664 мкВ/мВт	1637 мкВ/мВт	1565 мкВ/мВт	1614 мкВ/мВт	3,1%	<1,14

K_{cp} – средний коэффициент преобразования, δ_f – неравномерность коэффициента преобразования по частоте.

Как видно из графиков на рис. 5 и рис. 6, меньшим КСВн в рабочем диапазоне частот обладает конструкция с раздвоенным нагревательным элементом.

Важной характеристикой датчика является чувствительность или коэффициент преобразования. Чем больше эта величина, тем меньший уровень мощности может быть измерен с помощью датчика. Из результатов анализа моделей видно, что коэффициент преобразования снижается с ростом частоты входного сигнала. Это вызвано увеличением емкостной связи нагревательного элемента с корпусом и термопарами и, как следствие, выделением входной мощности в ветвях батареи термопар. Кроме уменьшения чувствительности, возникает также частотная зависимость коэффициента преобразования, которая будет вносить погрешность в результаты измерения.

Для уменьшения емкостной связи термопар и нагревательного элемента следует уменьшать площадь их перекрытия через подложку, при этом области «горячих» спаев термопар должны находиться в зоне максимального нагрева.

В модели с прямоугольным резистором конструкция нагревательного элемента не позволяет сместить «горячие» спаи к центру резистора, так как при этом резко возрастает емкость резистор – термопары. Поэтому выделяемое количество теплоты используется неоптимально и средний коэффициент преобразования находится на уровне 961 мкВ/мВт, а относительная неравномерность коэффициента преобразования составляет 15%.

Для увеличения коэффициента преобразования необходимо уменьшить площадь нагревательного элемента и изменить конструкцию батареи термопар так, чтобы их «горячие спаи» находились в области максимального нагрева. Этого удалось добиться в модели с раздвоенным нагревательным элементом. В этом случае «горячие» спаи термопар находятся в наиболее нагретой области, а благодаря малой площади пересечения термопар с резистором, образовавшаяся емкостная связь не вызывает нагрева ветвей батареи термопар. Средний коэффициент преобразования составляет в данном случае 1614 мкВ/мВт, а относительная неравномерность коэффициента преобразования – 3,1%.

Выводы

Таким образом, на основе анализа технических характеристик двух различных конструкций датчика измерителя мощности можно сделать вывод, что оптимальной является конструкция датчика с раздвоенным нагревательным элементом. Этот датчик имеет следующие преимущества:

- обладает наименьшим в рабочем диапазоне частот КСВн<1,14 (прямоугольный нагреватель КСВн<1,26);
- обладает наименьшей относительной неравномерностью коэффициента преобразования по частоте: $\delta_f=3,1\%$ (прямоугольный нагреватель $\delta_f=15\%$);
- средний коэффициент преобразования в 1,7 раза больше, чем у датчика с прямоугольным нагревательным элементом;
- простота конструкции и изготовления, (корпус в отличие от модели с прямоугольным нагревателем не содержит полостей сложной формы).

Библиографический список

1. **Дворянин, Б.В.** Радиотехнические издания: учеб. пособие для вузов / Б.В. Дворянин, Л.И. Кузнецов. – М.: Сов. Радио, 1978. – 360 с.
2. **Прядилов, А.В.** Математическое моделирование широкополосных датчиков измерителя мощности сигналов СВЧ диапазона / А.В. Прядилов, Е.П. Тимофеев, В.П. Хилев // XVIII МНТК «Информационные системы и технологии» ИСТ-2012: мат. конференции, Н.Новгород. – 2012. – С. 119.
3. **Прядилов, А.В.** Исследование теплофизических характеристик термоэлектрического датчика измерителя мощности СВЧ сигналов. / А.В. Прядилов, Е.П. Тимофеев, В.П. Хилев // XVIII МНТК «Информационные системы и технологии» ИСТ-2012: мат. конференции, Н.Новгород. – 2012. – С. 119.
4. **Банков, С.Е.** Расчет антенн и СВЧ структур с помощью Ansoft HFSS / С.Е. Банков, А.А. Курушин. – М.: ЗАО НПП «Родник», 2009. – 736 с.

*Дата поступления
в редакцию 15.10. 2016*

K.I. Kisilenko, A.V. Pryadilov, E.P. Timofeev

THERMOELECTRIC SENSORS FOR MEASURING THE MICROWAVE POWER

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeyev

Purpose: Create and measurement thermoelectric sensors in microwave range.

Design/methodology/approach: Converting microwave energy into thermal energy to form followed by measuring the change of temperature or resistance of the working fluid, in which this transformation occurs.

Originality/value: Simulation device structure in the range 0.3 - 36 GHz produced the following results: the input and output VSWR of less than 1.14; $\delta_f = 3,1\%$.

Key words: power measurement, thermoelectric sensors, microwave range, modeling, CAD, HFSS.