

Мощная широкополосная коаксиальная СВЧ нагрузка на резисторе P1-69П-50

М.Ю. Двоешерстов¹, С.М. Никулин², В.В. Петров², А.Ю. Строков¹, М.В. Тимонин²

¹ООО «ПЭКОМ-НН»

²Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация: в данной работе рассмотрена конструкция мощной согласованной нагрузки с коаксиальным входом и трактом в виде симметричной полосковой линии переменного волнового сопротивления. Такое решение позволило реализовать при минимальной стоимости нагрузку, работающую в широком диапазоне частот. Приведены результаты моделирования и натурных испытаний опытного образца нагрузки.

Ключевые слова: высокочастотный цилиндрический резистор, согласованная нагрузка, полосковая линия передачи, измерение КСВН.

1. Введение

Отечественной промышленностью выпускаются высокочастотные трубчатые резисторы высокой мощности P1-69, показанные на рисунке 1 [1]. Конструктивно они выполняются в виде тонкого резистивного слоя, сформированного на поверхности цилиндрического керамического основания. На краях резистивного слоя наносят проводящий слой металла для контакта с центральным проводником и экраном коаксиальной линии передачи.

Резисторы малого уровня рассеиваемой мощности порядка единиц Ватт имеют малые габариты. В согласованных нагрузках их устанавливают вместо центрального проводника однородной, короткозамкнутой на конце коаксиальной линии. Диаметр резистора соответствует диаметру центрального проводника, а длина много меньше длины волны, распространяющейся в линии передачи. Поэтому такие нагрузки имеют малые значения коэффициента отражения.

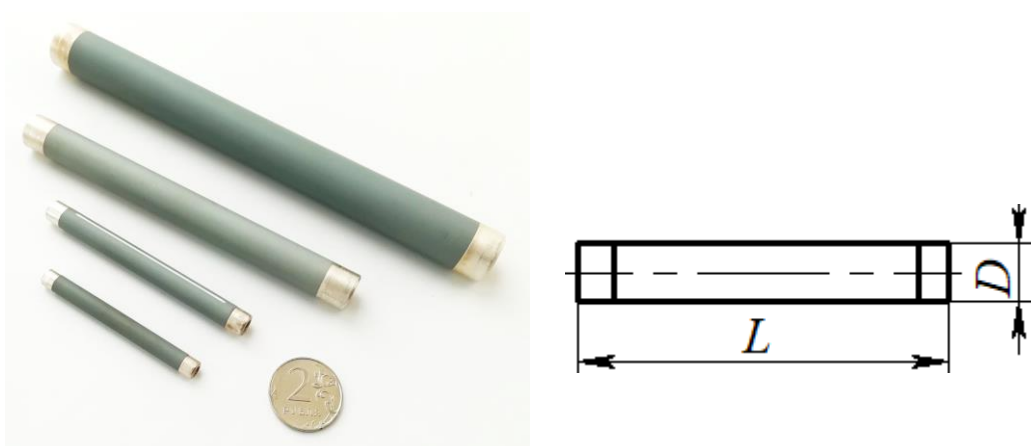


Рисунок 1. Резистор типа P1-69: внешний вид и основные размеры.

Как видно из таблицы 1, резисторы типа P1-69 обладают значительными габаритами, что не позволяет их считать элементами с сосредоточенными параметрами в диапазоне СВЧ частот. Так резистор P1-69-50 имеет длину 180 мм, и становится распределенной структурой на частотах выше 100 МГц.

Таким образом, использование данных резисторов в качестве центрального

проводника регулярной, замкнутой на конце, коаксиальной линии позволяет реализовывать нагрузки только в диапазонах ВЧ и ОВЧ.

Таблица 1. Габаритные размеры резисторов P1-69

Тип резистора	Мощность, Вт	Длина, L , мм	Диаметр, D , мм
P1-69-5	5	60	6
P1-69-10	10	80,5	8
P1-69-25	25	130	13
P1-69-50	50	180	18
P1-69-100	100	300	21

2. Модели, экспериментальные результаты и конструкция и широкополосной нагрузки

Чтобы иметь представление о частотных свойствах рассматриваемых резисторов при установке их в однородную линию передачи, было проведено математическое моделирование с использованием эквивалентной схемы, приведенной на рисунке 2.

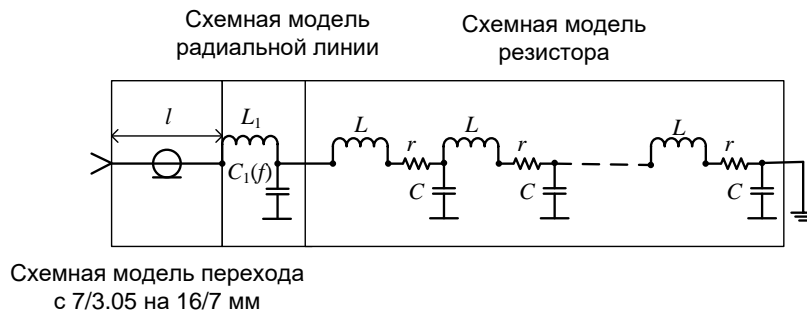


Рисунок 2. Эквивалентная схема согласованной нагрузки на резисторе в однородном тракте

Схема образована каскадным соединением модели перехода, модели радиальной линии и модели резистора. Схемная модель перехода ввиду его практически идеальных частотных характеристик представлена отрезком коаксиальной линии передачи с волновым сопротивлением 50 Ом и неизвестной длиной l .

Схемная модель радиальной линии образована $L1C1$ звеном фильтра нижних частот, причем емкость $C1$ имеет линейную частотную зависимость, т. е. описывается двумя параметрами $c0$ и $c1$ (полученные в ходе оптимизации). Схемная модель резистора представляет собой лестничную 20-тизвенную LCr модель линии передачи с продольными потерями.

Индуктивность L , емкость C и продольное сопротивление r каждого звена вычисляются исходя из волнового сопротивления линии передачи (50 Ом) и сопротивления резистора (50 Ом).

Результаты математического моделирования сравнивались с натурным экспериментом, в котором рассматриваемые резисторы устанавливались в регулярную симметричную полосковую линию. На рисунке 3 представлены как экспериментальные результаты, так и расчётные значения.

Для расширения рабочей полосы частот согласованных нагрузок на поглощающих элементах большой длины применяют ступенчатое или плавное изменение волнового сопротивления тракта, в который включена нагрузка [2, 3]. Конструкция таких нагрузок представлена на рисунке 4. Ступенчатое изменение волнового сопротивления незначительно расширяет частотный диапазон. Максимальной широкополосностью обладают нагрузки, имеющие тракт, волновое сопротивление которого изменяется по экспоненциальному закону или по закону трактриссы.

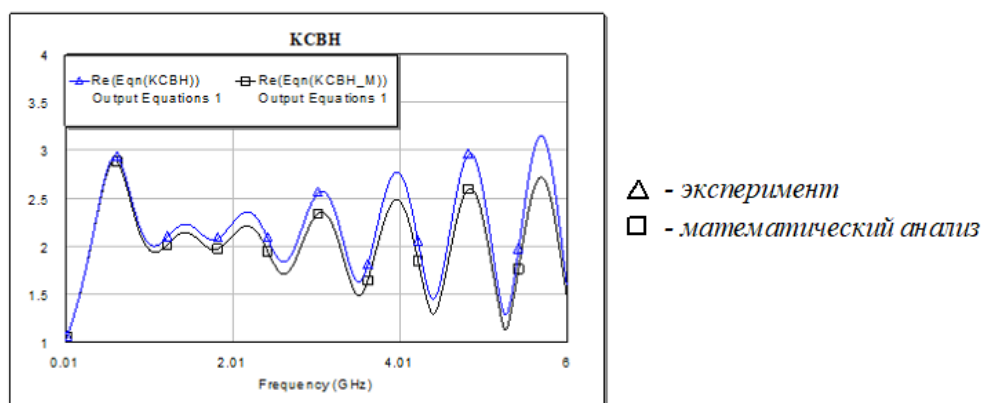


Рисунок 3. Сравнение теоретической и экспериментальной частотной зависимости КСВН резистора P1-69 при установке в регулярный тракт.

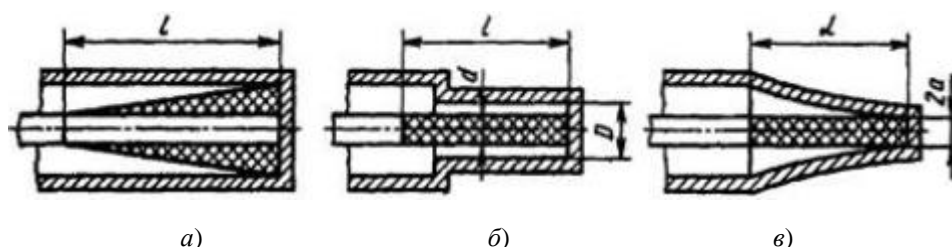


Рисунок 4. Конструкции широкополосных согласованных нагрузок: *a* – с изменением размера поглотителя; *b* – со ступенчатым изменением волнового сопротивления; *c* – с плавным изменением волнового сопротивления.

К недостаткам вышеприведенных конструкций относятся: сложность изготовления внешнего проводника с изменением размеров по заданному закону; невозможность вести подстройку параметров для компенсации погрешностей изготовления экрана и резистора; трудности с отводом тепла от поглощающего элемента.

Избавиться от указанных недостатков можно, заменив коаксиальный тракт на симметричную полосковую линию. При этом экранные проводники линии можно выполнить в виде упругих пластин, кривизну которых легко регулировать (рисунок 5). Для этого во внешних стенках нагрузки предусмотрены регулировочные винты.

Таким образом конструкция нагрузки существенно упрощается, что снижает стоимость ее изготовления. Боковые экраны, замыкающие пространство полосковой линии слабо влияют на волновое сопротивление, поскольку находятся в области слабого электромагнитного поля. Благодаря этому их можно выполнить перфорированными с целью обеспечения принудительного воздушного охлаждения резистора.

Для подключения к тракту использован соединитель R161.404.000 N типа сечением 7/3,05. Для обеспечения согласования размеров тракта с диаметральной размер резистора применен ступенчатый переход. В области соединения перехода с резистором скачком изменяется диаметр центрального проводника, а экран с цилиндрической формы превращается в экран в виде двух пластин. Получается короткий участок так называемой радиальной линии передачи. Во внутренней области радиальной линии происходит трансформация электромагнитного поля с коаксиальной симметрией в электромагнитное поле симметричной полосковой линии с круглым внутренним проводником.

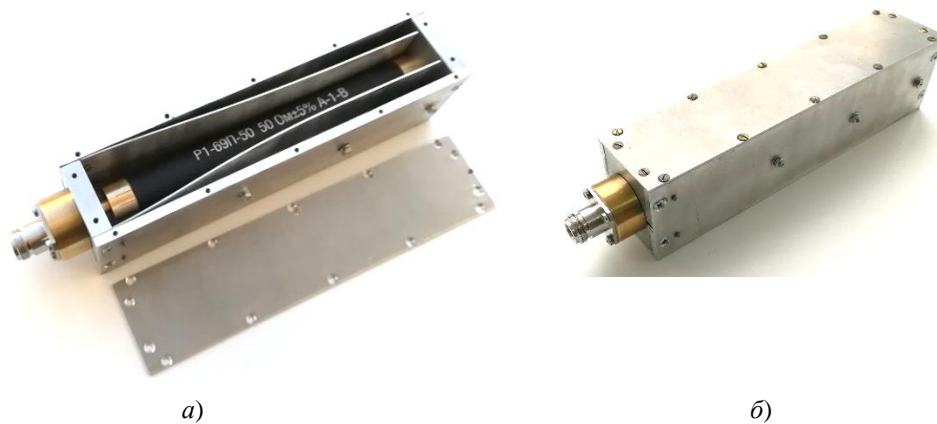


Рисунок 5. Предлагаемая конструкция согласованной нагрузки: *а* – со снятыми боковыми экранами; *б* – конструкция в сборе.

Предварительно был проведен электромагнитный анализ трехмерной модели разрабатываемой нагрузки. Результаты анализа, приведенные на рисунке 6, показали возможность существенного расширения рабочей полосы частот нагрузки.

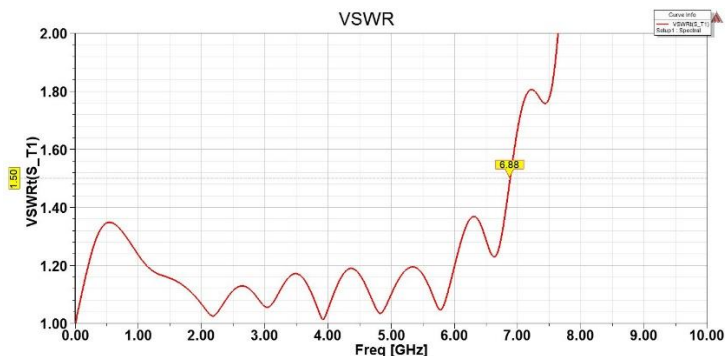


Рисунок 6. Результаты 3D моделирования согласованной нагрузки

Параметры опытного образца согласованной нагрузки на резисторе P1-69П-50 были измерены анализатором цепей PNA Network Analyzer N5222A. Для калибровки применялся набор калибровочных мер для измерительного тракта 7/3.04 НКММ-01-01Р производства ЗАО “НПФ «Микран»” [4]. Результат определения КСВН нагрузки приведен на рисунке 7.

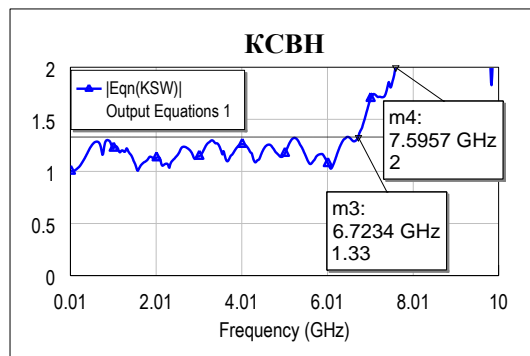


Рисунок 7. Результаты измерения КСВН опытного образца согласованной нагрузки

Созданный образец имеет закрытую конструкцию, что затрудняет охлаждение

резистора. Поэтому в данной конструкции поглощаемая мощность ограничена величиной порядка 20 Вт.

Для исследования потенциальных возможностей разработанной нагрузки был произведен анализ теплового режима в условиях принудительного охлаждения. Был выбран вентилятор ЕС12025Н12В, обеспечивающий объемный расход 2,72 м³/мин [5].

Расчет показал, что при номинальной мощности рассеяния максимальная температура резистивного слоя составляет 135 °С, а максимально допустимой температуры 200 °С достигает при мощности рассеяния 107 Вт.

3. Заключение

По результатам испытаний разработанная согласованная нагрузка на резисторе P1-69П-50 обеспечивает полосу согласования:

- по уровню КСВН 1.33 – от 0 до 6.72 ГГц;
- по уровню КСВН 2.00 – от 0 до 7.59 ГГц.

Аналогично рассмотренной возможно создание согласованных нагрузок и на основе резисторов, рассчитанных на другие уровни рассеиваемой мощности.

При обеспечении интенсивного отвода тепла возможна реализация нагрузок с номинальной мощностью, превышающей номинальную мощность применяемых резисторов. По паспорту, данные резисторы допускают эксплуатацию при десятикратной перегрузке, при условии обеспечения температуры резистивного слоя не более 200 °С. Конструкция разработанной согласованной нагрузки защищена патентом на полезную модель [6].

Список литературы

1. Резисторы постоянные непроволочные P1-69 [Электронный ресурс]. - Закрытое акционерное общество "РЕОМ", Санкт-Петербург. – Режим доступа: <http://reom.ru/katalog/71/185/>, свободный. - Загл. с экрана.
2. Устройства СВЧ: Учеб. Пособие/Под ред. Д.М. Сазонова. – М.: Высш. Школа, 1981. -295 с.
3. Пат. RU 2 089 976 С1, Н01Р 1/26(2006.01). Мощная коаксиальная нагрузка СВЧ/ С.С. Ковалев. - 93039405/09; заявлено 03.08.1993; опубл. 10.09.1997.
4. Набор калибровочных мер НКММ-01-01Р [Электронный ресурс]. - ООО "Приборэлектро", радиоизмерительные приборы и оборудование. – Режим доступа: <https://www.priborelektro.ru/product/price/nabory-mer-55/3886.html>, свободный. - Загл. с экрана.
5. ЕС12025Н12В, Вентилятор 12В, 120x120x25мм, подш. качения, 2600 об/мин [Электронный ресурс]. - Закрытое акционерное общество «ЧИП и ДИП». – Режим доступа: <https://www.chipdip.ru/product/ec12025h12b>, свободный. - Загл. с экрана.
6. Патент RU 202 370 U1, МПК Н01Р1/24 (2006.01), СПК Н01Р1/24 (2021.01). СВЧ нагрузка / Никулин С.М., Двоешерстов М.Ю., Петров В.В., Тимонин М.В., Строков А.Ю. - №2020135745; заявлено 29.10.2020; опуб. 15.02.2021, Бюл. № 5. – с.