

А. С. Митьков¹, М. Г. Рубанович¹

¹ Новосибирский государственный технический университет

МОДУЛЬНЫЕ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ АТТЕНЮАТОРЫ ВЫСОКОГО УРОВНЯ МОЩНОСТИ

Одним из перспективных направлений в области построения модульных многоэлементных аттенюаторов или нагрузок для современной передающей аппаратуры цифрового телевидения является использование планарных резисторов с диэлектрической подложкой из бериллиевой керамики. В настоящей статье предложен принцип построения и расчета модульных сверхвысокочастотных (СВЧ) аттенюаторов и нагрузок на большие уровни мощности рассеивания с параллельным и последовательным соединением пленочных планарных резистивных элементов. Данный метод позволяет разрабатывать устройства с входной мощностью СВЧ-сигнала до 10 кВт и полосой рабочих частот 0–1 ГГц на основе унифицированных модулей. Рассмотрен конкретный вариант построения модульного СВЧ-аттенюатора на уровень мощности 5 кВт, выполненного на основе микрополосковой пленочной технологии с использованием диэлектрической подложки из бериллиевой керамики.

Ключевые слова: делитель мощности, пленочный резистор, планарный резистор

Введение

В современной передающей аппаратуре цифрового телевидения существует необходимость измерения энергетических и информационных параметров выходных сигналов. Основными особенностями при этом являются большой динамический диапазон измеряемых мощностей и широкая полоса рабочих частот. Так, по уровню выходной мощности блоки и узлы радиопередающей аппаратуры различаются на несколько порядков – от десятков милливольт до тысяч ватт. В то же время допустимый диапазон входных мощностей существующей измерительной аппаратуры ограничивается несколькими милливольтами. Это приводит к необходимости использовать мощные аттенюаторы с фиксированными значениями вносимого ослабления либо применять встроенные в передающую аппаратуру устройства для отвлечения части мощности выходного сигнала [1–4].

В общем случае широкополосные нагрузочные устройства дециметрового диапазона могут быть реализованы на основе коаксиальной или полосковой элементной базы. Сопоставление технических параметров поглощающих элементов различного типа показало, что планарные пленочные резисторы обладают технологическими и конструктивными преимуществами по сравнению с другими видами поглощающих элементов [5].

Многоэлементные аттенюаторы большой мощности, построенные в виде модульной структуры с использованием пленочных резисторов, имеют ряд существенных преимуществ, среди которых

высокая ремонтопригодность, малые габаритные размеры и масса, конструктивная и технологическая простота. Использование в аттенюаторе идентичных модулей упрощает его изготовление и эксплуатацию. В таких аттенюаторах для рассеяния тепла обычно применяется воздушное охлаждение, которое технологически и конструктивно значительно проще жидкостного.

Таким образом, в настоящее время наиболее перспективным направлением в создании мощных аттенюаторов является использование унифицированных модульных структур с диссипативными элементами в виде планарных пленочных резисторов. Пленочные резисторы изготавливаются по современным методам микрополосковой технологии на подложке из материала с высокой теплопроводностью и низким значением относительной диэлектрической проницаемости [6, 7].

Анализ характеристик существующих на сегодня СВЧ-диэлектриков позволяет сделать вывод о целесообразности применения подложек из оксида бериллия (BeO), обладающего высокой теплопроводностью, что обеспечивает значительные уровни рассеиваемой мощности. Малое значение относительной диэлектрической проницаемости оксида бериллия позволяет, особенно в области высоких частот, минимизировать влияние паразитной емкости планарных пленочных резисторов на качество согласования [8].

Учитывая вышеизложенное, одним из перспективных направлений в области построения

модульных многоэлементных аттенюаторов или нагрузок является использование планарных резисторов с диэлектрической подложкой из бериллиевой керамики. Полоса рабочих частот таких устройств находится в пределах от 0 до 1 ГГц при уровне входной мощности до нескольких кВт.

Модульный аттенюатор

Основой модульного СВЧ-аттенюатора (нагрузки) на планарных резисторах большой мощности является использование параллельно-последовательного соединения диссипативных модулей значительно меньшей мощности, чем общая мощность входного СВЧ-сигнала. Объединение большого числа универсальных модулей, расположенных на значительном расстоянии друг от друга, обеспечивает распределение рассеиваемой тепловой мощности в аттенюаторе на большую площадь. Это дает возможность отказаться от жидкостного охлаждения и перейти на воздушное конвективное охлаждение.

Рассмотрим принцип модульного построения на примере аттенюатора с уровнем рассеиваемой мощности 5 кВт. Аттенюатор имеет входное и выходное сопротивление 50 Ом, полоса рабочих частот составляет 0–1 ГГц. Структурная схема такого модульного аттенюатора приведена на рис. 1.

В конструкции прибора используется входной модуль в виде резистивного блока 12,5 Ом, двухканальный делитель мощности и два универсальных модуля на уровень мощности 2000 Вт, представляющие собой аттенюаторы с входным сопротивлением 75 Ом.

В данном модульном аттенюаторе к делителю мощности с входным сопротивлением 37,5 Ом подключен входной модуль с сопротивлением 12,5 Ом (рис. 1). Поскольку 12,5 Ом равняется четвертой части от 50 Ом, на резистивном блоке рассеивается четвертая часть всей входной мощности, то есть 1250 Вт.

Входной модуль

На каждом пленочном резисторе, выполненном на бериллиевой керамике размером 20×20×4 мм, допустимая рассеиваемая мощность не превышает 200 Вт. Поэтому входной модуль на 1250 Вт реализован из шести последовательно соединенных через короткие отрезки линии передачи одинаковых резисторов, имеющих сопротивление 2,0 Ом, как показано на рис. 2.

Для расчета отрезков линии передачи, соединяющих планарные пленочные резисторы, составим в сосредоточенном элементном базисе эквивалентную схему входного модуля (рис. 3). Заменяем

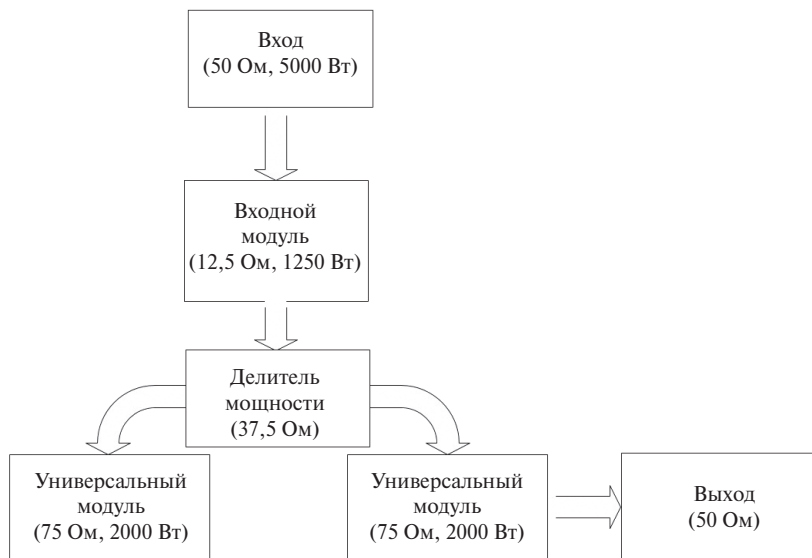


Рисунок 1. Структурная схема модульного аттенюатора на 5 кВт

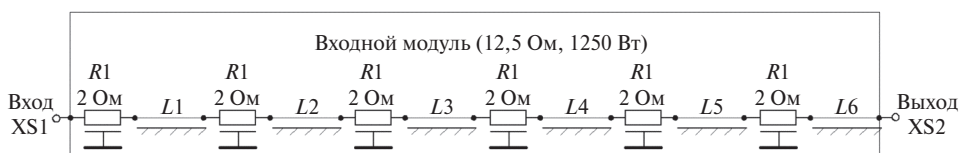


Рисунок 2. Схема входного модуля на 1250 Вт

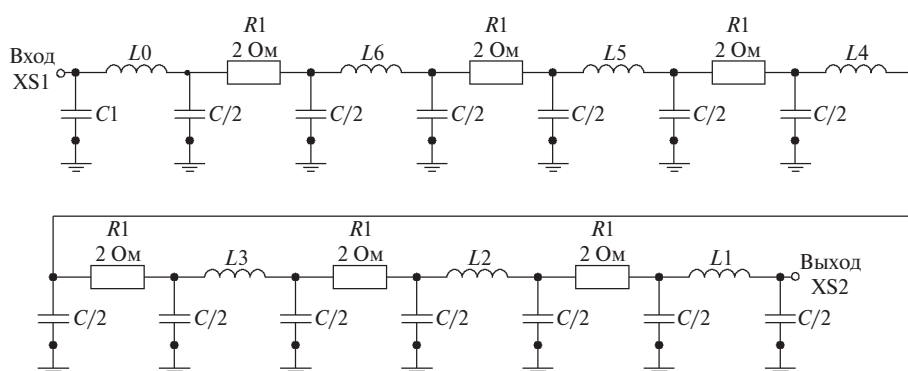


Рисунок 3. Эквивалентная схема входного модуля на 1250 Вт

пленочный резистор сопротивлением R_1 и двумя емкостями $C/2$, а отрезок линии передачи – индуктивностью L_i . В данном случае на эквивалентной схеме (рис. 3) емкость C является паразитной емкостью пленочного резистора. Поскольку планарный пленочный резистор большой мощности имеет большую ширину и малую длину, его собственной паразитной индуктивностью можно пренебречь. Индуктивности, показанные на рис. 3, являются согласующими элементами. Они образуют вместе с паразитными емкостями фильтр нижних частот (ФНЧ), который в данном случае и является оптимальной согласующей цепью [9].

Отметим, что характеристическое сопротивление согласующих ФНЧ увеличивается на величину $R_1 = 2$ Ом, начиная от 37,5 Ом. Характеристическое сопротивление последнего согласующего ФНЧ, являющегося входом модульного аттенюатора, составляет 50 Ом.

Для определения паразитной емкости C рассмотрим более подробно конструкцию планарного пленочного резистора, показанную на рис. 4.

Емкость между резистивной пленкой и металлизированным основанием, разделенными диэлектрической подложкой, представим в виде суммы двух емкостей:

$$C = C_0 + C_k, \quad (1)$$

где C_0 – емкость плоского конденсатора, образованного резистивной пленкой и металлической поверхностью в пределах проекции пленки на нее,

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r a b}{l}. \quad (2)$$

Краевая емкость C_k представляет собой емкость между пленкой и металлической поверхностью, вне проекции пленки на нее [6, 9]:

$$C_k = (\epsilon_0 \epsilon_r \frac{l}{2}) \left[120 \pi Z_B(b, l, 1) / Z_B^2(b, l, \epsilon_r) - \epsilon_r \frac{b}{l} \right], \quad (3)$$

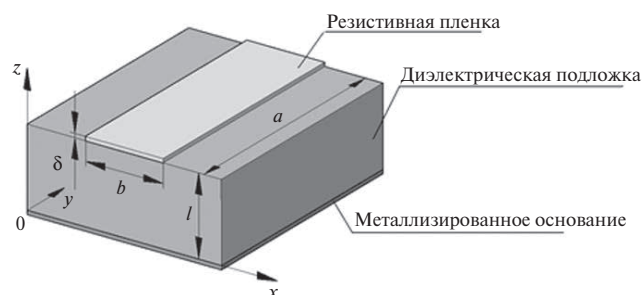


Рисунок 4. Планарный пленочный резистор на диэлектрической подложке: a – длина резистивной пленки; b – ширина резистивной пленки; δ – толщина резистивной пленки; l – расстояние от резистивной пленки до металлизированного основания

где Z_B – волновое сопротивление планарного пленочного резистора при соответствующих размерах резистивной пленки [4, 9]. Наибольшая часть краевой емкости соответствует краю блока резистивной пленки, и при отступлении от края пленки на расстояние, равное толщине диэлектрика, значение краевой емкости практически стремится к нулю.

Расчетные соотношения для граничной частоты f_{ci} и индуктивности L_i ФНЧ третьего порядка с диссипативными потерями при известной величине емкости C , равной паразитной емкости пленочных резисторов, имеют следующий вид [9]:

$$f_{ci} = \frac{g_1}{\pi C (0,5 R_M + R_1(i-1))}, \quad (4)$$

$$L_i = \frac{g_2 (0,5 R_M + R_1(i-1))}{2 \pi f_{ci}}, \quad (5)$$

где $g_1 = \frac{1}{\text{sh}^2 \left[\frac{\ln \left(\text{cth} \frac{L_{Ar}}{17,37} \right)}{6} \right]}$, $g_2 = \frac{1}{\text{sh}^2 \left[\frac{\ln \left(\text{cth} \frac{L_{Ar}}{17,37} \right)}{6} \right] + 0,75}$

первый и второй элементы нормированного прототипа чебышевского ФНЧ третьего порядка; L_{Ar} – пульсации амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) в полосе пропускания (дБ), R_M – входное сопротивление универсального модуля, равное 75 Ом, i – текущий индекс, изменяющийся от 1 до N (количество пленочных резисторов во входном модуле).

Подставим значение граничной частоты (4) и емкости резистивной пленки (1) в формулу (5) и получим универсальную формулу для расчета индуктивности L_i :

$$L_i = \frac{0,5g_2(C_0 + C_k)(0,5R_M + R_i(i-1))^2}{g_1}, \quad (6)$$

где C_0 и C_k – паразитные емкости пленочного резистора.

Эквивалентная схема входного модуля (рис. 3) и значения параметров ее элементов являются первоначальным приближением для разработки микрополосковой топологии и последующего проведения численного электродинамического моделирования в компьютерной САПР.

Для планарных пленочных резисторов (2 Ом), показанных на эквивалентной схеме (рис. 3), была разработана микрополосковая топология, ориентированная на использование диэлектрической подложки из ВеО размером 20×20×4 мм. Для улучшения согласования в области высоких частот все планарные пленочные резисторы (2 Ом) выполнены в виде двух последовательно включенных резисторов прямоугольной формы размером 16×3 мм, как показано на рис. 5.

В соответствии с эквивалентной схемой (рис. 2) в компьютерной САПР было проведено моделирование частотных свойств входного модуля на мощность 1250 Вт, состоящего из пленочных резисторов, соединенных короткими отрезками микрополосковых линий. Длина последних определяется значениями индуктивностей, рассчитанных по формуле (6). В начале расчета проводилось численное электромагнитное моделирование каждого резистора в соответствии с топологией (рис. 5), а затем определялись частотные характеристики входного блока по схеме на рис. 6.

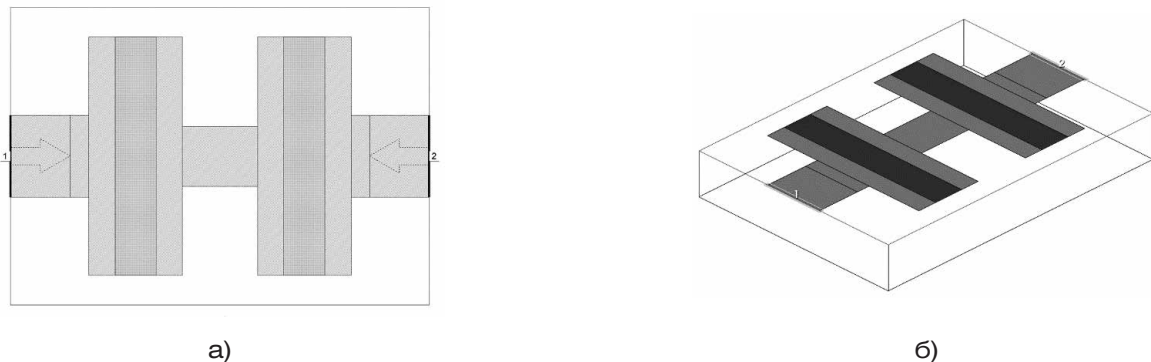


Рисунок 5. Модель пленочного резистора сопротивлением 2 Ом: а – топология; б – 3D-модель

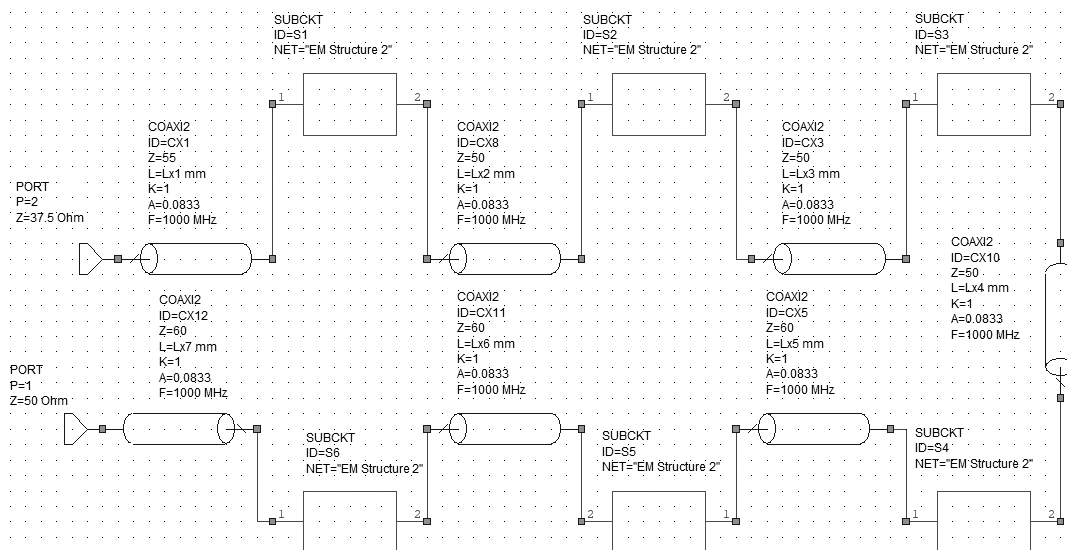


Рисунок 6. Схема для моделирования входного модуля на 1250 Вт

Результаты компьютерного моделирования частотной зависимости коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) для входного модуля (12,5 Ом) приведены на рис. 7.

Двухканальный делитель мощности

Основной задачей при разработке двухканального делителя мощности было обеспечение приемлемого коэффициента стоячей волны по входу в заданной полосе частот 0–1000 МГц. Так как структура рассматриваемого модульного аттенюатора симметрична, был выбран двухканальный делитель мощности на основе Y-образного тройника, топология которого показана на рис. 8. Расчеты и экспериментальные измерения показали, что КСВН по входу двухканального делителя мощности не превышает 1,2 в полосе частот 0–1500 МГц.

Универсальный модуль

Универсальный модуль, представляющий собой аттенюатор на мощность рассеивания 2000 Вт с входным сопротивлением 75 Ом, реализован по аналогичной структуре, как и рассматриваемый аттенюатор на 5 кВт. Электрические схемы основных модулей аттенюатора на 2000 Вт показаны на рис. 9. Общая мощность 2000 Вт равномерно распределена на три внутренних модуля. Таким образом, в конструкции аттенюатора на 5 кВт модульный принцип использован дважды.

Из принципиальной схемы (рис. 9) видно, что аттенюатор на 2000 Вт выполнен в виде последовательно-параллельного соединения резистивных элементов.

Как показали экспериментальные измерения частотных характеристик опытного образца универсального модуля на уровень мощности 2000 Вт с входным сопротивлением 75 Ом, показанного на рис. 10, значение КСВН в полосе рабочих частот 0–1000 МГц не превышает 1,2. Аттенюатор на 2000 Вт имеет два выхода с вносимым ослаблением 23 и 46 дБ.

Заключение

Предложенный принцип построения многоэлементных аттенюаторов и нагрузок большой мощности на основе типовых универсальных модулей с параллельным и последовательным соединением пленочных планарных резистивных элементов позволяет разрабатывать согласованные диссипативные устройства с входной мощностью СВЧ-сигнала до 10 кВт и полосой рабочих частот 0–1 ГГц.

Экспериментальное исследование и компьютерное моделирование основных модулей показало,

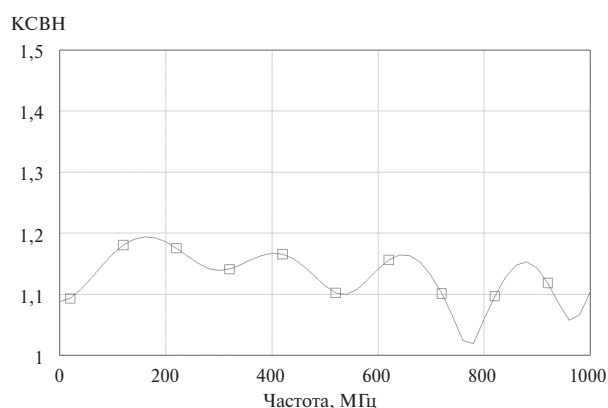
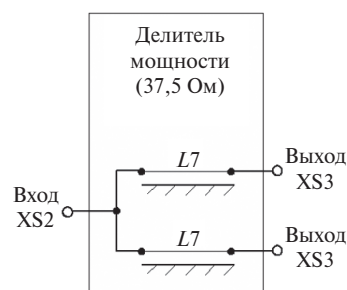
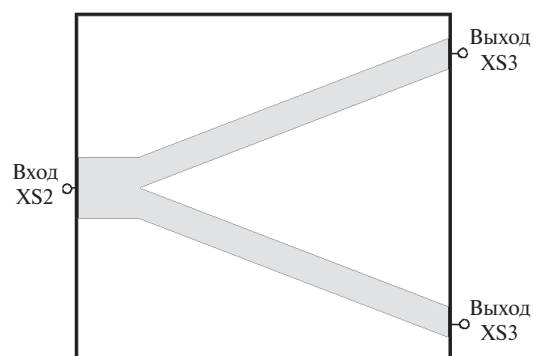


Рисунок 7. Частотная зависимость коэффициента стоячей волны по напряжению входного модуля на мощность 1250 Вт



а)



б)

Рисунок 8. Двухканальный делитель мощности: а – схема; б – топология

что разработанный аттенюатор с входной мощностью 5000 Вт имеет коэффициент стоячей волны не более 1,2 в полосе частот от 0 до 1000 МГц, что отвечает общим требованиям для передающей аппаратуры цифрового телевидения.

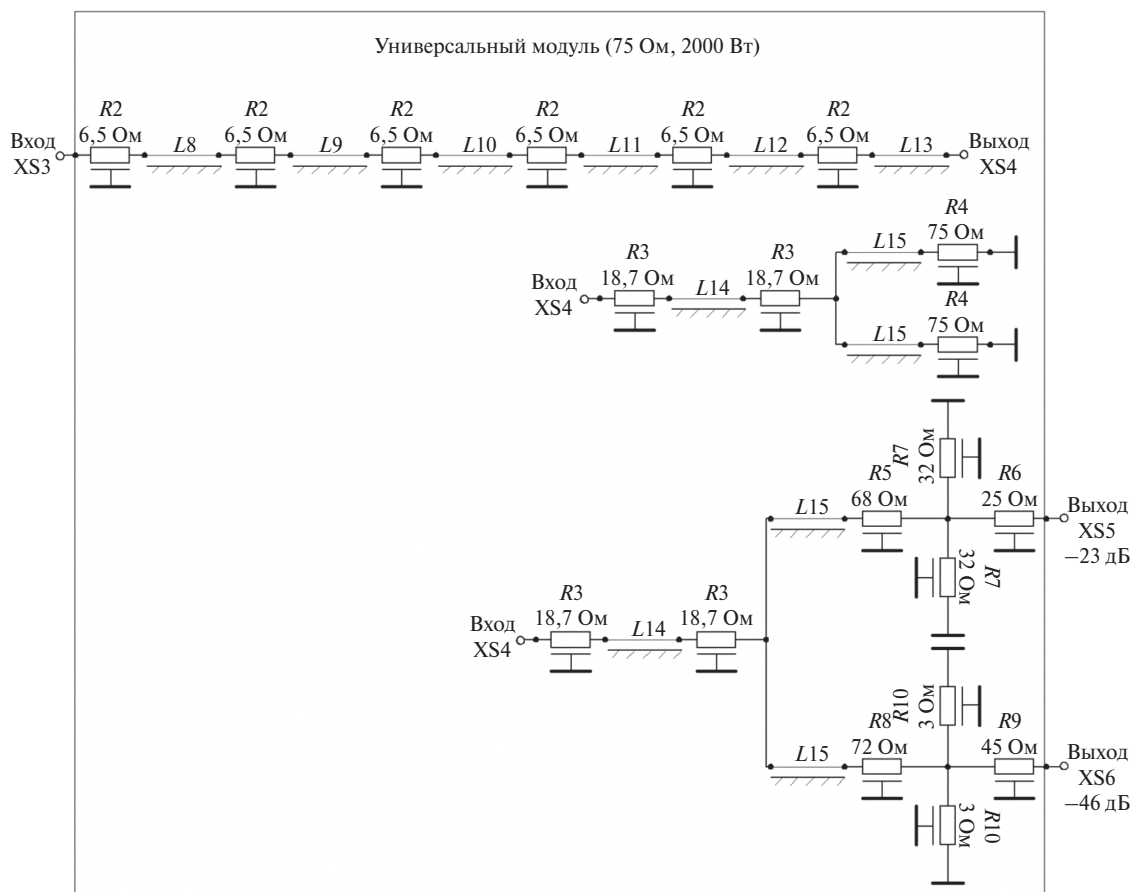
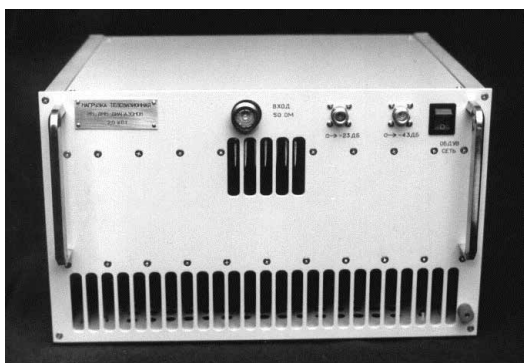
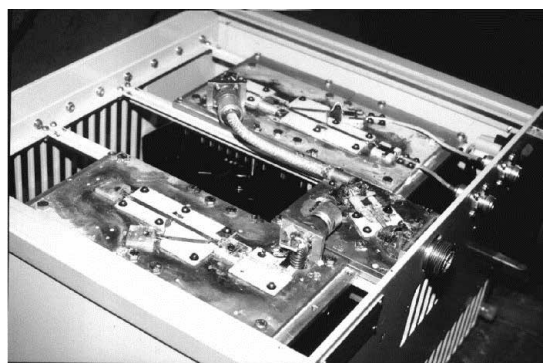


Рисунок 9. Схема универсального модуля на 2000 Вт



а)



б)

Рисунок 10. Опытный образец универсального модуля на 2000 Вт: а – внешний вид; б – внутренняя конструкция

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Akishin G.P., Turnaev S.K., et al. Composition of beryllium oxide ceramics // *Refractories and Industrial Ceramics*. 2011. Vol. 51. No. 5. P. 377–381.
2. Tang C.-W. A Design of 3-dB wideband microstrip power divider with an ultra-wide isolated frequency band // *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 2016. Vol. 64. No. 6. P. 1806–1811.
3. Cano J.L. Ultra-wideband chip attenuator for precise noise measurements at cryogenic temperatures // *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 2010. Vol. 58. No. 9. P. 2504–2509.
4. Столяренко А.А. и др. Мощные СВЧ аттенуаторы для радиопередающей и телевизионной аппаратуры // *Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем: матер. 6-й Общерос. науч.-техн. конф. Омск: ОмГТУ, 2016. С. 337–344.*
5. Савенков Г.Г., Разинкин В.П., Мехтиев А.Д. Многоступенчатая микрополосковая СВЧ нагрузка // *Вопросы радиоэлектроники*. 2018. № 4. С. 53–57.

6. Митьков А. С., Столяренко А. А., Рубанович М. Г. Пленочные сверхвысокочастотные аттенюаторы на основе фильтровых структур с диссипативными потерями // Вопросы радиоэлектроники. 2019. № 4. С. 84–89.
7. Митьков А. С., Столяренко А. А., Азарный А. А. Новые структуры резистивных аттенюаторов в тонкопленочном исполнении. Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2018). Новосибирск, 2018. Т. 4. С. 147–150.
8. Bird RF Technologies [Электронный ресурс] URL: <http://www.birdrf.com/Products/Test%20and%20Measurement/Attenuators/1kW.aspx> (дата обращения: 03.09.2019).
9. Маттей Д. Л., Янг Л., Джонс Е. М. Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. Москва: Связь, 1971. Т. 1. 439 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Митьков Александр Сергеевич, аспирант, Новосибирский государственный технический университет, Российская Федерация, 630073, Новосибирск, пр-т Карла Маркса, д. 20, тел.: 8 (923) 256-25-77, e-mail: am@alfa-instr.ru.

Рубанович Михаил Григорьевич, д. т. н., профессор, Новосибирский государственный технический университет, Российская Федерация, 630073, Новосибирск, пр-т Карла Маркса, д. 20, тел.: 8 (903) 998-03-89, e-mail: mihail-nstu@mail.ru.

For citation: Mitkov A. S., Rubanovich M. G. High power modular microwave attenuators. Issues of radio electronics, 2020, no. 2, pp. 31–37.

DOI 10.21778/2218-5453-2020-2-31-37

A. S. Mitkov, M. G. Rubanovich

HIGH POWER MODULAR MICROWAVE ATTENUATORS

One of the promising areas in the design of modular multi-element attenuators or loads for modern digital television broadcasting equipment is the use of planar resistors with a dielectric substrate made of beryllium ceramic. The article proposes the principle of constructing and calculating modular microwave attenuators and loads on large levels of dissipation power with parallel and serial connection of planar film resistive elements. This method allows to develop devices based on unified modules with an input microwave power up to 10 kW and a working frequency band of 0–1 GHz. In this article the specific embodiment of the construction of a modular microwave attenuator at a power level of 5 kW, made on the basis of microstrip film technology using a beryllium ceramic dielectric is considered.

Keywords: power divider, film resistor, planar resistor

REFERENCES

1. Akishin G. P., Turnaev S. K., et al. Composition of beryllium oxide ceramics. *Refractories and Industrial Ceramics*, 2011, vol. 51, no. 5, pp. 377–381.
2. Tang C.-W. A Design of 3-dB wideband microstrip power divider with an ultra-wide isolated frequency band. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 2016, vol. 64, no. 6, pp. 1806–1811.
3. Cano J. L. Ultra-wideband chip attenuator for precise noise measurements at cryogenic temperatures. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 2010, vol. 58, no. 9, pp. 2504–2509.
4. Stolyarenko A. A., et al. Powerful microwave attenuators for radio and television equipment. (Conference proceedings) Obmen opytom v oblasti sozdaniya sverkhshirokopolosnykh radioelektronnykh system. Omsk, OmSTU Publ., 2016, pp. 337–344. (In Russian).
5. Savenkov G. G., Razinkin V. P., Mekhtiev A. D. Multistage microstrip UHF load. *Voprosy radioelektroniki*, 2018, no. 4, pp. 53–57. (In Russian).
6. Mitkov A. S., Stolyarenko A. A., Rubanovich M. G. Film attenuators based on filter structures with dissipative losses. *Voprosy radioelektroniki*, 2019, no. 4, pp. 84–89. (In Russian).
7. Mitkov A. S., Stolyarenko A. A., Azarnyi A. A. The new structures of thin-film attenuators. (Conference proceedings) Aktualnye problemy elektronnoy priborostroeniya, Novosibirsk, 2018. Vol. 4, pp. 147–150. (In Russian).
8. Bird RF Technologies. Available at: <http://www.birdrf.com/Products/Test%20and%20Measurement/Attenuators/1kW.aspx> (accessed 03.09.2019).
9. Matthaei G., Young L., Jones E. M. T. *Microwave filters, impedance-matching networks, and coupling structures*. Artech House, 1980, 1096 p.

AUTHORS

Mitkov Alexander, graduate student, Novosibirsk State Technical University, 20, Karl Marx Ave., Novosibirsk, 630073, Russian Federation, tel.: +7 (923) 256-25-77, e-mail: am@alfa-instr.ru.

Rubanovich Mikhail, D. Sc., professor, Novosibirsk State Technical University, 20, Karl Marx Ave., Novosibirsk, 630073, Russian Federation, tel.: +7 (903) 998-03-89, e-mail: mihail-nstu@mail.ru.