

**П.Г.Богомолов, М.Г. Рубанович, В.А. Хрусталева,
В.П. Разинкин**

ФГБОУ ВПО "Новосибирский государственный технический университет"

Широкополосный пленочный СВЧ аттенюатор

Представлены принципы построения широкополосных микроволновых аттенюаторов высокого уровня мощности, выполненных на основе планарных пленочных резисторов, нанесенных на бериллиевую керамику. Компенсация паразитных емкостных и индуктивных параметров пленочных резисторов осуществлена за счет встраивания согласованной резистивной Т-структуры в П-образный фильтр нижних частот, выполненный в виде отрезков микрополосковых линий передачи с различными волновыми сопротивлениями.

Ключевые слова: пленочный резистор, микрополосковая линия, диссипативные потери, фильтр нижних частот

В радиопередающих устройствах радиовещания, телевидения и систем связи измерение уровня мощности выходного сигнала и его информационных параметров осуществляется с помощью широкополосных аттенюаторов, обеспечивающих в метровом и дециметровом диапазоне частот рассеивание входной мощности высокочастотного сигнала до 1-2 кВт. Для построения таких аттенюаторов предложено использовать планарные пленочные резисторы, нанесенные на диэлектрическую подложку из бериллиевой керамики, обладающей хорошими диэлектрическими свойствами в указанном диапазоне частот и теплопроводностью, соизмеримой с теплопроводностью металла. Планарный пленочный резистор представляет собой отрезок микрополосковой линии (МПЛ) с продольными диссипативными потерями. За основу согласованного по входу и выходу микроволнового аттенюатора взята симметричная Т-образная структура, в которой пленочные резисторы соединены между собой отрезком МПЛ без диссипативных потерь с волновым сопротивлением ρ_2 , как показано на рис. 1.

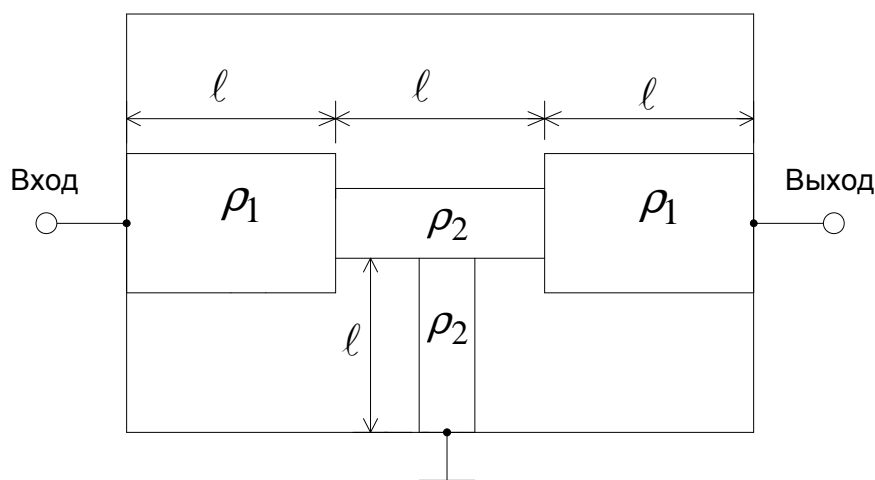


Рисунок 1

При этом для симметричной Т-образной структуры включения сосредоточенных резисторов их величины определяются соотношениями:

$$\frac{R1}{R} = \frac{R3}{R} = \frac{1 - K_u}{K_u + 1}, \quad \frac{R2}{R} = \frac{2K_u}{1 - K_u^2}, \quad (1)$$

где: $R1, R3$ - значение сопротивления сосредоточенных крайних резисторов симметричной Т- структуры, подключенных соответственно ко входу и выходу аттенюатора; $R2$ - значение сопротивления среднего сосредоточенного резистора симметричной Т-образной структуры аттенюатора; R - входное сопротивление аттенюатора; K_u - коэффициент передачи.

Обеспечение большой допустимой мощности входного высокочастотного сигнала достигнуто за счет отвода тепла через диэлектрическую подложку с высокой теплопроводностью на металлизированное основание, которое установлено на металлический радиатор с воздушным охлаждением. Для рассматриваемого микроволнового аттенюатора в соответствии с приведенной выше топологией, составлена эквивалентная схема на сосредоточенных элементах (рис. 2), позволяющая определить полосу рабочих частот.

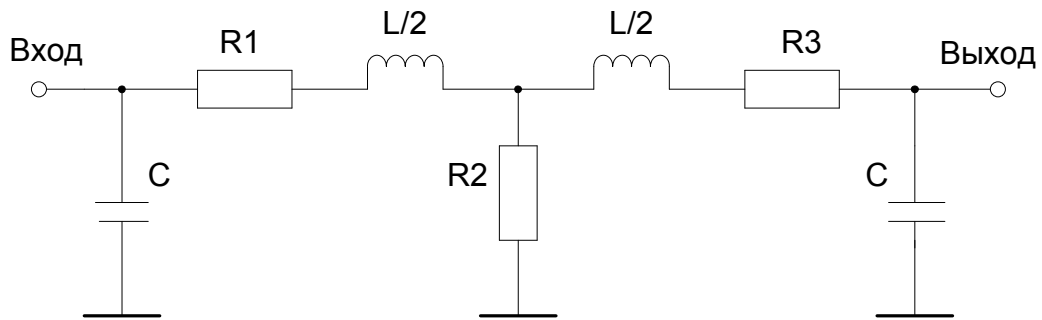


Рисунок 2

Эквивалентная схема рис. 2 учитывает свойства коротких ($\ell \leq \lambda / 8$) МПЛ с низким волновым сопротивлением ($\rho_1 < R$) и с высоким волновым сопротивлением ($\rho_2 > R$). Крайние пленочные резисторы Т-образной структуры представляют собой отрезки МПЛ с продольными диссипативными потерями и волновым сопротивлением ρ_1 . На эквивалентной схеме они приближенно представлены резисторами $R1$ и $R3$.

Паразитная емкость каждого из пленочных резисторов на эквивалентной схеме рис. 2 учтена двумя емкостями C . Соединительный отрезок МПЛ с высоким волновым сопротивлением ρ_2 на эквивалентной схеме рис. 2 описан двумя индуктивностями $L/2$. Резистор $R2$ соответствует среднему пленочному резистору Т-образной структуры (отрезок МПЛ с диссипативными потерями и волновым сопротивлением ρ_2 , один конец которого заземлен).

Из анализа эквивалентной схемы (рис. 2) следует, что в рассматриваемом микроволновом аттенюаторе симметричная Т-образная структура из пленочных резисторов встроена в П-образный фильтр нижних частот третьего порядка. Это позволило осуществить широкополосную компенсацию паразитных емкостей и индуктивностей пленочных резисторов. При использовании воздушного обдува

металлизированного основания и радиатора микроволновый аттенюатор обеспечивает в непрерывном режиме рассеивание мощности входного высокочастотного сигнала 250-300 Вт. Для многокаскадных аттенюаторов Т-образные резистивные структуры встраиваются в фильтр нижних частот более высокого порядка.

Входной импеданс среднего резистора Т-образной структуры определяется с помощью соотношения для короткозамкнутой линии передачи с продольными диссипативными потерями в микрополосковом проводнике:

$$Z(f) = \rho_2 \cdot \sqrt{1 - j \cdot \frac{r'_2}{2\pi f L'_2}} \cdot th \left(j \cdot 2\pi f \sqrt{L'_2 C'_2} \cdot \sqrt{1 - j \cdot \frac{r'_2}{2\pi f L'_2}} \cdot \ell \right), \quad (2)$$

где f - частота входного СВЧ сигнала; L'_2 - погонная индуктивность отрезка МПЛ; C'_2 - погонная емкость отрезка МПЛ; r'_2 - погонное сопротивление отрезка МПЛ; $j = \sqrt{-1}$.

Графики частотной зависимости реальной и мнимой составляющей импеданса $Z(f)$, рассчитанные по соотношению (2) для значения $\rho_2 = 62$ Ом и $\ell = 5$ мм, приведены на рис. 3.

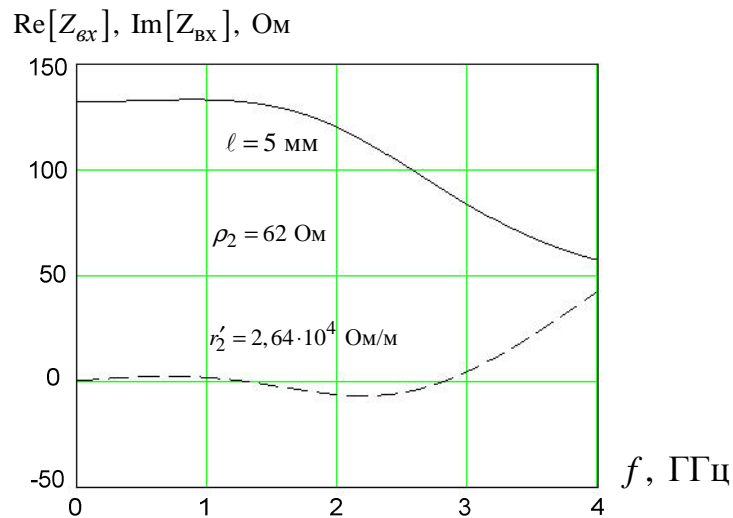


Рисунок 3

Входное сопротивление аттенюатора определяется с помощью последовательного расчета импедансов в плоскостях скачков волнового сопротивления на основе уравнения нагруженной линии передачи с диссипативными потерями:

$$Z_X(f) = \frac{Z(f) + \rho_{1(2)} \cdot \sqrt{1 - j \cdot \frac{r'_{1(2)}}{2\pi f L'_{1(2)}} \cdot th \left(j \cdot 2\pi f \sqrt{L'_{1(2)} C'_{1(2)}} \cdot \sqrt{1 - j \cdot \frac{r'_{1(2)}}{2\pi f L'_{1(2)}} \cdot \ell \right)}{1 + \frac{Z(f)}{\rho_{1(2)} \cdot \sqrt{1 - j \cdot \frac{r'_{1(2)}}{2\pi f L'_{1(2)}}} \cdot \sqrt{1 - j \cdot \frac{r'_{1(2)}}{2\pi f L'_{1(2)}} \cdot th \left(j \cdot 2\pi f \sqrt{L'_{1(2)} C'_{1(2)}} \cdot \sqrt{1 - j \cdot \frac{r'_{1(2)}}{2\pi f L'_{1(2)}} \cdot \ell \right)}} \quad (3)$$

Частотная зависимость коэффициента стоячей волны (КСВ) по входу аттенюатора на планарных пленочных резисторах с вносимым ослаблением 3 дБ ($K_u = 0,707$) и входным сопротивлением 50 Ом, полученная на основе (3), показана на рис. 4.

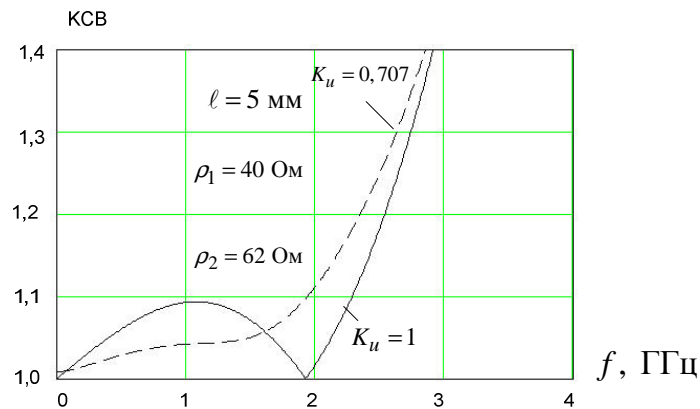


Рисунок 4

Амплитудно-частотная характеристика аттенюатора с вносимым ослаблением 3 дБ приведена на рис. 5.

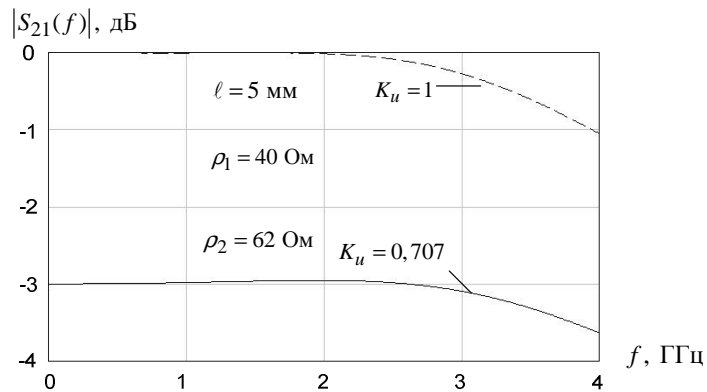


Рисунок 5

Как видно из рассмотрения рис. 4 рис. 5, полоса рабочих частот аттенюатора находится в пределах $0 \div 2,5$ ГГц, неравномерность АЧХ не превышает 0,1 дБ. В результате исследования частотных свойств аттенюатора было установлено, что между волновыми сопротивлениями соответствующих отрезков МПЛ должно выполняться соотношение:

$$\rho_1 \cdot \rho_2 = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \cdot \frac{R^2}{k}, \quad (4)$$

где α_1, α_2 - значения первого и второго нормированного элемента низкочастотного П-образного фильтра-прототипа третьего порядка; k - значение корректирующего коэффициента, равного 1,39 и учитывающего влияние скачков волнового сопротивления отрезков МПЛ от ρ_1 до ρ_2 .

Для построения мощных широкополосных аттенюаторов на пленочных резисторах с большим вносимым ослаблением применяется каскадное включение нескольких аттенюаторов, в которых рассеиваются равные мощности. На рис. 6 показана структурная

схема пятикаскадного аттенюатора с результирующим вносимым ослаблением 15 дБ и равным распределением рассеиваемых мощностей в каждом каскаде.

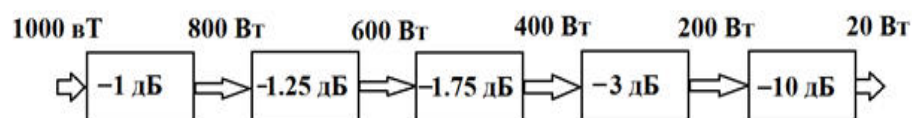


Рисунок 6

В заключении отметим, что предложенный подход позволил создать ряд опытных образцов широкополосных микроволновых аттенюаторов на уровень входной мощности высокочастотного сигнала 1,0 кВт для полосы частот 0-1,2 ГГц.

Библиографический список

1. Рубанович М.Г. Широкополосные аттенюаторы для измерения параметров выходного сигнала радиопередающих устройств / М.Г. Рубанович, В.А. Хрусталеv, Ю.В. Востряков, В.П. Разинкин // Датчики и системы (Москва); №6, 2012 г. С.15-20.
2. Разинкин В.П. Лабораторный стенд по курсу цифровое телевидение на основе аппаратно-программного оборудования DEKTEC / В.П. Разинкин, А.А. Абросимов // Известия высших учебных заведений. Физика. Т. 56, №10/3, С.166-168.
3. Абросимов А.А. Полосовые фильтры с эллиптическими характеристиками / А.А. Абросимов, В.П. Разинкин // Научный вестник НГТУ №1(46) 2012 г., С. 149-156.
4. Разинкин В.П. Широкополосная амплитудно-частотная коррекция / В.П. Разинкин, В.А. Хрусталеv, М.Г. Рубанович, Ю.В. Востряков, А.А. Абросимов // Радиопромышленность. Вып. № 1, 2012, С. 31-41.
5. Разинкин В.П. Анализ переходных процессов в нестационарных частотно-избирательных цепях / В.П. Разинкин, А.А. Абросимов, А.Д. Мехтиев // Научный вестник НГТУ, №2(47), 2012 г., С. 115-120.
6. Пат. № 2449431 РФ, МКИ6: Н01Р 1/100. Многоэлементная СВЧ нагрузка // К.А. Аубакиров, В.П. Разинкин, В.А. Хрусталеv, М.Г. Рубанович, Ю.В. Востряков, П.М. Воробьев // Изобретения. 27.04.12, №12.
7. Пат. № 2439754 РФ, МКИ6: Н01Р 1/203. Амплитудный корректор / В.П. Разинкин, В.А. Хрусталеv, М.Г. Рубанович, Ю.В. Востряков // Изобретения. 10.01.12, №1.