

# Сверхширокополосный эквалайзер СВЧ

А.А. Белоусов, Т.В. Старинова

АО «Центральное конструкторское бюро автоматики»

**Аннотация:** представлены результаты электромагнитного моделирования и макетирования пассивного эквалайзера с рабочим диапазоном частот от 1 до 18 ГГц.

**Ключевые слова:** эквалайзер, корректор АЧХ, СВЧ, сверхширокополосное устройство, тонкоплёночный конденсатор для поверхностного монтажа (ТКПМ)

## 1. Введение

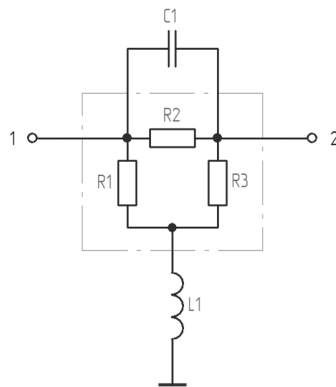
При проектировании многофункциональных широкополосных устройств СВЧ часто возникает необходимость в компенсации уменьшающегося с ростом частоты коэффициента передачи ( $K_p$ ) трактов.

Для реализации данной компенсации могут быть использованы специальные корректоры АЧХ - эквалайзеры. Возможные варианты физической реализации таких эквалайзеров приведены в ряде литературных источников [1 - 6].

В данной статье представлены результаты проектирования эквалайзера, обеспечивающего уровень коррекции 5 дБ в диапазоне 1 - 18 ГГц. Данный эквалайзер был изготовлен с применением отечественных технологий, имеет малые размеры и отличается простым схемотехническим и конструктивным решениями.

## 2. Подготовка образцов и экспериментальные результаты

На рисунке 1 приведена схема электрическая принципиальная предлагаемого эквалайзера [7]. Данный эквалайзер имеет вход и выход, обозначенные как 1 и 2, и содержит П-образный аттенюатор на планарных резисторах R1, R2, R3, конденсатор C1 и индуктивность L1.



**Рисунок 1.** Схема электрическая принципиальная эквалайзера

Эквалайзер работает следующим образом. На низких частотах величина затухания в эквалайзере определяется затуханием в согласованном на 50 Ом аттенюаторе с уровнем затухания 6дБ, который состоит из резисторов R1, R2, R3. По мере увеличения частоты конденсатор C1 начинает шунтировать резистор R2, а индуктивность L1 увеличивает комплексное сопротивление параллельных цепей (R1 - L1 и R3 - L1), что и приводит к снижению потерь в эквалайзере. Таким образом, с

увеличением частоты сигнала затухание в эквалайзере квазилинейно уменьшается.

Рассчитанные значения номиналов и геометрических размеров резисторов аттенюатора ([8], рисунок 2) с уровнем ослабления 6 дБ приведены в таблице 1.

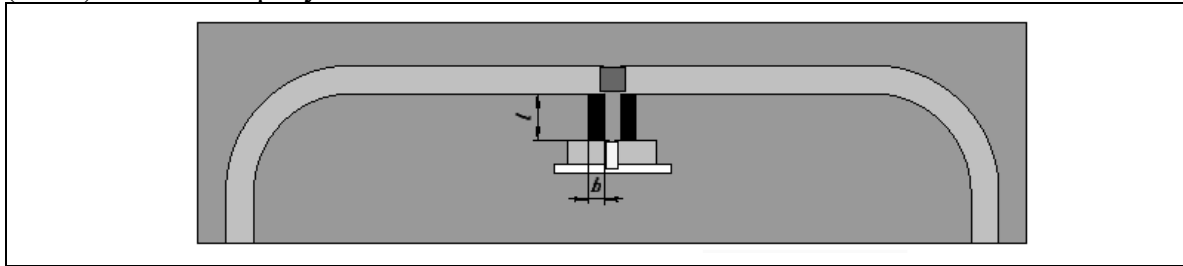
**Таблица 1.** Расчетные номиналы и геометрические размеры резисторов R1, R2, R3

Обозначение (рисунок 1)	Расчетный номинал резистора	Геометрические размеры (рис. 2), мм	
		Длина $l$	Ширина $b$
R1, R3	150	0,84	0,28
R2	37,5	0,3	0,4

### Моделирование эквалайзера в среде САПР Ansys HFSS

Модель содержит П-образный аттенюатор на планарных резисторах R1, R2, R3 (таблица 1), выполненный на подложке из поликора толщиной 0.5 мм, тонкопленочный конденсатор для поверхностного монтажа (ТКПМ) C1 с ёмкостью 1,5 пФ и индуктивность L1 в виде отрезка золотой фольги размерами 1.5x0.2x0.02 мм.

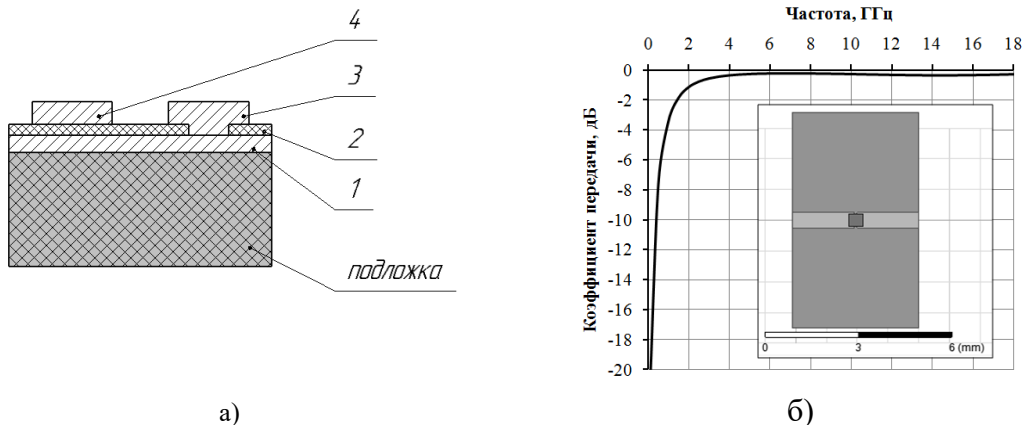
Внешний вид модели эквалайзера на плате с несимметричной полосковой линией (НПЛ) показан на рисунке 2.



**Рисунок 2.** Внешний вид модели эквалайзера на плате с НПЛ в среде САПР Ansys HFSS

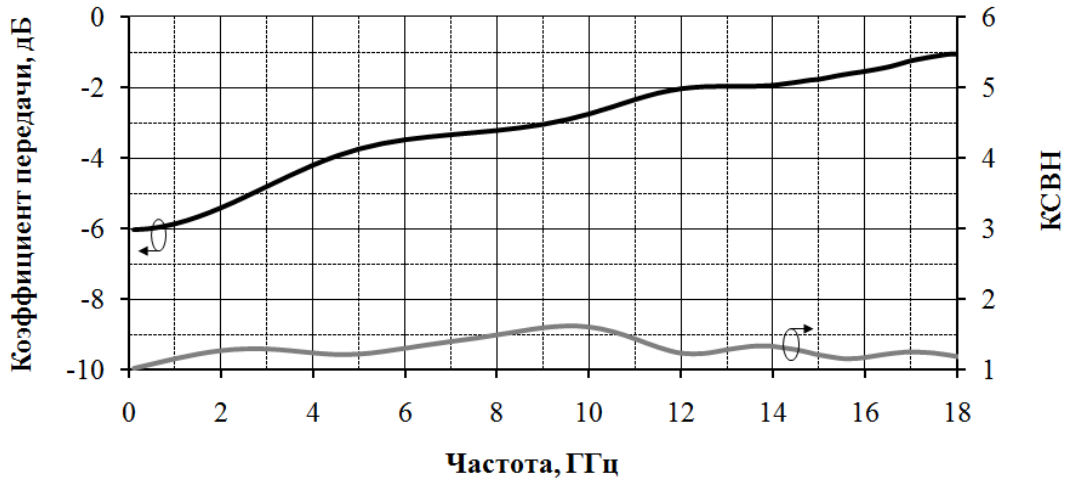
ТКПМ разработаны по аналогии с конструкцией, показанной в [9] и изготавливаются на технологической базе АО «ЦКБА». Эскиз конструкции ТКПМ приведён на рисунке 3а. Она содержит подложку из кристаллического кварца, на которой реализованы проводящий слой 1, изолирующий слой 2 из двуокиси кремния - SiO<sub>2</sub> и контактные площадки 3 и 4.

Внешний вид и амплитудно-частотная характеристика модели конденсатора в среде САПР Ansys HFSS, установленного в разрыв токнесущего проводника НПЛ, показаны на рисунке 3б.



**Рисунок 3.** Структура тонкопленочного конденсатора для поверхностного монтажа (а), внешний вид модели конденсатора 1.5 пФ в среде САПР Ansys HFSS, установленного в разрыв токнесущего проводника НПЛ, и её амплитудно-частотная характеристика (б)

Результаты электромагнитного моделирования предлагаемого эквалайзера (рисунок 2) в среде САПР Ansys HFSS с учетом толщины проводников и потерь в диэлектриках приведены на рис. 4.

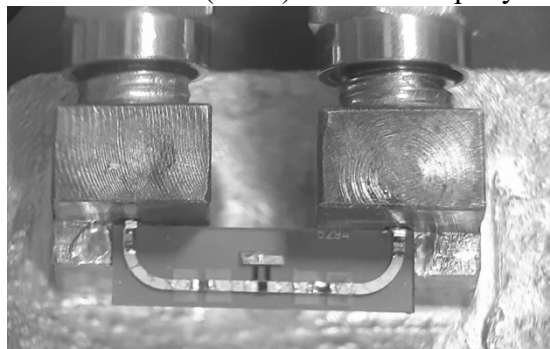


**Рисунок 4.** Частотные зависимости коэффициента передачи и КСВН модели эквалайзера в среде САПР Ansys HFSS (рисунок 2)

По результатам моделирования можно сделать вывод, что в диапазоне частот от 1 до 18 ГГц эквалайзер обеспечивает уровень коррекции 5 дБ, КСВН по входу не превышает 1.6.

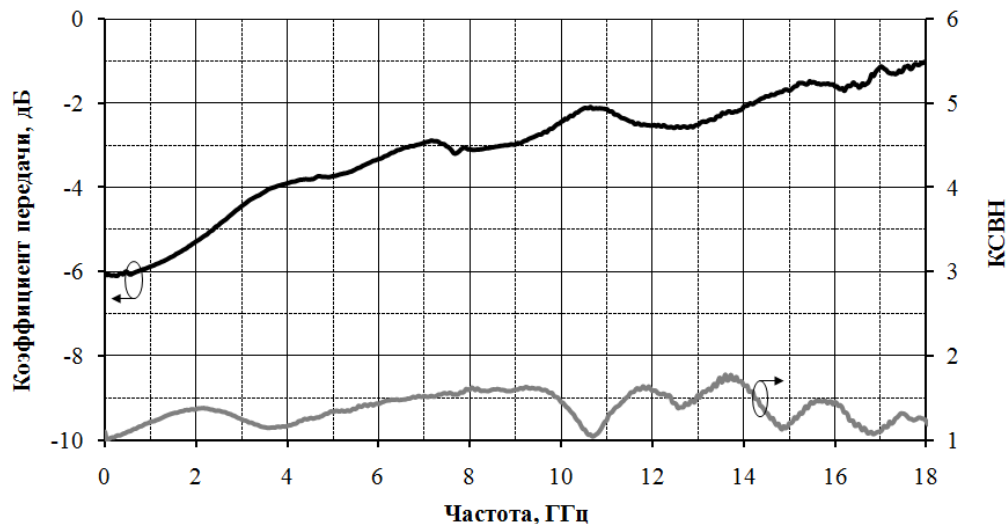
#### *Макетирование эквалайзера*

На подложке из поликора толщиной 0.5 мм были сформированы входные и выходные несимметричные полосковые линии и топология аттенюатора. Параллельно резистору R2 (рисунок 1) установлен ТКПМ номиналом 1.5 пФ. Отрезок золотой фольги (индуктивность L1) соединяет контактные площадки резисторов R1 и R3 с экраным проводником НПЛ. Внешний вид макета эквалайзера на плате с несимметричной полосковой линией (НПЛ) показан на рисунке 5.



**Рисунок 5.** Внешний вид макета эквалайзера на плате с НПЛ

Результаты измерений электрических характеристик макета эквалайзера приведены на рисунке 6.



**Рисунок 6.** Частотные зависимости коэффициента передачи и КСВН макета эквалайзера

По результатам макетирования можно сделать вывод, что при изменении частоты от 1 до 18 ГГц эквалайзер имеет диапазон изменения коэффициента передачи 5 дБ, КСВН по входу не превышает 1.8.

### 3. Заключение

В статье приведена схема электрическая принципиальная эквалайзера, описаны способ физической реализации и принцип работы эквалайзера, приведены результаты расчета геометрических размеров резисторов аттенюатора, показаны результаты моделирования эквалайзера в среде САПР Ansys HFSS, а также приведены результаты измерения электрических параметров макета эквалайзера.

Представленный эквалайзер обеспечивает уровень коррекции 5 дБ, имеет малые размеры и рабочий диапазон температур от минус 60 до 85°C, отличается простым схемотехническим и конструктивным решениями.

Предложенный эквалайзер может быть использован в трактах с НПЛ.

#### Список литературы

- George D. Vendelin, Anthony M. Pavio, Ulrich L. Rohde Microwave Circuit Design Using Linear and Nonlinear Techniques, John Wiley & Sons, 2005. 1058 p.
- Веселов Г. И. Микроэлектронные устройства. – М.: Высшая школа, 1988. – 280 с.
- Н. Wang, В. Yan, Z. Wang, R. Xu A Broadband Microwave Gain Equalizer // Progress In Electromagnetics Research Letters. 2012. Vol. 33. P. 63-72.
- [www.knowlescapacitors.com](http://www.knowlescapacitors.com)
- Kampa J., Petrus K. Microwave Amplitude Equalizer // 13th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications, 22-24 May, 2000. Wroclaw, 2000. P. 37-40.
- Chaturvedi G., Anand G. Non-Reflective Broadband Microwave Gain Equalizer for EW Applications // 2019 IEEE MTT-S International Microwave and RF Conference (IMARC), 13-15 December, 2019. Mumbai, 2019.
- Сельвинская К. А., Гольшко З. И. Расчет фазовых и амплитудных корректоров: Справ. 2-е изд. М.: Связь, 1980. 104 с.
- Бахарев С. И., Вольман В. И., Либ Ю. Н. [и др]. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств / под общ. ред. В. И. Вольмана. М.: Радио и связь, 1982. 328 с.
- Пат. 2460164 Российская Федерация, МПК Н 01 G 4/08. Тонкопленочный конденсатор для поверхностного монтажа в несимметричные полосковые линии / Вольхин Ю. Н., Глущенко В. А, Семёнов А. В., Хан А. В., Янковская Ю. В. №2010148280/07; заявл. 25.11.10; опубл. 27.08.12, Бюл. № 24.