

УДК 621.372.22

**Исследование частотных характеристик структуры
с двукратным модальным резервированием**

К.Н. Абрамова, А.В. Чуб

Научный руководитель: к.т.н. Е.С. Жечев

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 40, 634050

E-mail: kseniiia.n.abramova@tusur.ru

Investigation of frequency characteristics of the structure with double modal redundancy

K.N. Abramova, A.V. Chub

Scientific Supervisor: PhD. Y. S. Zhechev

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Russia, Tomsk,

Lenin str., 40, 634050

E-mail: kseniiia.n.abramova@tusur.ru

Abstract. *The paper presents the investigation results of the frequency characteristics of a structure with double modal redundancy (MR). The structure is implemented on a double-sided printed circuit board made of FR-4 with total dimensions of 130×75×1.5 mm. The authors used the FEM method to perform electrodynamic simulation of the structure characteristics in the frequency range from 0 to 18 GHz. The simulation and measurement results indicate that the structure with the double MR exhibits the characteristics of reflectionless low-pass filters. The cutoff frequency was 95 MHz when 1 conductor was primary.*

Keywords: *Electromagnetic interference, modal redundancy, electromagnetic compatibility.*

Введение

Одним из способов повышения надежности и отказоустойчивости электронных устройств является резервирование. При выходе из строя резервируемого устройства подключается его резервная копия, что позволяет продолжить работу в том же режиме без необходимости остановки для проведения диагностики и замены неисправного оборудования. Для одновременного повышения отказоустойчивости и помехозащищенности предложен способ холодного резервирования с применением модальной фильтрации, называемый модальным резервированием (МР) [1]. МР представляет собой способ трассировки, в котором предполагается наличие двух и более печатных проводников (основного и резервного/резервных), между которыми образуется сильная электромагнитная связь, что позволяет за счет модальных искажений реализовать защиту электронных устройств от электромагнитных помех. Увеличение кратности резерва позволяет повысить отказоустойчивость электронных устройств, за счет увеличения вариантов отказа, а также увеличить подавление ЭМП за счёт длительности импульсов разложения. Ранее уже были исследованы структуры с однократным [2] и трехкратным МР [3]. Целью же данной работы является проведение экспериментального исследования частотных характеристик структуры с двукратным МР.

Экспериментальная часть

На рисунке 1 приведены поперечное сечение и схема включения полосковой структуры с двукратным МР. Структура реализована на двухслойной печатной плате, на каждой стороне которой расположено по два проводника. Параметры поперечного сечения исследуемой структуры: толщина основания платы $h = 1,5$ мм, толщина фольги $t = 35$ мкм, ширина проводников $w = 1,8$ мм и расстояние между проводниками $s = 1$ мм. В качестве

основания платы выбран материал FR4 с относительной диэлектрической проницаемостью (ϵ_r) – 4,7 и тангенсом угла потерь ($\text{tg}\delta$) – 0,025.

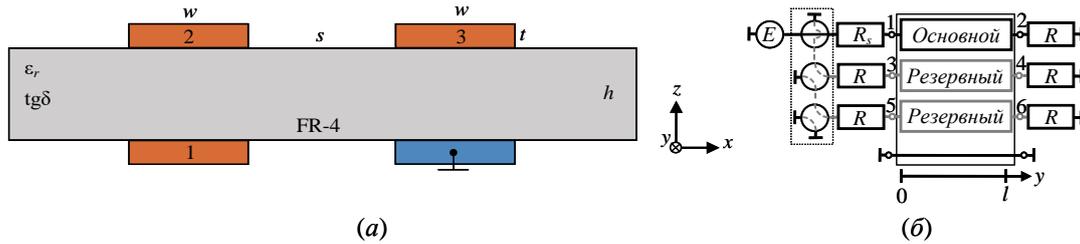


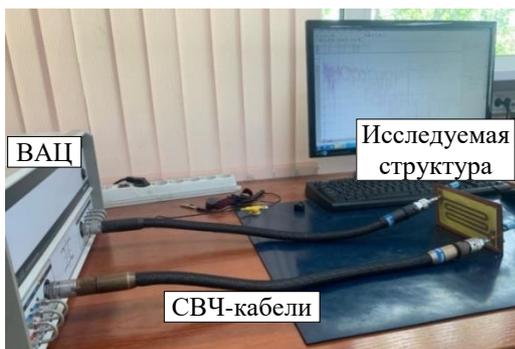
Рис. 1. Поперечное сечение и схема включения структуры с двукратным МР

Один из проводников 1, 2 или 3 может являться основным, в то время как два других будут резервными. Оставшийся (синий) проводник является опорным. Для согласования структуры с радиочастотным трактом, сопротивления резисторов R приняты равными 50 Ом. В случае отказа основной цепи, источник сигнала переключается на резервную цепь.

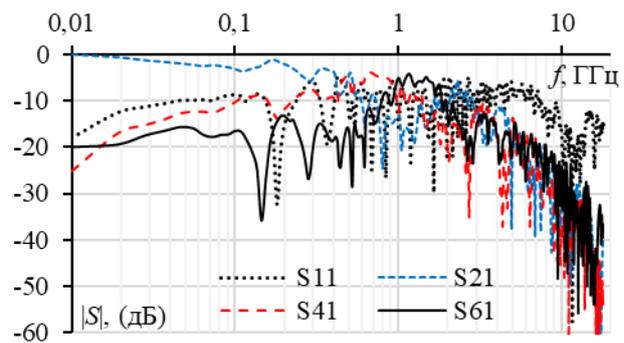
Для получения частотных характеристик структуры с двукратным МР выполнено электродинамическое моделирование и экспериментальное исследование в частотном диапазоне от 10 МГц до 18 ГГц. На рисунке 2а показана экспериментальная установка для анализа частотных характеристик, которая включает в себя: векторный анализатор цепей (ВАЦ) R4M18 (Микран), высокочастотные фазостабильные кабельные сборки, набор калибровочных мер (Микран), персональный компьютер и исследуемое устройство. Экспериментальное исследование проводилось на основе методики представленной в [4].

Результаты

Получены частотные зависимости вносимых и обратных потерь, а также перекрестных помех на дальних концах резервных проводников для случая, когда основным является первый проводник (рисунок 2б). В области нижних частот значения $|S_{21}|$, $|S_{43}|$ и $|S_{65}|$ близки к нулю, а на высоких частотах наблюдается характерный спад. Это говорит о том, что структура представляет собой фильтр нижних частот. Для случаев до отказа при подаче питания на первый проводник частота среза (f_c) составила 95 МГц. Частота первого резонанса (f_0) составила 0,81 ГГц.



(а)



(б)

Рис. 2. Экспериментальная установка (а) и частотные зависимости S -параметров для случая, когда основным является 1й проводники (б)

Часть энергии отражается в обратном направлении, для случаев до отказа возвратные потери получены в пределах -10 дБ. Максимальные значения $|S_{11}|$, $|S_{44}|$ и $|S_{66}|$ в полосе пропускания не превышают -8,7 дБ. Близкое расположение проводников приводит к тому, что значительная часть энергии передается на соседние резервные проводники – $|S_{41}|$ и $|S_{61}|$, $|S_{23}|$ и $|S_{63}|$ и $|S_{25}|$ и $|S_{45}|$. До 1 ГГц значения перекрестных помех на соседних проводниках возрастает, а с увеличением частоты начинает уменьшаться.

Для оценки результатов, полученных при моделировании и измерениях, выполнен FSV анализ. Для двух наборов данных, представленных на рисунке 3а, получены гистограммы глобальных параметров FSV (рисунок 3б). Видно, что частотные зависимости структуры с двукратным МР, полученные при моделировании и измерениях, согласуются с оценкой «Удовлетворительно». Тем не менее, 44 % дискретных значений частотных зависимостей согласуются с оценками «отлично», «очень хорошо», «хорошо».

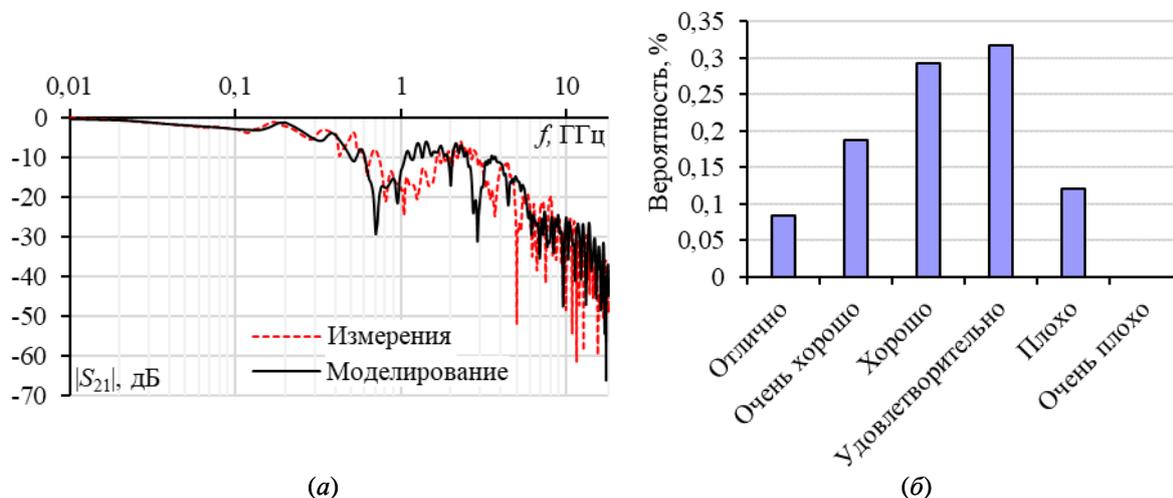


Рис. 3. Частотные зависимости $|S_{21}|$ (а), полученные при моделировании и измерениях, а также полученные для них гистограммы GDM (б)

Заключение

В результате проведенного исследования можно сделать вывод, что структура с двукратным МР обладает характеристиками фильтров нижних частот поглощающего типа. При подаче питания на 1 проводник частота среза составила 95 МГц. Частота первого резонанса составила 0,81 ГГц. Возвратные потери получены в пределах -10 дБ. Для оценки результатов моделирования и эксперимента выполнен FSV анализ. Результаты сравнения показали, что данные согласуются с оценкой «Удовлетворительно».

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда проект №20-19-00446, (<https://rscf.ru/project/23-19-45036/>) в ТУСУРе.

Список литературы

1. Газизов Т.Р., Орлов П.Е., Заболоцкий А.М., Буичкин Е.Н. Новый способ трассировки печатных проводников цепей с резервированием // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 3 (37). – С. 129–131.
2. Medvedev A.V., Zhechev Y.S. and Gazizov T.R. Experimental study of a structure with single modal reservation before and after failure // IEEE Trans. Electromagn. Compat. – 2022. – Vol. 64, № 4. – P. 1171–1181.
3. Medvedev A.V., Zhechev Y.S. and Gazizov T.R. Experimental Study of a Structure With Triple Modal Reservation Before and After Failures // IEEE Trans. Electromagn. Compat. – 2023. – Vol. 65, № 1. – P. 360–363.
4. Kosteletskii, V.P. Method for experimental study of circuits with triple modal reservation in time and frequency domains // International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon 2022). – 2022. – P. 1–6.