

Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы Instrument engineering, metrology and information and measuring devices and systems

Научная статья
УДК 621.372.22
DOI: 10.14529/ctcr250105

ОСЛАБЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ПОМЕХИ В СТРУКТУРЕ С ДВУХКРАТНЫМ МОДАЛЬНЫМ РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ

А.В. Чуб¹, andrei.chub@tusur.ru, <https://orcid.org/0009-0005-9084-6775>
К.Н. Абрамова¹, ksenii.a.abramova@tusur.ru
К.Д. Иконникова¹, idkartinka@gmail.com
Е.С. Жечев¹, evgenii.zhechev@tusur.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4469-7033>
Т.Т. Газизов², timurtsk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3204-2291>

¹ Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

² Сахалинский государственный университет, Южно-Сахалинск, Россия

Аннотация. В статье рассматривается метод повышения отказоустойчивости радиоэлектронного оборудования, называемый модальным резервированием, который сочетает в себе принципы резервирования и модальной фильтрации. Суть метода заключается в использовании сильной электромагнитной связи между двумя и более резервными проводниками для ослабления электромагнитных помех. Такой подход имеет ряд преимуществ, так как система может продолжать функционировать даже в случае отказа одного или нескольких проводников, что критически важно для обеспечения бесперебойной работы устройств. Метод модального резервирования эффективен в ситуациях, когда нужно минимизировать риски потери сигнала и снизить влияние помех, что делает его полезным в различных областях, где требуется высокая стабильность работы оборудования. **Цель исследования:** изучить характеристики асимметричных структур, выполненных с использованием двухкратного модального резервирования, и оценить их эффективность в различных условиях работы. **Материалы и методы.** Для достижения поставленной цели использованы электродинамический и квазистатический виды анализа, а также высокочастотные измерения. Исследование проведено в три этапа: до отказа основного проводника, после первого отказа и после второго отказа, что позволило детально оценить поведение системы на разных этапах. **Результаты.** Получены частотные и временные характеристики асимметричных структур с модальным резервированием. Для анализа данных использован FSV-метод, позволивший провести сравнительный анализ данных моделирования и измерений. Результаты показали высокую эффективность метода в ослаблении электромагнитных помех и обеспечении стабильной работы системы даже при переключении питания на резервные проводники. **Заключение.** Представленные исследуемые структуры подтверждают высокую практическую применимость метода модального резервирования для повышения отказоустойчивости радиоэлектронных систем.

Ключевые слова: модальное резервирование, отказы, электромагнитные помехи, метод валидации выделением особенностей, электромагнитная совместимость, трапецеидальный импульс

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00139, <https://rscf.ru/project/25-29-00139/>.

Для цитирования: Ослабление электромагнитной помехи в структуре с двухкратным модальным резервированием / А.В. Чуб, К.Н. Абрамова, К.Д. Иконникова и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2025. Т. 25, № 1. С. 53–68. DOI: 10.14529/ctcr250105

ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE ATTENUATION IN A STRUCTURE WITH DOUBLE MODAL REDUNDANCY

A.V. Chub¹, andrei.chub@tusur.ru, <https://orcid.org/0009-0005-9084-6775>

K.N. Abramova¹, kseniia.n.abramova@tusur.ru

K.D. Ikonnikova¹, idkartinka@gmail.com

Ye.S. Zhechev¹, evgenii.zhechev@tusur.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4469-7033>

T.T. Gazizov², timurtsk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3204-2291>

¹ Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

² Sakhalin State University, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

Abstract. This paper examines a method for enhancing the fault tolerance of radio-electronic equipment, termed modal redundancy, which combines the principles of redundancy and modal filtering. The essence of this method lies in utilizing strong electromagnetic coupling between two or more redundant conductors to mitigate electromagnetic interference. This approach offers several advantages, as the system can continue to operate even in the event of failure of one or more conductors, which is crucial for ensuring uninterrupted device operation. The modal redundancy method is effective in situations where it is necessary to minimize the risks of signal loss and reduce the impact of interference, making it valuable in various fields where high operational stability of equipment is required. **Research Objective:** To investigate the characteristics of asymmetric structures implemented using double modal redundancy and to evaluate their effectiveness under various operating conditions. **Materials and Methods.** To achieve the stated objective, electrodynamic and quasi-static analyses, as well as high-frequency measurements, were employed. The study was conducted in three stages: before the failure of the main conductor, after the first failure, and after the second failure, allowing for a detailed assessment of the system's behavior at different stages. **Results.** Frequency and time-domain characteristics of asymmetric structures with modal redundancy were obtained. The FSV method was used to analyze the data, enabling a comparative analysis of simulation and measurement data. The results demonstrated the high effectiveness of the method in mitigating electromagnetic interference and ensuring stable system operation, even when power is switched to redundant conductors. **Conclusion.** The presented investigated structures confirm the high practical applicability of the modal redundancy method for enhancing the fault tolerance of radio-electronic systems.

Keywords: modal redundancy, failures, electromagnetic interference, feature selective validation method, electromagnetic compatibility, trapezoidal pulse

Acknowledgments. The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 25-29-00139, <https://rscf.ru/project/25-29-00139/>.

For citation: Chub A.V., Abramova K.N., Ikonnikova K.D., Zhechev Ye.S., Gazizov T.T. Electromagnetic interference attenuation in a structure with double modal redundancy. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2025;25(1):53–68. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr250105

Введение

В процессе разработки радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), при эксплуатации которой регулярное обслуживание не представляется возможным, необходимо уделять большое внимание отказоустойчивости и электромагнитной совместимости. Особенно необходимо уделять внимание защите РЭА от мощных преднамеренных электромагнитных помех (ЭМП) [1]. Благодаря своей малой длительности и широкому спектру данные помехи способны проникать в электронные устройства и выводить критически важные узлы из строя. Одним из способов повышения отказоустойчивости является резервирование (рис. 1) [2].

Резервирование основано на простой идее – замена вышедшего из строя компонента на исправный. Для этого нужно иметь запасной элемент, однако сама замена может занять минуты, часы или даже дни, что для многих систем недопустимо. Резервирование может быть отдельным и общим (рис. 2), а число резервных элементов определяется кратностью резервирования (m).

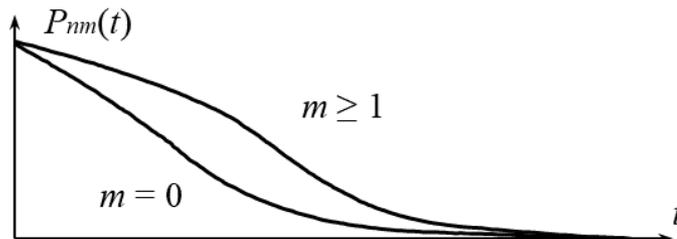


Рис. 1. Вероятность безотказной работы резервированной ($m \geq 1$) и нерезервированной ($m = 0$) систем
Fig. 1. Probability of fail-safe work of redundant ($m \geq 1$) and non-redundant ($m = 0$) systems

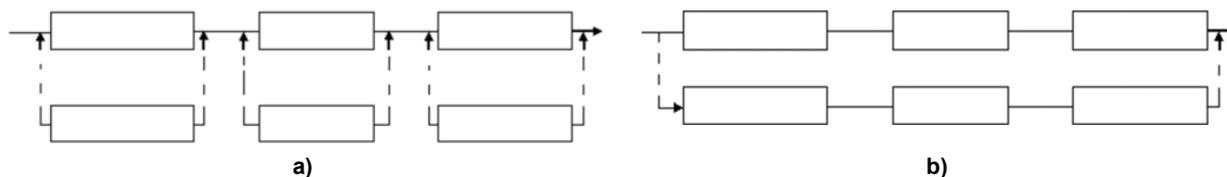


Рис. 2. Раздельное (а) и общее (б) резервирование с включением резерва замещения
Fig. 2. Separate (a) and common (b) redundancy with switching on the reserve of substitution

При раздельном резервировании (рис. 2а) каждый отдельный элемент имеет резерв в запасе. При выходе из строя конкретного элемента цепи только он заменяется на резервный. Данный метод подходит при наличии хорошо развитой системы диагностики неисправностей, которая позволяет избежать остановки всей системы [3]. В случае применения общего резервирования, при отказе одного или нескольких элементов основной цепи происходит переключение питания на резервную цепь [4].

Чтобы повысить помехозащищенность и отказоустойчивость, существует метод модального резервирования (МР) [5]. Данный метод подразумевает под собой 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 сверхширокополосных (СШП) ЭМП. Помимо однократного МР [6], включающего основной и резервный проводники, также существуют двухкратное [7] и трехкратное [8] МР. Они содержат два и три резервных проводника. Увеличение кратности резерва позволяет повысить отказоустойчивость электронных устройств за счет увеличения вариантов отказа, а также увеличить подавление ЭМП за счет длительности импульсов разложения. Из-за внесения большой избыточности применение многократного МР можно рассматривать для отдельных цепей, наиболее уязвимых к ЭМП в структуре с МР.

Среди данных видов МР менее изученным является двухкратное по сравнению с однократным и трехкратным. Двухкратное МР является более отказоустойчивым по сравнению с однократным и простым в реализации по сравнению с трехкратным. Метод двухкратного МР является «золотой серединой» для обеспечения отказоустойчивости, помехозащищенности и является более простым в реализации.

Структуры с двухкратным модальным резервированием

На рис. 3 приведены поперечные сечения полосковых структур с двухкратным МР. Структура, находящаяся на рис. 3а, является двухслойной. Сигнальный и опорный проводники выполняются на нижнем слое подложки, а два оставшихся сигнальных выполняются на верхнем слое подложки зеркально нижнему слою [9]. Поперечное сечение, изображенное на рис. 3б, представляет собой однослойную структуру с исполнением сигнальных проводников по краям подложки. Сигнальные и опорные проводники расположены последовательно друг за другом, начиная с сигнального и заканчивая им же. На рис. 3с представлена однослойная структура, где опорные и сигнальные проводники расположены друг за другом, начиная с опорного и заканчивая им же.

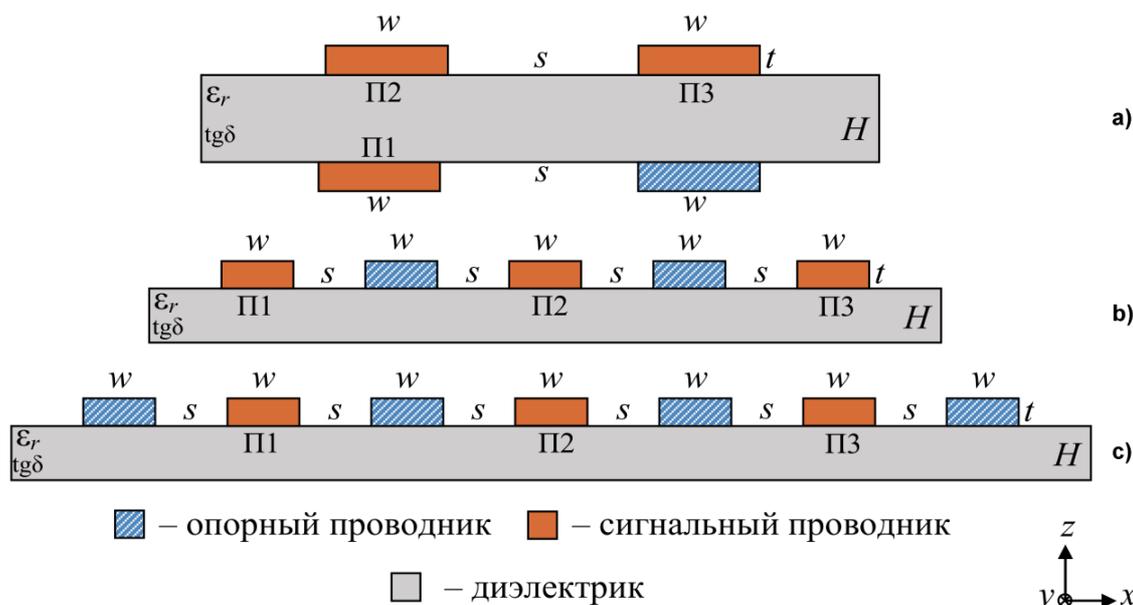


Рис. 3. Поперечные сечения двухслойной структуры (а), с крайними сигнальными проводниками (b) и с крайними опорными проводниками (с)
Fig. 3. Cross sections of a double-layer structure (a), with outermost signal conductors (b) and with outermost ground conductors (c)

Параметры диэлектрика и проводников представлены в таблице. Электрофизические параметры подложки были взяты для реально существующих диэлектрических материалов.

Геометрические параметры диэлектрика
Geometrical parameters of the dielectric material

Параметр	Двухслойная структура	Однослойная структура
Ширина проводника (w), мкм	1800	600
Расстояние между проводниками (s), мкм	1000	900
Толщина проводника (t), мкм	35	35
Толщина диэлектрика (H), мкм	1500	45

В работе использованы стеклотекстолит марки FR-4 с относительной диэлектрической проницаемостью (ϵ_r) – 4,5 и тангенсом угла потерь ($\text{tg}\delta$) – 0,02 и препрег марки TU-85P NF [10] с $\epsilon_r = 3,5$ и $\text{tg}\delta = 0,035$ для однослойных структур.

Один из сигнальных проводников является основным, а два других являются резервными. Когда происходит отказ на основном проводнике, питание переключается на резервный сигнальный проводник. При возникновении второго отказа питание переключится на оставшийся сигнальный проводник. Эквивалентные схемы включения до отказа, после первого отказа и после второго отказа представлены на рис. 4. На ближний конец основного проводника подключается источник э.д.с., а дальний конец подключается через нагрузку R к схемной земле. Сопротивление нагрузки до отказа составляет 50 Ом. Это необходимо для согласования структуры с трактом. Отказ на одном из концов отказавшей цепи может быть представлен в виде низкоомной ($K3$) или высокоомной (XX) нагрузки.

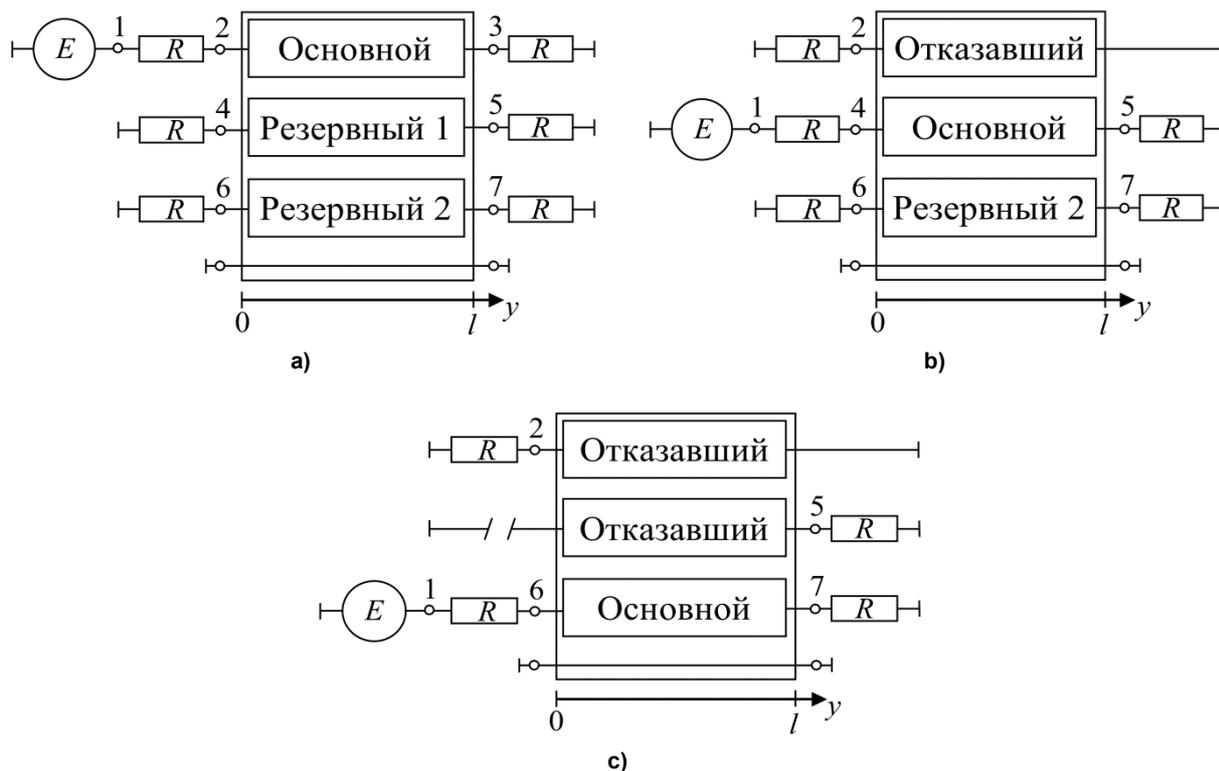


Рис. 4. Эквивалентная схема включения структур с двухкратным МР до отказа (а), после первого отказа (б), после второго отказа (с)
Fig. 4. Connection diagrams of the structures with double MR before failure (a), after the first failure (b), after the second failure (c)

Квазистатическое моделирование

Для предварительного расчета исследуемых структур использован квазистатический анализ. Данный подход менее ресурсозатратный, что позволяет без проблем выполнить большой объем вычислений. Система TALGAT [11] использует данный метод моделирования. В данной системе были созданы поперечные сечения исследуемых структур (рис. 5).

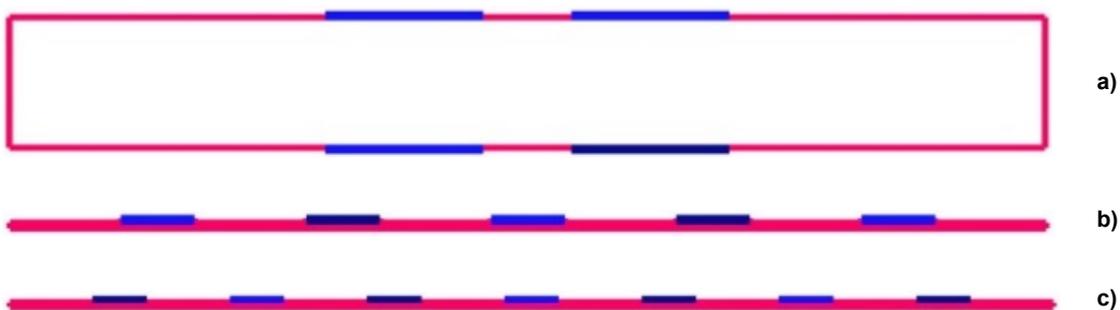


Рис. 5. Поперечные сечения двухслойной структуры (а), с крайними сигнальными проводниками (б) и с крайними опорными проводниками (с) в системе TALGAT
Fig. 5. Cross sections of the double-layer structure (a), with outermost signal conductors (b) and with outermost ground conductors (c) in the TALGAT system

Схемы включения исследуемых структур до отказа, после первого отказа и после второго отказа, реализованные в системе TALGAT, представлены на рис. 6. Длина двухслойной структуры составляет 520 мм, а однослойных – 200 мм.

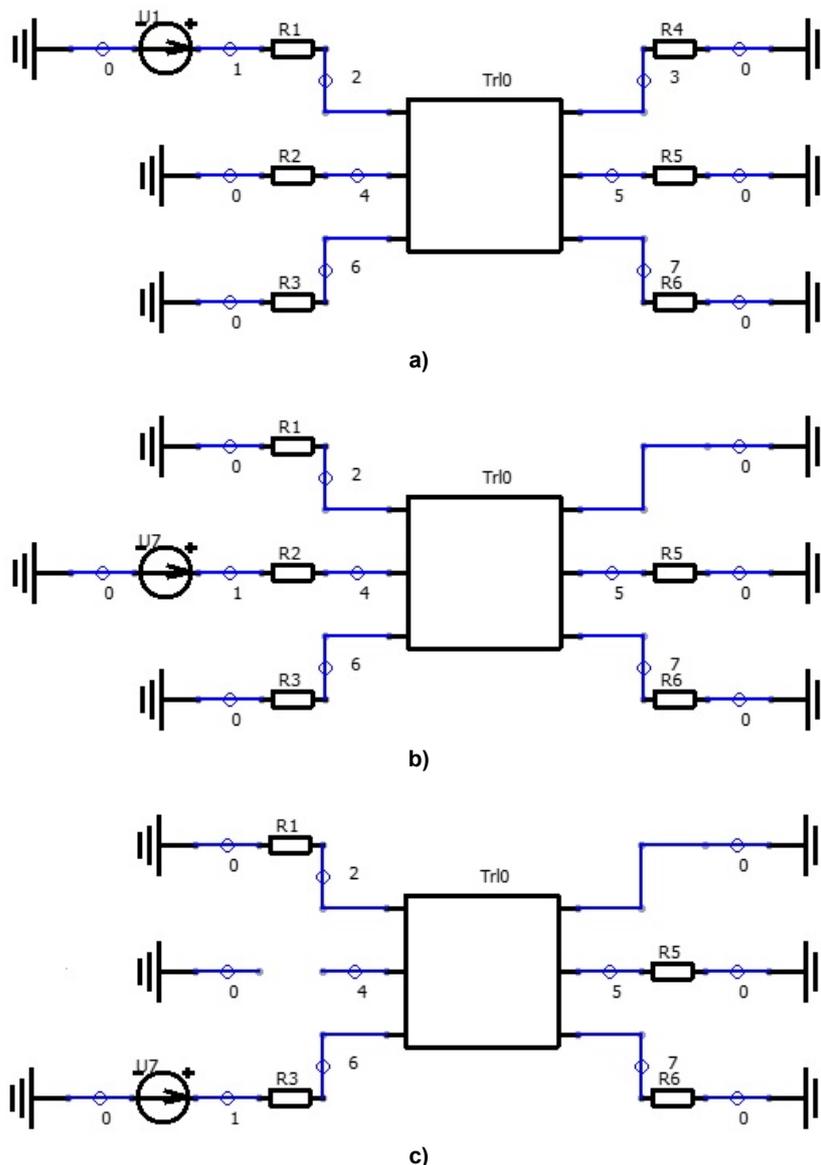


Рис. 6. Эквивалентная схема включения структур с двукратным МР до отказа (а), после первого отказа (б), после второго отказа (с) в системе TALGAT
 Fig. 6. Connection diagrams of the structures with double MR before failure (a), after the first failure (b), after the second failure (c) in the TALGAT system

Для расчета выбрана электромагнитная помеха (ЭМП) в виде трапециевидального импульса амплитудой 100 В и общей длительностью 300 пс. На рис. 7–9 приведены формы сигнала на дальнем конце основного проводника, полученные в результате воздействия ЭМП.

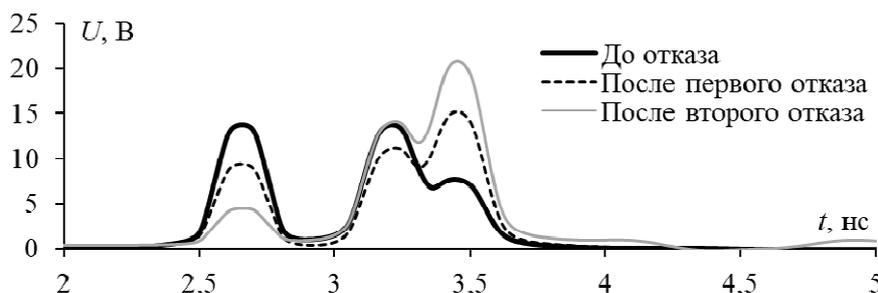


Рис. 7. Форма сигнала на дальнем конце основного проводника двухслойной структуры
 Fig. 7. Signal waveform at the far end of the main conductor of the double layer structure

Пиковое значение напряжений до отказа, после первого отказа и после второго отказа равно 13,8, 15,2 и 20,8 В соответственно. Задержка отклика составляет 2,5 нс. Полученные результаты показывают, что максимальная амплитуда ЭМП до отказа уменьшилась в 7,2 раза, после первого отказа – в 6,6 раза, а после второго отказа – в 4,8 раза.

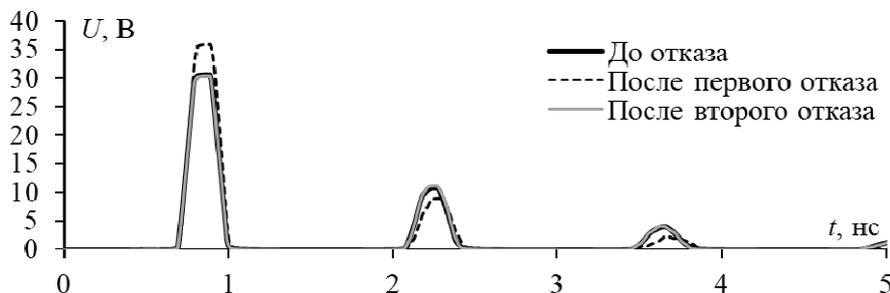


Рис. 8. Временной отклик на дальнем конце структуры с крайними сигнальными проводниками

Fig. 8. Time response at the far end of the structure with outermost signal conductors

До отказа, после первого отказа, после второго отказа максимальная амплитуда напряжений составила 30,6, 35,8 и 30,4 В соответственно. Время задержки для всех случаев составляет 0,7 нс для всех случаев. Форма напряжений имеет схожий характер даже после отказов. В случае до отказа и после второго отказа видно полное сходжение сигналов, это можно объяснить тем, что данные проводники имеют одинаковую электромагнитную обстановку, находясь на краях ПП.

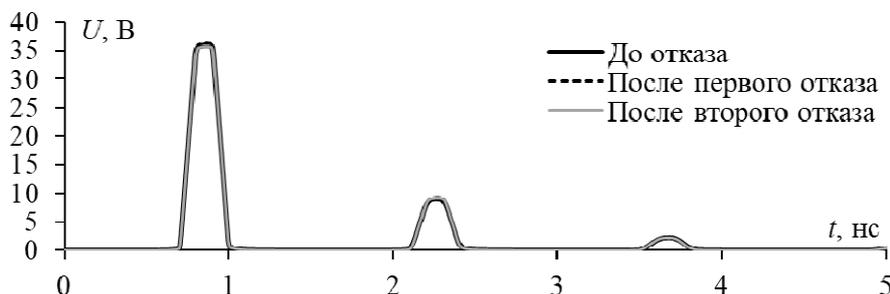


Рис. 9. Временной отклик на дальнем конце основного проводника структуры с крайними опорными проводниками

Fig. 9. Time response at the far end of the main conductor of the structure with outermost ground conductors

Максимальное напряжение на дальнем конце до отказа, после первого отказа и после второго отказа равно 35,9, 36,3 и 35,8 В соответственно. Время задержки отклика для всех случаев составляет 0,68 нс для всех случаев. Форма напряжений имеет схожий характер даже после отказов. Это говорит о том, что у всех проводников одинаковая электромагнитная обстановка.

Электродинамическое моделирование

Система Comsol Multiphysics [12] использована для электродинамического расчета исследуемых структур. В данной системе можно рассчитывать трехмерные модели, схемы электронных устройств и другую технику. При использовании этого метода уравнения Максвелла решаются полностью, без упрощений. В ходе расчета электродинамическим подходом были созданы трехмерные модели структур с двухкратным МР на двухслойной и однослойной печатной плате (рис. 10).

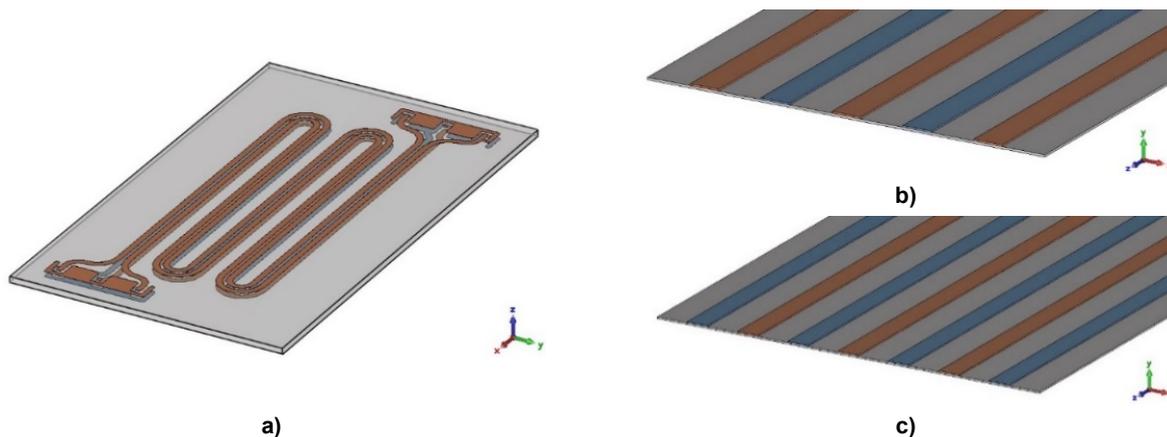


Рис. 10. Трехмерные модели двухслойной структуры (а), с крайними сигнальными проводниками (b) и с крайними опорными проводниками (с)
 Fig. 10. 3D models of the two-layer structure (a), with outermost signal conductors (b) and with outermost ground conductors (c)

В случае квазистатического моделирования структура представляла собой длинную ПП длиной 520 мм. В случае электродинамического подхода структура представляет собой меандр общей длиной 520 мм. Однослойные структуры геометрически остались без изменения. В результате расчета были получены временные отклики на дальних концах основного проводника (рис. 11–13).

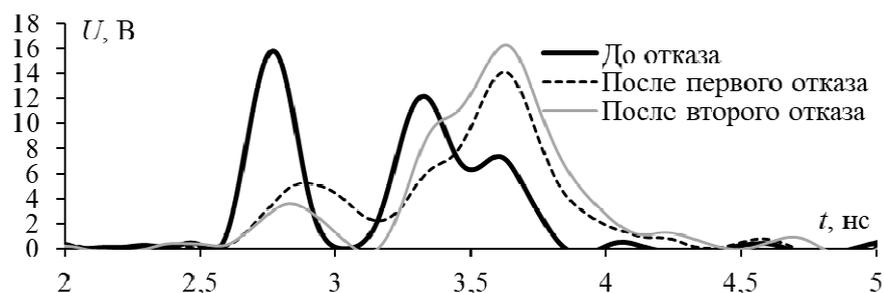


Рис. 11. Временной отклик на дальнем конце основного проводника модели двухслойной структуры
 Fig. 11. Time response at the far end of the main conductor of the double layer structure model

Для случая до отказа, после первого отказа и после второго отказа максимальное значение амплитуды равно 15,8, 14,1 и 16,2 В соответственно. Задержка мод по отклику равна 2,55 нс. Максимальная амплитуда ЭМП до отказа уменьшилась в 6,3 раза, после первого отказа – в 7,1 раза, а после второго отказа – в 6,2 раза. По графику видно, что после отказов происходит разложение импульса помехи.

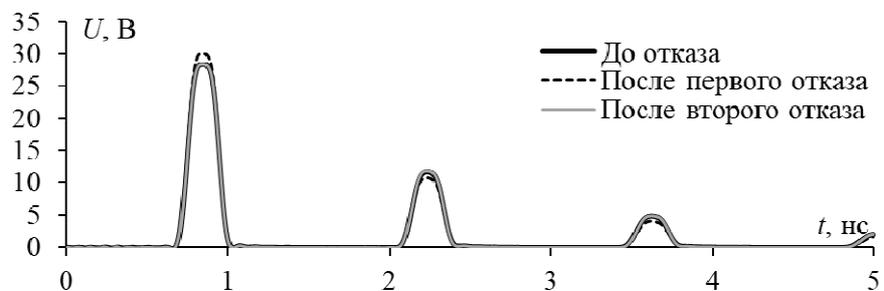


Рис. 12. Временные отклики на дальнем конце модели структуры с крайними сигнальными проводниками
 Fig. 12. Time responses at the far end of the model structure with outermost signal conductors

Пиковое напряжение на дальнем конце до отказа, после первого отказа и после второго отказа составила 28,4, 30,1 и 28,3 В соответственно. Задержка мод по отклику равна 0,68 нс для всех случаев.

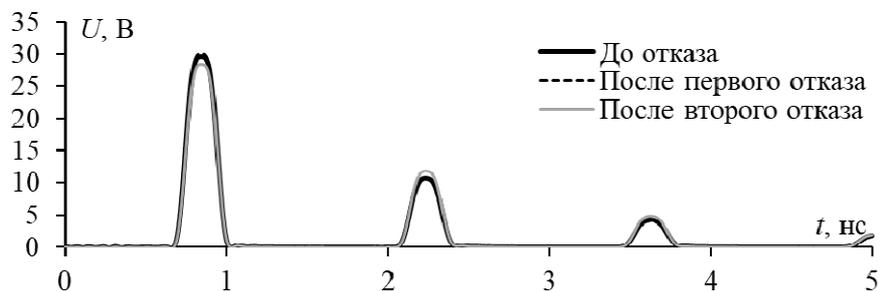


Рис. 13. Временные отклики модели структуры с крайними опорными проводниками
Fig. 13. Time responses of the structure model with outermost ground conductors

Амплитуда помехи на дальнем конце до отказа, после первого отказа и после второго отказа составила 29,6, 30,1 и 28,3 В соответственно. Время задержки равно 0,67 нс для всех случаев.

Экспериментальное исследование

На рис. 14 изображена лабораторная установка для измерения частотных характеристик, которая состоит из исследуемого устройства (ИУ), высокочастотных кабелей, векторного анализатора цепей (ВАЦ) R4M18 (Микран) [13], персонального компьютера.



Рис. 14. Экспериментальная установка
Fig. 14. Experimental setup

Перед началом измерений выполнена двухпортовая SOLT (Short-Open-Load-Thru) калибровка ВАЦ. Далее к одному из сигнальных проводников подключался ВАЦ. К оставшимся сигнальным проводникам подключалась согласованная нагрузка 50 Ом. Для имитации отказа на один из концов сигнального проводника подключалась низкоомная или высокоомная нагрузка. Измерения проводились в диапазоне от 10 МГц до 10 ГГц с шагом 10 МГц, после чего полученные данные сохранялись в документ в формате SNP. Данный документ импортировался в Comsol, где проводился дальнейший расчет временного отклика. В Comsol создается модель ИУ. После на вход модели подается воздействие в виде трапецеидального импульса.

Изготовлены прототипы исследуемых структур (рис. 15) Для изготовления двухслойной структуры был использован фольгированный стеклотекстолит класса FR-4 размером 130 × 75 мм. Для однослойных структур использовался односторонний полиимид марки TU-85P NF.

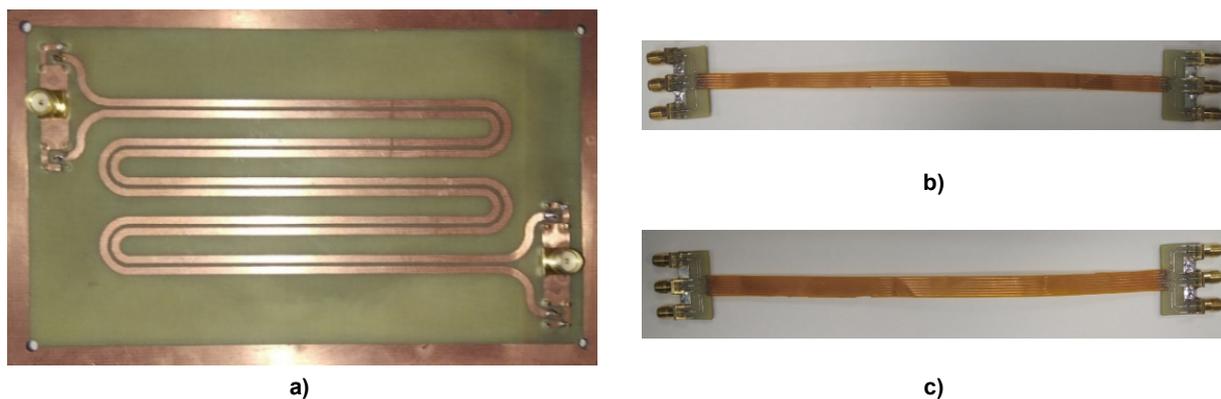


Рис. 15. Прототипы двухслойной структуры (а), с крайними сигнальными проводниками (b) и с крайними опорными проводниками (с)
 Fig. 15. Prototypes of the two-layer structure (a), with outermost signal conductors (b) and with outermost ground conductors (c)

В результате эксперимента были получены временные отклики на дальнем конце основного проводника. Данные зависимости представлены на рис. 16–18.

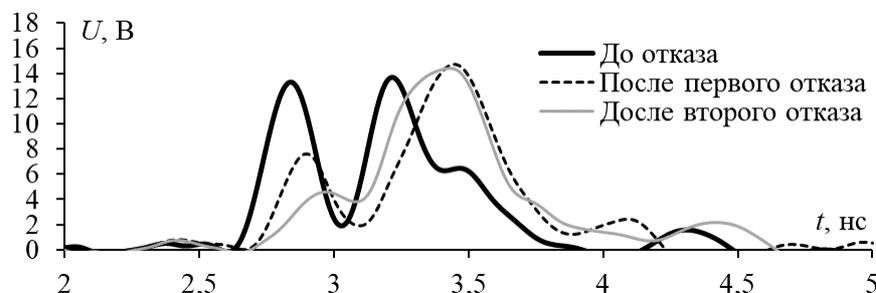


Рис. 16. Временной отклик на дальнем конце основного проводника прототипа двухслойной структуры
 Fig. 16. Time response at the far end of the main conductor of the prototype double-layer structure

Напряжение на дальнем конце основного проводника равны 13,7 В до отказа, 14,7 В после первого отказа, 14,4 В после второго отказа. Задержка составляет до отказа 2,64 нс, после первого отказа – 2,67 нс и после второго отказа – 2,7 нс.

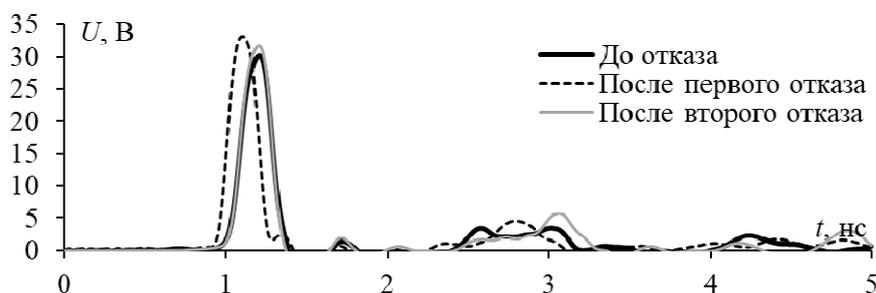


Рис. 17. Временные отклики на дальнем конце прототипа структуры с крайними сигнальными проводниками
 Fig. 17. Time responses at the far end of a prototype structure with outermost signal conductors

Пиковое значение напряжения на дальнем конце основного проводника равны 30,14 В до отказа, 33,2 В после первого отказа, 31,7 В после второго отказа. Задержка составляет до отказа 0,91 нс, после первого отказа – 0,78 нс и после второго отказа – 0,89 нс.

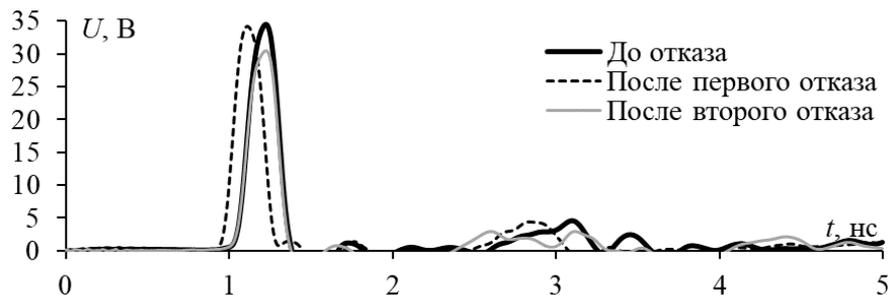


Рис. 18. Временные отклики на дальнем конце прототипа структуры с крайними опорными проводниками
Fig. 18. Time responses at the far end of a prototype structure with outermost ground conductors

Пиковое напряжение составило до отказа 34,55 В, после первого отказа – 34,26 В, и после второго отказа – 30,52 В. Время задержки до отказа и после второго отказа составляет 1,02 нс, а для случая после первого отказа составляет 0,96 нс.

Сравнительный анализ моделирования и эксперимента

В данной статье проводится сравнение результатов моделирования и эксперимента с помощью метода валидации выделением особенностей (Feature Selective Validation, FSV) [14]. Оценка с помощью метода FSV используется для определения приемлемости соответствия между эталоном и новыми результатами. Этот метод сочетает измерение разности амплитуд (ADM) и измерение разности характера (FDM), который дает лучшее представление о согласии между двумя наборами данных. Затем ADM и FDM объединяются для формирования глобального измерения разности (GDM). FSV-метод был откалиброван таким образом, чтобы соответствовать человеческому «экспертному» сравнению для принятия решений, которые в некоторой степени субъективны, но будут содержать ярлыки, описывающие соответствие, такие как «отлично», «очень хорошо», «хорошо», «плохо» и т. д. [15]. В качестве валидационного эталона выступает один набор данных, в качестве «новых результатов» выступает другой набор данных.

В процессе моделирования и эксперимента были получены матрицы рассеяния. Благодаря полученным данным были построены частотные зависимости в диапазоне от 10 МГц до 10 ГГц. На рис. 19 представлена частотная зависимость вносимых потерь двухслойной структуры.

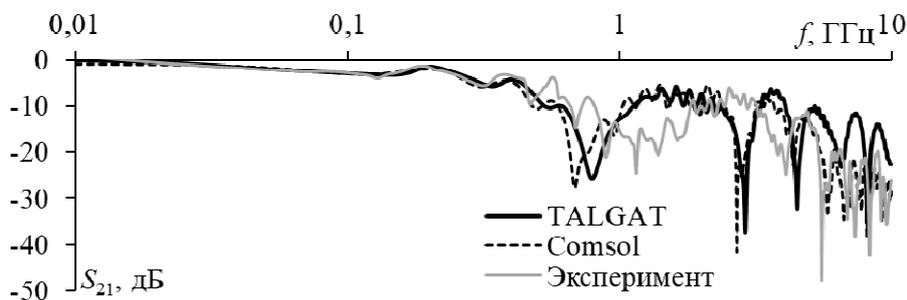


Рис. 19. Частотные зависимости вносимых потерь двухслойной структуры
Fig. 19. Frequency dependences of insertion loss of a double-layer structure

Частотные зависимости применялись для FSV-анализа. На рис. 20 изображены гистограммы глобального измерения разности. В качестве валидационного эталона выступает один из двух результатов.

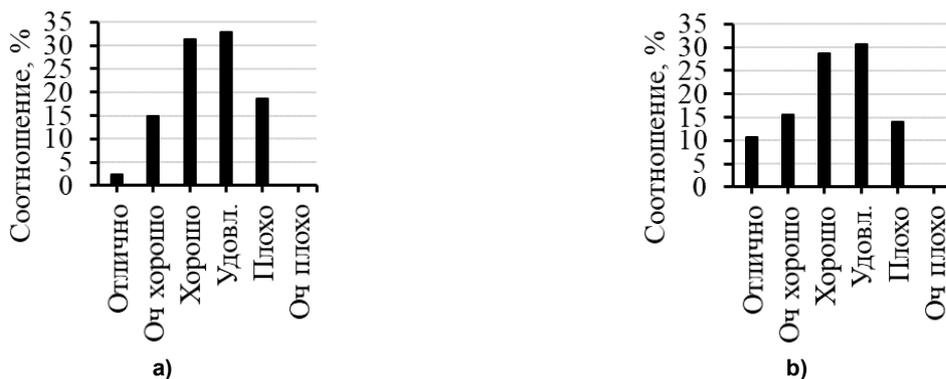


Рис. 20. Гистограмма GDM для результатов TALGAT и Comsol (a) и Comsol и эксперимента (b) двухслойной структуры

Fig. 20. GDM histogram for the results of TALGAT and Comsol (a) and Comsol and experiment (b) double layer structure

Полученные гистограммы показывают, что частотная зависимость, полученная в системе TALGAT и COMSOL, согласуются с оценкой «удовлетворительно». В то же время 49 % дискретных значений частотной зависимости имеют оценку «отлично», «очень хорошо» и «хорошо». Сравнение результатов, полученных с помощью эксперимента и COMSOL, показало, что 55 % дискретных значений согласуются с оценкой «отлично», «очень хорошо» и «хорошо». Далее на рис. 21 представлены частотные зависимости однослойной структуры с крайними сигнальными проводниками.

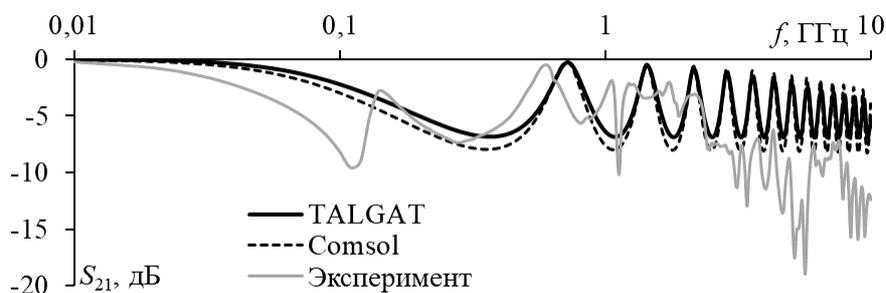


Рис. 21. Частотные зависимости вносимых потерь однослойной структуры с крайними сигнальными проводниками

Fig. 21. Frequency dependences of insertion loss of a single-layer structure with outermost signal conductors

На рис. 22 изображены гистограммы GDM для FSV-анализа.

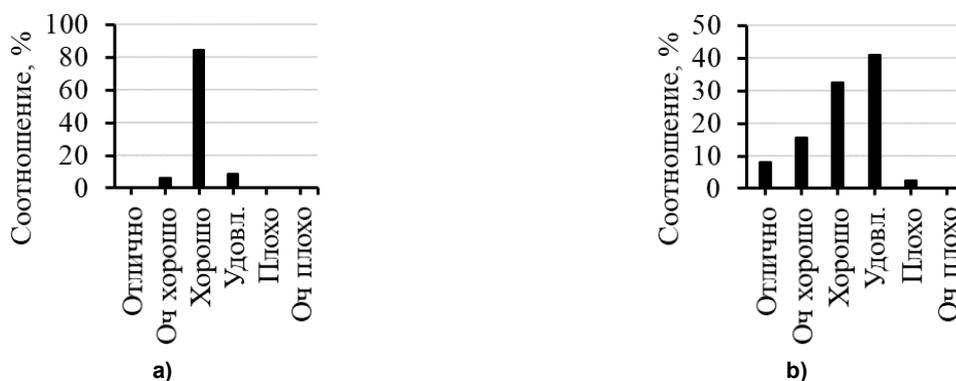


Рис. 22. Гистограмма GDM для результатов TALGAT и COMSOL (a) и COMSOL и эксперимента (b) однослойной структуры с крайними сигнальными проводниками

Fig. 22. GDM histogram for the results of TALGAT and COMSOL (a) and COMSOL and experiment (b) single layer structure with outermost signal conductors

Гистограммы показывают, что результаты TALGAT и COMSOL согласуются с оценкой «хорошо». В то же время результаты COMSOL и эксперимента согласуются с оценкой «удовлетворительно». Однако 56 % дискретных значений согласуются с оценками «хорошо», «очень хорошо» и «отлично». На рис. 23 представлены частотные зависимости структуры с крайними опорными проводниками.

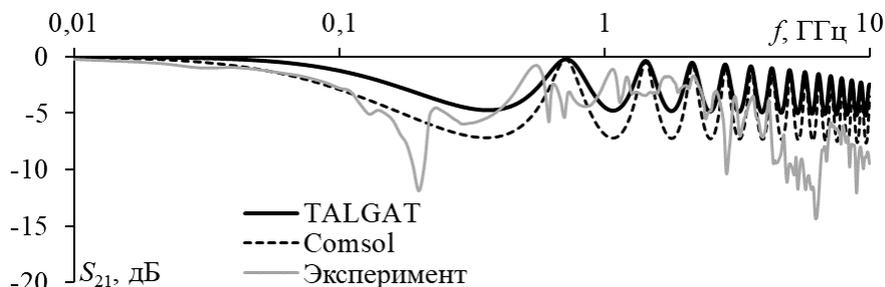


Рис. 23. Частотные зависимости вносимых потерь однослойной структуры с крайними опорными проводниками
Fig. 23. Frequency dependences of insertion loss of a single-layer structure with outermost ground conductors

На рис. 24 изображены гистограммы глобального измерения разности.

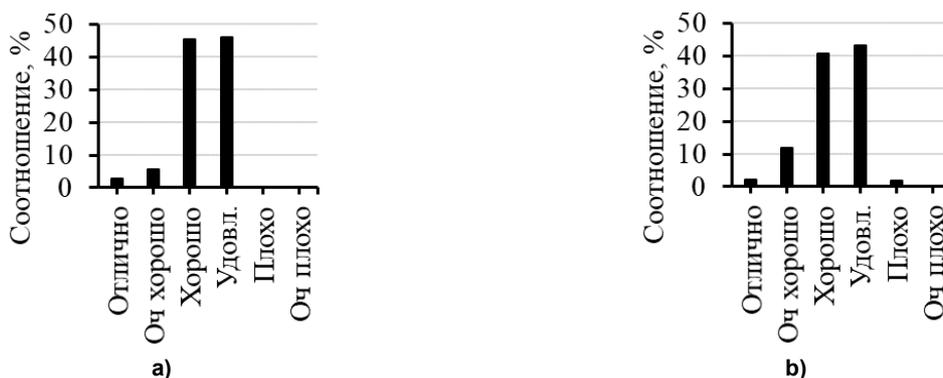


Рис. 24. Гистограмма GDM для результатов TALGAT и COMSOL (a) и COMSOL и эксперимента (b) однослойной структуры с крайними опорными проводниками
Fig. 24. GDM histogram for the results of TALGAT and COMSOL (a) and COMSOL and experiment (b) single layer structure with outermost ground conductors

Из полученной гистограммы видно, что частотные зависимости, полученные в системе TALGAT и COMSOL, согласуются с оценкой «удовлетворительно». Тем не менее 54 % дискретных значений частотной зависимости согласуются с оценками «отлично», «очень хорошо» и «хорошо». Далее был проведен сравнительный анализ результатов моделирования в системе COMSOL и эксперимента, который показал, что значения больше всего согласуются с оценкой «удовлетворительно». Однако 55 % дискретных значений согласуются с оценками «хорошо», «очень хорошо» и «отлично».

Заключение

Представлен анализ ослабления ЭМП амплитудой 100 В в структурах с двухкратным МР. Разработаны и созданы модели исследуемых структур для компьютерного расчета и экспериментального измерения. Вычисление и измерение проводилось до отказа, после первого отказа и после второго отказа. Двухслойная структура показала ослабление помехи в среднем в 6,5 раза во всех случаях, в то же время однослойные показали ослабление в 3 раза. Далее с помощью FSV-метода была получена оценка сходимости результатов моделирования и эксперимента. Данный метод показал, что сходимость результатов согласуется с оценкой «удовлетворительно» и «хорошо».

Все исследуемые структуры, представленные в данной работе, справляются с подавлением ЭМП. Двухслойная структура справляется лучше с подавлением электромагнитного воздействия, однако уступает двум оставшимся в гибкости. Структура с крайними опорными проводниками справляется хуже с подавлением воздействий по сравнению со структурой с крайними сигнальными проводниками, однако благодаря своему способу трассировки все три сигнальных проводника окружены опорными, и это показывает, что даже после возникновения отказа ослабления ЭМП остается на прежнем уровне.

Список литературы

1. Газизов Т.Р. Электромагнитная совместимость и безопасность радиоэлектронной аппаратуры: учеб. пособие. Томск: ТМЛ-Пресс, 2007. 256 с.
2. Солодов В.С., Калитёнков Н.В. Надежность радиоэлектронного оборудования и средств автоматики: учеб. пособие для вузов. 3-е изд., стер. СПб.: Лань, 2022. 220 с.
3. Шарафутдинов В.Р. Способы резервирования элементов радиотехнических устройств на основе модальной фильтрации: дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2019. 153 с.
4. Чепегин И.В. Надежность технических систем и техногенный риск: учеб. пособие. Казань: Изд-во КНИТУ, 2017. 156 с.
5. Орлов П., Газизов Т., Буичкин Е. Оценка эффективности модальной фильтрации в различных типах резервированных электрических соединений // Международная Сибирская конференция по управлению и связи. 2016. С. 1–3.
6. Шарафутдинов В.Р., Газизов Т.Р. Анализ способов резервирования на основе модальной фильтрации // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 3. С. 117–144. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10307
7. Пат. 2752233 Российская Федерация. Способ прокладки печатных проводников на двухслойных печатных платах снаружи и внутри сигнальных слоев для схем с резервированием / Т.Р. Газизов, А.В. Медведев. 2020122274; заявл. 06.07.20; опубл. 23.07.2021, Бюл. № 21. 8 с.
8. Пат. 2738955 Российская Федерация. Способ трехкратного резервирования межсоединений / В.Р. Шарафутдинов, Т.Р. Газизов, А.В. Медведев; заявитель и патентообладатель Томск. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники. № 2019138502; заявл. 27.11.19; опубл. 21.12.2020, Бюл. № 36. 8 с.
9. Чуб А.В., Абрамова К.Н. Ослабление электромагнитной помехи в структуре с двукратным модальным резервированием до и после отказов // Перспективы развития фундаментальных наук. 2024. С. 175–177.
10. High-Tg Halogen Free No-flow Prepreg TU-84P NF // Taiwan Union Technology Corporation: website. URL: <https://www.tuc.com.tw/en-us/products-detail/id/22> (дата обращения: 14.07.2024).
11. TALGAT Система компьютерного моделирования электромагнитной совместимости // TALGAT: website. URL: <https://talgat.org/talgat-software/> (дата обращения: 14.07.2024).
12. Введение в COMSOL Multiphysics. URL: https://cdn.comsol.com/doc/5.4/IntroductionToCOMSOLMultiphysics.ru_RU.pdf (дата обращения: 02.08.2024).
13. Векторные анализаторы цепей P4M // Контрольно-измерительные приборы: сайт. URL: <https://kipltd.ru/product/vektornye-analizatory-cepej-p4m-r4m-18-2> (дата обращения: 24.07.2024).
14. Bongiorno J., Mariscotti A. Uncertainty and Sensitivity of the Feature Selective Validation (FSV) Method. URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/11/16/2532> (дата обращения: 10.08.2024).
15. Шайманов Н.Ю., Осинцев А.В., Иванов А.А. Об использовании метода FSV в задачах электромагнитной совместимости // Электронные средства и системы управления. 2023. № 1-2. С. 50–52.

References

1. Gazizov T.R. *Elektromagnitnaya sovместimost' i bezopasnost' radioelektronnoy apparatury: ucheb. posobie* [Electromagnetic compatibility and security of radio-electronic equipment. Training manual]. Tomsk: TML-Press; 2007. 256 p. (In Russ.)
2. Solodov V.S., Kalitenkov N.V. *Nadezhnost' radioelektronnogo oborudovaniya i sredstv avtomatiki: ucheb. posobie dlya vuzov* [Reliability of radio-electronic equipment and automation equipment. Training manual for universities]. 3rd ed., ster. St. Petersburg: Lan'; 2022. 220 p. (In Russ.)

3. Sharafutdinov V.R. *Sposoby rezervirovaniya elementov radiotekhnicheskikh ustroystv na osnove modal'noy fil'tratsii: dis. kand. tekhn. nauk* [Methods of redundancy of elements of radio technical devices on the basis of modal filtering. Cand. sci. diss.]. Tomsk, 2019. 153 p. (In Russ.)
4. Chepegin I.V. *Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem i tekhnogennyy risk: ucheb. posobie* [Reliability of technical systems and anthropogenic risk. Training manual]. Kazan: Kazan National Research Technological University; 2017. 156 p. (In Russ.)
5. Orlov P., Gazizov T., Buichkin E. [Evaluation of modal filtering efficiency in different types of redundant electrical connections]. In: *Mezhdunarodnaya Sibirskaya konferentsiya po upravleniyu i svyazi* [International Siberian Conference on Management and Communication]. 2016. P. 1–3. (In Russ.)
6. Sharafutdinov V.R., Gazizov T.R. Analysis of reservation methods based on modal filtration. *Systems of Control, Communication and Security*. 2019;(3):117–144. (In Russ.) DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10307
7. Gazizov T.R., Medvedev A.V. *Sposob prokladki pechatnykh provodnikov na dvukhsloynnykh pechatnykh platakh snaruzhi i vnutri signal'nykh sloev dlya skhem s rezervirovaniem* [Method of routing printed conductors on double-layer printed circuit boards outside and inside the signal layers for redundant circuits]. Patent RF, no. 2752233, 2021. (In Russ.)
8. Sharafudinov V.R., Gazizov T.R., Medvedev A.V. *Sposob trekhkratnogo rezervirovaniya mezhsoedineniy* [Method of triple redundancy of interconnections]. Patent RF, no. 2738955, 2020. (In Russ.)
9. Chub A.V., Abramova K.N. [Electromagnetic interference attenuation in a structure with double modal redundancy before and after failures]. In: *Perspektivy razvitiya fundamental'nykh nauk* [Prospects for the development of the fundamental sciences]. 2024. P. 175–177. (In Russ.)
10. High-Tg Halogen Free No-flow Prepreg TU-84P NF. *Taiwan Union Technology Corporation: website*. Available at: <https://www.tuc.com.tw/en-us/products-detail/id/22> (accessed 14.07.2024).
11. TALGAT Electromagnetic compatibility computer modelling system. *TALGAT: website*. Available at: <https://talgat.org/talgat-software/> (accessed 14.07.2024).
12. *Introduction to COMSOL Multiphysics*. (In Russ.) Available at: https://cdn.comsol.com/doc/5.4/IntroductionToCOMSOLMultiphysics.ru_RU.pdf (accessed 02.08.2024).
13. *Vektornye analizatory tsepey P4M* [P4M Vector Circuit Analysers]. *Kontrol'no-izmeritel'nye pribory: sayt* [Control and measuring devices: website]. (In Russ.) Available at: <https://kipltd.su/product/vektornye-analizatory-cepej-p4m-r4m-18-2> (accessed 24.07.2024).
14. Bongiorno J., Mariscotti A. Uncertainty and Sensitivity of the Feature Selective Validation (FSV) Method. Available at: <https://www.mdpi.com/2079-9292/11/16/2532> (accessed 10.08.2024).
15. Shaymanov N.Yu., Osintsev A.V., Ivanov A.A. [On the use of the FSV method in electromagnetic compatibility problems]. In: *Elektronnyye sredstva i sistemy upravleniya* [Electronic means and control systems]. 2023. No. 1-2, P. 50–52. (In Russ.)

Информация об авторах

Чуб Андрей Викторович, аспирант кафедры сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия; andrei.chub@tusur.ru.

Абрамова Ксения Николаевна, аспирант кафедры сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия; kсениa.n.abramova@tusur.ru.

Иконникова Кристина Дмитриевна, магистрант кафедры радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия; ikartinka@gmail.com.

Жечев Евгений Сергеевич, канд. техн. наук, доц. кафедры сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия; evgenii.zhechev@tusur.ru.

Газизов Тимур Тальгатович, д-р техн. наук, старший научный сотрудник, Сахалинский государственный университет, Южно-Сахалинск, Россия; timurtsk@gmail.com.

Information about the authors

Andrey V. Chub, Postgraduate student of the Department of Microwave and Quantum Radio Engineering, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia; andrei.chub@tusur.ru.

Ksenia N. Abramova, Postgraduate student of the Department of Microwave and Quantum Radio Engineering, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia; ksenia.n.abramova@tusur.ru.

Kristina D. Ikonnikova, Master's student of the Department of Radioelectronic Technologies and Environmental Monitoring, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia; idkartinka@gmail.com.

Yevgeniy S. Zhechev, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Microwave and Quantum Radio Engineering, Senior Researcher of the Research Laboratory of Fundamental Research on Electromagnetic Compatibility, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia; evgenii.zhechev@tusur.ru.

Timur T. Gazizov, Dr. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Sakhalin State University, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia; timurtsk@gmail.com.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 09.01.2025

The article was submitted 09.01.2025