

Секция 12

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

Председатель секции – Газизов Тальгат Рашитович, зав. каф. ТУ, д-р техн. наук

УДК 537.86/87

А. Алхадж Хасан, Е.С. Жечев, Т.Р. Газизов

Оценка излучаемых эмиссий структуры с однократным модальным резервированием

Представлены результаты электродинамического моделирования структуры с однократным модальным резервированием. Проведена оценка излучаемых эмиссий структур с однократным модальным резервированием и без него в частотном диапазоне от 0,5 до 10 ГГц. Получены частотные зависимости напряженности электрического поля и излучаемой мощности. Представлены диаграммы направленности излучения на частотах 0,5; 5 и 10 ГГц. Выявлено, что из-за сильной электромагнитной связи между резервной и резервируемой цепями излучаемые помехи почти во всем диапазоне для структуры с однократным модальным резервированием ниже, чем без него.

Ключевые слова: модальное резервирование, микрополосковая линия, излучаемые помехи, диаграмма направленности.

Для повышения отказоустойчивости и надежности критичной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) используют различные конструктивные решения и схемотехнические подходы [1, 2]. Одним из наиболее распространенных решений является резервирование [3], частным случаем которого является модальное резервирование (МР) [4]. За счет сильной электромагнитной связи между резервной и резервируемой цепями можно добиться разложения сверхкороткого импульса (СКИ) на последовательность импульсов меньшей амплитуды. Так, в случае однократного МР, где присутствует лишь одна резервная цепь, можно разложить СКИ на два импульса [5]. Ранее исследовались частотные и временные характеристики устройств с однократным и трехкратным МР [6], анализировалась эффективность структуры с однократным МР до и после отказов [7]. Однако в известных работах по МР оценка излучаемых эмиссий структуры с однократным МР не проводилась. В работе [8] предложен новый подход к оценке излучаемых эмиссий цепей с МР, в основу которого положен квазистатический анализ. Для дальнейшего сравнения и апробации предложенного подхода необходимо провести высокоточное моделирование известным методом. Цель данной работы – провести такое исследование.

Подходы, методы и конструкции

Для оценки излучаемых эмиссий структуры с однократным МР и без него в данной работе применен электродинамический подход, в основу которого положен метод конечных элементов. Моделирование исследуемых структур проводилось в системе автоматизированного проектирования Keysight Technologies EMPro 2020.

В работе рассмотрены структура одиночного проводника длиной (l) 1 м в неоднородном диэлектрическом заполнении, представляющая собой микрополосковую линию передачи (МЛП), и двухпроводная связанная линия, имитирующая структуру с МР. Поперечные сечения и эквивалентные схемы представлены на рис. 1, 2 соответственно.



Рис. 1. Поперечное сечение структуры с однократным МР (а) и без него (б)

Для обеих структур толщина диэлектрической подложки (h) равна 510 мкм, толщина проводников (t) равна 65 мкм, ширина проводников (w) составляет 300 мкм. Расстояние между проводниками (s) для структуры с однократным МР принято равным 100 мкм. Расстояние от проводника до края диэлектрика (d) составляет 600 мкм для обеих структур. В качестве материала диэлектрика выбрана керамическая подложка с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 10$. Выбранные параметры подобраны с учетом стандартного технологического

процесса при изготовлении печатных плат, соответствующих 5-му классу точности [9].



Рис. 2. Эквивалентная схема структуры с однократным МР (а) и без него (б)

При моделировании исследуемых структур сопротивление всех резисторов равны 50 Ом. Источник гармонической ЭДС 1 В подключался между проводником линии и опорной плоскостью.

При моделировании исследуемый частотный диапазон лежал в пределах от 0,1 до 10 ГГц. Расстояние, на котором рассчитывалась напряженность электрического поля, выбрано равным 1 м. Получены частотные зависимости напряженности электри-

ческого поля и излучаемой мощности от частоты. Для структур с однократным МР и без него на частотах 0,5; 5 и 10 ГГц приведена диаграмма направленности. При построении трехмерной модели исследуемых структур каждый элемент разбивался на ячейки, минимальный размер которых составил 20 мкм. Моделирование проводилось без учета потерь в проводниках и диэлектрике.

Результаты

На рис. 3, 4 для обеих структур представлены результаты расчета максимальных значений модуля напряженности полного электрического поля $|E|$ и излучаемой мощности P_{Σ} соответственно.

Из рис. 3 видно, что при МР значение $|E|$ уменьшилось практически во всем исследуемом частотном диапазоне. Так, наибольшее уменьшение в 4,7 раза наблюдается на частоте 9,3 ГГц.

Из рис. 4 также видно, что использование МР уменьшает излучаемую мощность. Наибольшее уменьшение в 56 раз наблюдается на частоте 6,4 ГГц.

На рис. 5 представлены диаграммы направленности структур с однократным МР и без него на частотах 0,5; 5 и 10 ГГц.

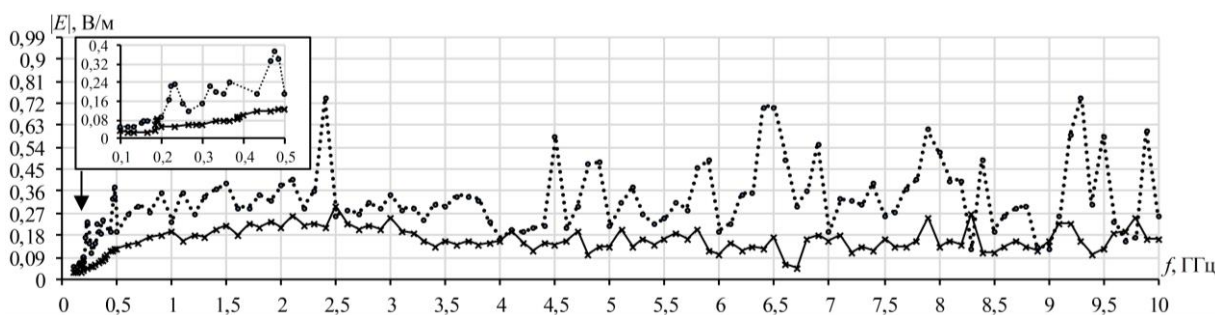


Рис. 3. Частотные зависимости $|E|$ для структур с однократным МР (—) и без него (---)

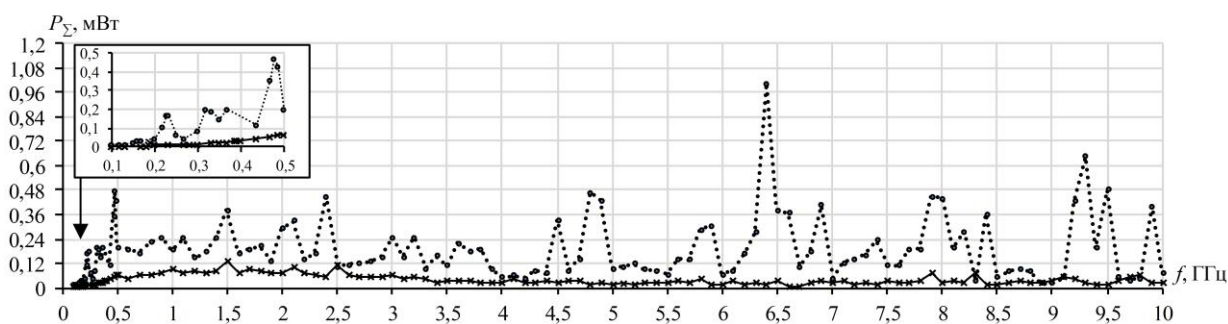


Рис. 4. Частотные зависимости P_{Σ} для структур с однократным МР (—) и без него (---)

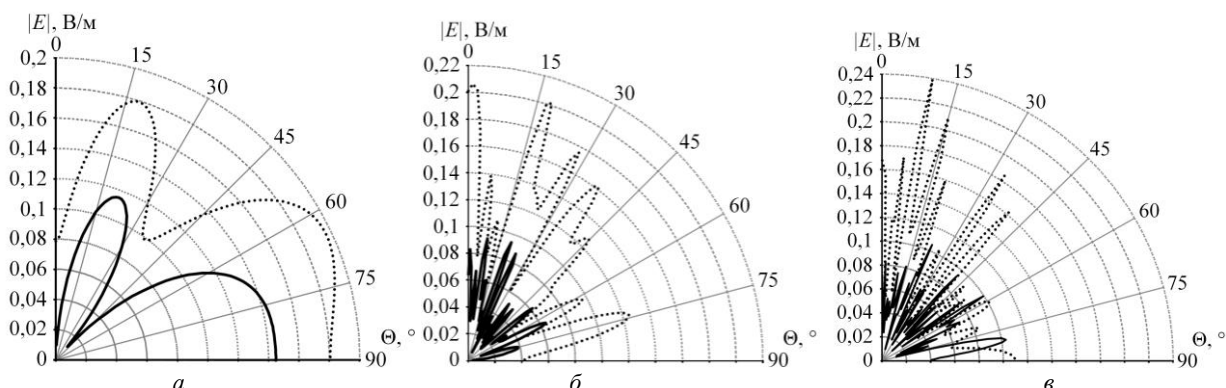


Рис. 5. Диаграммы направленности структур с однократным МР (—) и без него (---) на частотах 0,5 (а), 5 (б) и 10 (в) ГГц

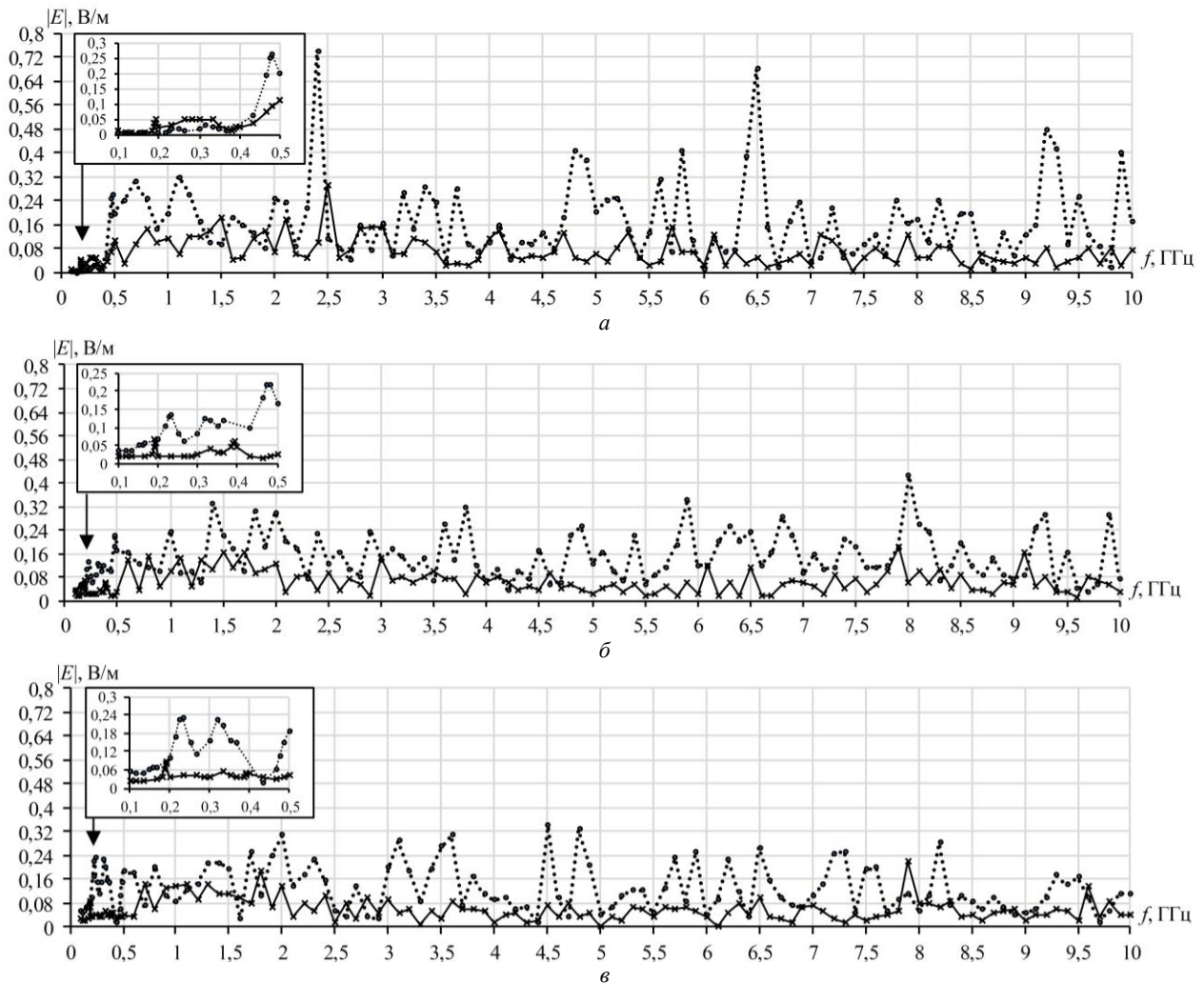


Рис. 6. Частотные зависимости $|E|$ для структур с однократным МР (—) и без него (---) при $\Theta = 0^\circ$ (а); $\Theta = 45^\circ$ (б) и $\Theta = 90^\circ$ (в)

Из результатов, представленных на рис. 5, также видно, что использование МР способствует уменьшению напряженности электрического поля. Причем уменьшение наблюдается при разных значениях Θ . Поэтому на рис. 6 приведены частотные зависимости $|E|$ для обеих структур при $\Theta = 0^\circ$, $\Theta = 45^\circ$ и $\Theta = 90^\circ$. Из результатов видно, что значения $|E|$ для структуры с МР меньше, чем для структуры без него, практически во всем частотном диапазоне. Однако на некоторых частотах наблюдается противоположный результат. Так, к примеру, для 7,9 ГГц значение $|E|$ при $\Theta = 90^\circ$ для структуры с однократным МР в 2 раза выше, чем без него.

Заключение

В данной работе получены частотные зависимости напряженности электрического поля и излучаемой мощности для структуры с однократным МР и без него. Показано, что использование однократного МР уменьшает излучаемые эмиссии резервируемой цепи в частотном диапазоне от 0,1 до 10 ГГц. Это происходит за счет электромагнитной связи между резервируемым и резервирующими проводниками в неоднородной диэлектрической среде. При гармонической помехе её амплитуда на определен-

ных частотах может уменьшаться за счет того, что её четная и нечетная моды оказываются в противофазе. В результате токи, протекающие противофазно в этих проводниках, уменьшаются. Это приводит к уменьшению напряженности электрического поля в дальней зоне на определенных частотах. На этих частотах можно ожидать уменьшения излучаемых эмиссий, и также уменьшения восприимчивости к излучаемым электромагнитным помехам.

Между тем есть частоты или направления, где значения с однократным МР выше, чем значения без него. Этот факт трудно объяснить однозначно. Но в общем случае он связан со сдвигом резонансов и перераспределением поля.

Чтобы получить более полное представление о влиянии МР на излучаемые эмиссии, последующие работы будут посвящены исследованию структур с однократным и многократным МР в различных исполнениях. Будет проведена оценка излучаемых эмиссий такого рода структур до и после отката.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-19-00424) в ТУСУРе.

Литература

1. Бганцева С.М., Ягудина Ю.В. Обеспечение надежности бортовой аппаратуры космического аппарата // Матер. науч.-техн. конф. молодых специалистов «Электронные и электромеханические системы и устройства», Томск, 12–13 апреля 2018 г. – Томск: В-Спектр, 2018. – С. 293–294.
2. Бугай Т.В., Быков В.В., Гильжинский А.М. Рекомендации по проектированию печатных плат для обеспечения защиты космической аппаратуры от возникновения и развития дугового разряда // Матер. науч.-техн. конф. молодых специалистов «Электронные и электромеханические системы и устройства», Томск, 12–13 апреля 2018 г. – Томск: В-Спектр, 2018. – С. 72–73.
3. Patel M.R. Spacecraft power systems. – CRC press, 2004.
4. Газизов Т.Р., Орлов П.Е., Заболоцкий А.М., Буичкин Е.Н. Новый способ трассировки печатных проводников цепей с резервированием // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 3. – С. 129–131.
5. Orlov P., Gazizov T., Buichkin E. Evaluation of efficiency of modal filtration in different types of redundant electrical connections // Proceedings of the IX International Siberian Conference on Control and Communications, Moscow, 12–14 may 2016. – Moscow, 2016. – P. 1–3.
6. Шарафутдинов В.Р., Газизов Т.Р. Анализ способов резервирования на основе модальной фильтрации // Системы управления, связи и безопасности. – 2019. – № 3.
7. Medvedev A.V., Gazizov T.R., Zhechev Y.S. Evaluating modal reservation efficiency before and after failure // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – No. 1488. – P. 012015.
8. Hasan A.A., Kvasnikov A.A., Gazizov T.R. Approach to Estimation of Radiated Emission from Circuits with Modal Reservation, 2020 21st International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM) // Chemal, Russia. – 2020. –P. 169–173. DOI: 10.1109/EDM49804.2020.91534989
9. ГОСТ Р. 53429–2009. Платы печатные. Основные параметры конструкции. – М.: Стандартинформ, 2010.

Алхадж Хасан Аднан

Аспирант каф. ТУ ТУСУРа
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7403-7023>
Эл. почта: alhaj.hasan.adnan@yandex.ru

Жечев Евгений Сергеевич

Аспирант каф. ТУ ТУСУРа
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4469-7033>
Эл. почта: zhechev75@gmail.com

Газизов Тальгат Рашитович

Д-р техн. наук, доцент, зав. каф. ТУ ТУСУРа
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1192-4853>
Эл. почта: talgat@tu.tusur.ru