

ЛИТЕРАТУРА

1. Krasnopolsky B. XAMG: A library for solving linear systems with multiple right-hand side vectors / B. Krasnopolsky, A. Medvedev // SoftwareX. – 2021. – Vol. 14. – P. 100695.
2. A block IDR(s) method for nonsymmetric linear systems with multiple right-hand sides / L. Du, T. Sogabe, B. Yu, Y. Yamamoto, S.-L. Zhang // Journal of computational and applied mathematics. – 2011. – Vol. 235. – P. 4095–4106.
3. Evaluation of quasi-static matrix parameters for multiconductor transmission lines using Gelarkin's method / M.B. Bazdar, A.R. Djordjevic, R.F. Harrington [et al.] // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. – 1994. – Vol. 42, No. 7. – P. 1223–1228.

УДК 004.418

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ТЕСТОВЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ С МОДАЛЬНЫМ РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ

А.В. Гребенюк, А.В. Медведев, аспиранты

*Научный руководитель Т.Р. Газизов, в.н.с. каф. ТУ, д.т.н.
г. Томск, ТУСУР, каф. ТУ, medart20@rambler.ru*

Спроектированы и изготовлены тестовые печатные платы (ПП) с модальным резервированием. Приведены поперечные сечения, эквивалентные схемы, шаблоны и фотографии изготовленных ПП.

Ключевые слова: печатная плата, модальное резервирование.

Важной задачей проектирования и изготовления радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) является обеспечение надежности функционирования. Модальное резервирование (МР) – это подход к компоновке и трассировке резервируемых электрических межсоединений, при котором между резервируемой и резервной цепями образуется сильная электромагнитная связь [1]. Это позволяет осуществить защиту электрических цепей от сверхкороткого импульса (СКИ) за счет модальных искажений. Результатом является уменьшение излучаемых эмиссий от цепей с МР [2]. Для экспериментальной оценки излучаемых эмиссий от цепей с двукратным и трехкратным МР необходимо изготовить макеты ПП. Цель работы – спроектировать и изготовить тестовые ПП с двукратным и трехкратным МР.

Для измерения излучаемых эмиссий цепей с многократным МР необходимо разработать макеты тестовых печатных плат ПП, позволяющие провести это измерение в ТЕМ-камере. Общие ширина и высота ПП должны составлять 98 мм, а рабочее поле – 88 мм. Простейшим макетом для демонстрации модального разложения в цепях с многократным МР, которую можно поместить в ТЕМ-камеру, являет-

сы микрополосковая многопроводная линия передачи (МПЛП). Поперечные сечения макетов ПП цепей с двукратным и трехкратным МР показаны на рис. 1, а их геометрические параметры – в таблице. Минимальная разность погонных задержек мод ($\Delta\tau$) равна 0,7 нс/м. Это значит, что для платы длиной $l = 1$ м получится разложение импульсов длительностью ($\Delta\tau \times l$) примерно 0,7 нс. При разработке макетов необходимо учитывать размеры рабочего поля ПП. Длина отводов от коаксиально-микрополосковых переходов до регулярной части МПЛП составляет 8,2 мм. Следовательно, длина регулярной части МПЛП составляет 52 мм, а общая длительность импульса, которую можно разложить в структуре, должна быть не более 0,04 нс. Для учета возможных отклонений геометрических параметров при изготовлении макетов разработаны 3 варианта ПП с различными s и w .

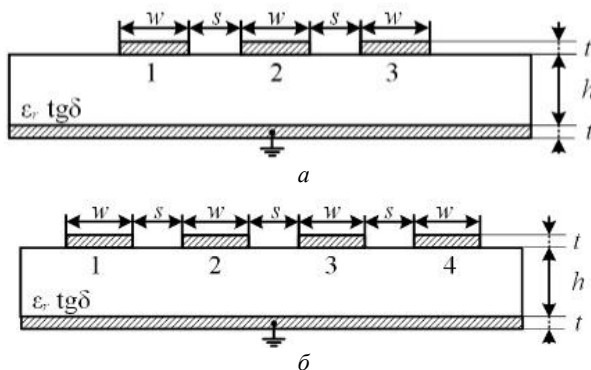


Рис. 1. Поперечные сечения макетов ПП с двукратным (а) и трехкратным (б) МР

Геометрические параметры макетов ПП с двукратным и трехкратным МР с учетом возможных отклонений при изготовлении

Структура	Вариант	w , мкм	s , мкм	h , мкм	t , мкм
Двукратное МР	1	500	300	290	130
	2	530	280		
	3	550	250		
Трехкратное МР	1	500	300	290	130
	2	530	280		
	3	550	250		

На рис. 2, а и б представлены эквивалентные схемы включения структуры с двукратным и трехкратным МР соответственно. На рис. 3 представлены фотошаблоны верхних и нижних слоев спроектированных ПП с двукратным и трехкратным МР в программе Cam350 в соответствии с [3].

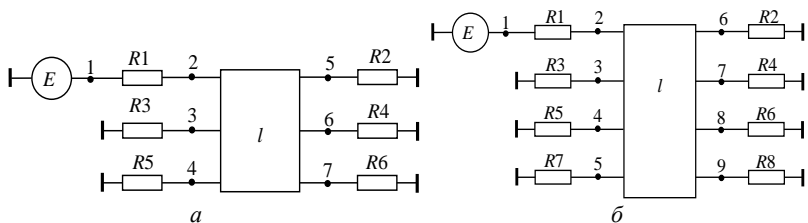


Рис. 2. Эквивалентные схемы включения структуры с двукратным (а) и трехкратным (б) МР

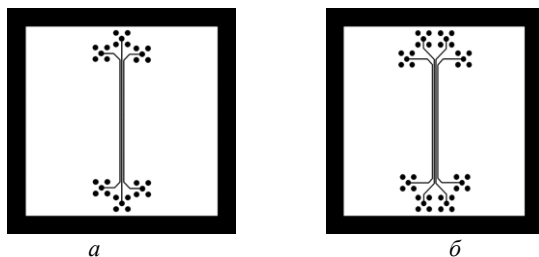


Рис. 3. Фотошаблоны верхних слоев ПП с двукратным (а) и трехкратным (б) МР

Для изготовления печатных плат был выбран фольгированный стеклотекстолит СТФ $2 \times 105 \times 0,5$. Вначале был выбран химический (негативный) метод изготовления печатных плат, но не удалось обеспечить заданную ширину проводника из-за травления фольгированного стеклотекстолита. В дальнейшем метод был изменен на комбинированный позитивный метод [1]. Преимущества комбинированного метода: возможность создания элементов печатного рисунка с высокой точностью, фольга защищает диэлектрическое основание от воздействия технологических растворов. На рис. 4 представлены готовые ПП, прошедшие полный технологический процесс.

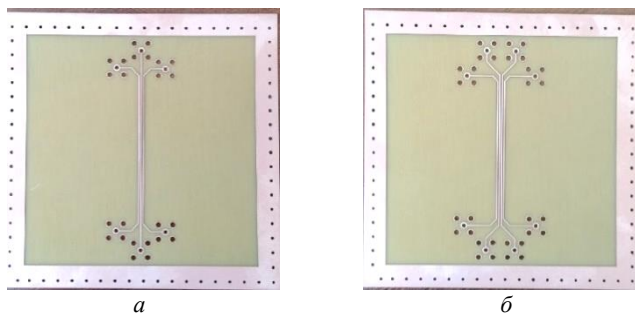


Рис. 4. Фотографии макетов ПП с двукратным (а) и трехкратным (б) МР

Таким образом, спроектированы и изготовлены макеты ПП с двукратным и трехкратным МР.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-19-00446) в ТУСУРе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Analysis of reservation methods based on modal filtration / V.R. Sharafutdinov, T.R. Gazizov // Systems of Control, Communication and Security. – 2019. – P. 117–144.

2. Оценка излучаемых эмиссий структуры с однократным модальным резервированием / А. Алхадж Хасан, Е.С. Жечев, Т.Р. Газизов // Электронные средства и системы управления. – 2020. – С. 250–253.

3. ГОСТ. 23751–79. Печатные платы. Требования и методы конструирования.

УДК 621.391.82

РАЗРАБОТКА ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ С ТРЕХКРАТНЫМ МОДАЛЬНЫМ РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ С ИСПОЛНЕНИЕМ ОПОРНОГО ПРОВОДНИКА В ВИДЕ БОКОВЫХ ПОЛИГОНОВ

А.М. Лакоза, А.В. Медведев, аспиранты

*Научный руководитель А.М. Заболоцкий, проф. каф. ТУ, д.т.н.
г. Томск, ТУСУР, каф. ТУ, alexandrlakoz@gmail.ru*

Разработана печатная плата с трехкратным модальным резервированием с исполнением опорного проводника в виде боковых полигонов. Показано, что для отводов с углами 90 и 60° наблюдается наименьшее влияние отражений от нагрузок по сравнению с отводом в 45°. Для реализации печатной платы с трехкратным модальным резервированием выбрана конфигурации отводов с углом наклона 90°.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, модальное резервирование, печатная плата.

Для создания надежной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) необходимо уделять пристальное внимание функциональной безопасности и электромагнитной совместимости [1]. Модальное резервирование (МР) – это подход к компоновке и трассировке резервируемых электрических межсоединений, при котором между резервируемой и резервной цепями образуется сильная электромагнитная связь [2]. Это позволяет осуществить защиту электрических цепей от сверхкороткого импульса (СКИ) за счет модальных искажений. Выделяют однократное и многократное МР (двукратное и трехкратное). Исследова-