

УДК 621.391.814

А.В. Медведев

Моделирование и экспериментальное исследование четырехпроводной полосковой структуры с трехкратным модальным резервированием при отказах её элементов

Отмечена актуальность исследований по рациональному использованию избыточности резервирования, применяя способы трехкратного модального резервирования (МР), для повышения устойчивости к сверхширокополосным помехам. Выполнена экспериментальная оценка временных и частотных характеристик после отказов части элементов в двусторонней печатной плате (ПП) с трехкратным МР. Для этого изготовлен прототип двусторонней ПП с трехкратным МР с оптимальными параметрами. В качестве нагрузок использовались SMD-резисторы. На дальнем конце резервируемого проводника ПП показано разложение на 4 импульса при различной длительности входного воздействия. Максимальные изменения напряжения до и после отказов при длительности входных сигналов 120 и 240 пс составляют 26,8 и 28% соответственно. Сравнение результатов эксперимента и электродинамического моделирования во временной и частотной областях показало их согласованность. Максимальные отклонения напряжения и задержек равны 3,69 и 5,6% соответственно.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, функциональная безопасность, резервирование, модальное резервирование, печатная плата, отказ.

DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-1-48-55

Давно известно о проблемах функциональной безопасности (ФБ) радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) в сложной электромагнитной обстановке [1–3]. Кондуктивные или излучаемые электромагнитные помехи имеют систематический характер, т.е. могут периодически повторяться [4]. Например, в системах с резервированием при отказе резервируемой печатной платы (ПП) от электромагнитных помех произойдет отказ резервной ПП, если помеха повторится [5]. Опасным видом кондуктивных помех являются сверхширокополосные (СШП) помехи [6]. Эффективным инструментом в борьбе с СШП-помехами является технология на основе эффекта модальной фильтрации (МФ) [7] и устройств на ее основе.

Модальное резервирование (МР) – это подход к компоновке и трассировке резервируемых и резервных проводников ПП и кабелей в РЭА, при котором добиваются эффекта МФ [8–10]. Он достигается за счет сильной связи между резервируемым и резервными проводниками РЭА в неоднородной диэлектрической среде. Разработаны и активно исследуются однократное, двукратное и трехкратное МР [11]. В структурах с трехкратным МР на дальнем конце резервируемого проводника будет наблюдаться разложение на 4 импульса меньшей амплитуды, если произведение длины l структуры и минимальной разности погонных задержек мод $|\Delta\tau_{\min}|$ больше длительности СШП-импульса на входе.

Разработан способ компоновки и трассировки проводников с трехкратным МР цепей на двусторонней ПП [12]. Преимущество в реализации МФ данного способа перед многослойной ПП с трехкратным МР [13] в том, что возможно добиться большей неоднородности диэлектрической среды, за счет которой возможен эффект МФ. Например, если использовать Rogers 3010 (с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 10,2$) в качестве подложки для дву-

сторонней ПП, то скорость самой медленной моды будет определяться им, а самой быстрой – воздухом ($\epsilon_r = 1$), тогда как в многослойной – препрегом ($\epsilon_r = 4,2$). Чем больше это соотношение, тем больше значения $|\Delta\tau_{\min}|$ можно добиться в структуре, и тем большей длительности СШП-импульс разложится в структуре полностью.

Теоретические исследования структур с МР [14], показали, что случаи отказов компонентов на концах проводников резервируемой цепи удобно моделировать изменением граничных условий на концах пассивных проводников: коротким замыканием (КЗ) либо обрывом/холостым ходом (ХХ). В симметричной структуре с трехкратным МР возможны 62 различных комбинации из согласующей нагрузки (R), 1 мОм (КЗ) и 1 МОм (ХХ). Структура обладает фазовой, частотной и временной взаимностью (например, в этих структурах $S_{12} = S_{21}$) [14], а также считается, что отказ происходит только на одном из концов резервируемого проводника.

На рис. 1 представлена принципиальная схема структуры с трехкратным МР до и после отказов. Устройство переключения (УП) на основе переключателей Т-типа [15] после отказа переключает источник сигнала на резервный проводник. Отказы компонента с нагрузкой R могут быть в виде обрыва (ХХ) или короткого замыкания на землю (КЗ). Например, до отказов работает проводник 1, а проводники 2–4 резервные (см. рис. 1, а). После отказа на одном из концов активного проводника можно переключиться на один из резервных. Так, после отказа на конце проводника 1, УП переключает источник на проводник 2 (см. рис. 1, б), а проводники 3 и 4 остаются резервными. После отказа 2 на ближнем конце проводника 2, УП переключает источник на проводник 3 (см. рис. 1, в). После отказа 3 остается только один вариант переключения (см. рис. 1, б).

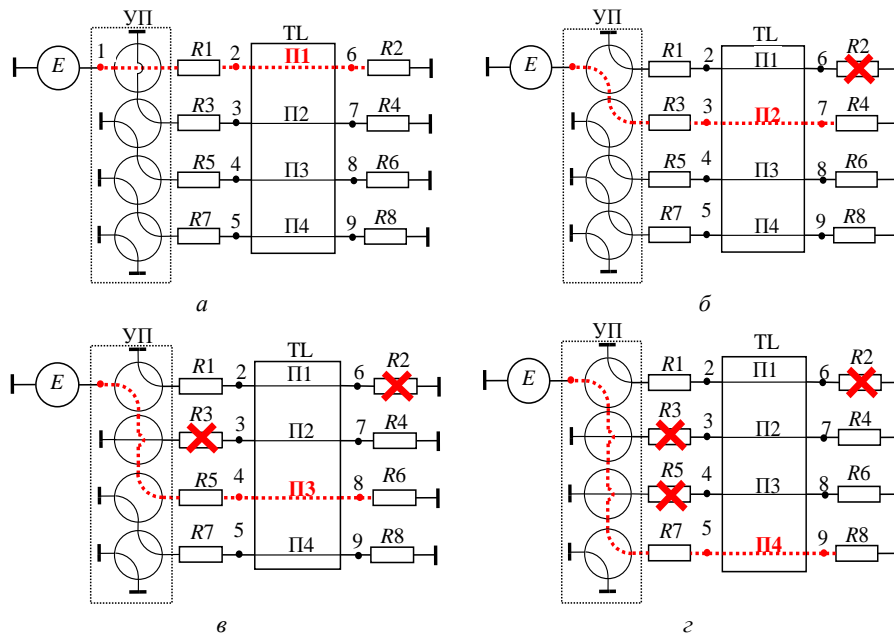


Рис. 1. Принципиальная схема структуры с трехкратным МР до (а) и после отказов 1 (б), 2 (в) и 3 (г)

Переключение выходного конца резервируемой линии на рисунке не показано, так как на исследование этот факт не влияет.

Экспериментальное исследование многослойной структуры с трехкратным МР [16] показало, что после отказов максимальная амплитуда ($U_{\text{макс}}$) импульсов разложения может изменяться, так как изменится коэффициент отражения при изменении нагрузок на концах пассивных проводников. Так, в прототипе, состоящем из структуры с трехкратным МР и одинаковых отрезков однопроводных линий передачи (ЛП) от структуры до SMA соединителей, помеха, наведенная на резервные проводники, снова наведется на резервируемый проводник через промежуток времени, равный двойной задержке в этих ЛП. На дальнем конце резервируемого проводника произойдет частичное наложение основных 4 импульсов разложения и отраженных импульсов друг на друга. Максимальное напряжение ($U_{\text{макс}}$) импульсов разложения будет изменяться по-разному при различных комбинациях граничных условий на ближнем и дальнем концах пассивных проводников. В работе [12] для случаев после отказов максимальное увеличение $U_{\text{макс}}$ составило 8% относительно случая до отказов. Показано, что изменения $U_{\text{макс}}$ импульсов разложения зависят от длительности СШП-импульса и длины ЛП от структуры с МР до SMA соединителей.

Моделирование показало [15], что если учитывать только структуру с трехкратным МР (т.е. длина ЛП до SMA соединителей близка к 0), то увеличение $U_{\text{макс}}$ после отказов будет максимальным, так как не будет задержек между отраженными и основными импульсами. Однако экспериментальная оценка максимального изменения $U_{\text{макс}}$ в таких структурах не проводилась. Это максимальное изменение $U_{\text{макс}}$ важно учитывать при разработке реальной РЭА с трехкратным МР, так как при увеличении $U_{\text{макс}}$ по-

сле отказов уменьшается помехозащищенность РЭА с МР. Также целесообразно выполнить эту оценку для МР на двусторонней ППП, где на меньшей длине структуры с МР возможно добиться большей разности задержек, чем в многослойной ППП [15], так как в структуре с меньшей длиной влияние потерь в проводниках и диэлектриках будет минимальным.

Цель данной работы – моделирование и экспериментальное исследование четырехпроводной полосковой структуры с трехкратным модальным резервированием при отказах её элементов.

Для этого нужно решить следующие задачи:

- выполнить оптимизацию параметров прототипа двусторонней ППП с трехкратным МР;
- разработать конструкцию прототипа;
- выполнить экспериментальные исследования прототипа во временной и частотной областях;
- сравнить результаты экспериментального исследования и электродинамического моделирования.

Методы и подходы

Для получения корректных результатов экспериментальных исследований, которые соответствуют поставленной цели, требуется провести тщательное компьютерное моделирование. В работе [17] рассматривается расчет многопроводных полосковых структур и устройств на ее основе. Возможно применение квазистатического и электродинамического моделирования в различных системах, например, TALGAT и ADS соответственно. Их совместное использование позволит определить качество проведенных экспериментальных исследований. Квазистатический подход реализован в виде быстрых и точных математических моделей в системе TALGAT [19]. В системе можно анализировать регулярные ЛП с произвольным поперечным сечением. В данной работе система TALGAT используется для оптимизации параметров поперечного сечения. Моделирование проводилось без учета потерь в провод-

никах и диэлектриках. Для подтверждения результатов измерений выполнено электродинамическое моделирование в системе ADS. Для этого использован метод моментов, которым решались уравнения Максвелла без каких-либо упрощений. В результате получены комплексные и частотно-зависимые матрицы погонных параметров. Применение используемых подходов моделирования описано в работе по однократному МР [16], поэтому их подробное описание здесь не приводится.

Экспериментальное исследование характеристик структур с МР выполнено с использованием методики из [18]. Измерения проводились с помощью векторного анализатора цепей (ВАЦ) «Панорама» P4226 (Микран). Перед проведением измерений сделана двухпортовая SOLT-калибровка для устранения систематической погрешности, влияния кабелей и коаксиальных переходов. Измерения S -параметров проводились в частотном диапазоне от 10 МГц до 18 ГГц с шагом 10 МГц. Такой диапазон обусловлен характеристиками используемых коаксиально-микрорословковых переходов. Схемы измерений частотных характеристик и анализа временных представлений на рис. 2. Резервируемый проводник исследуемого устройства (ИУ) подключался к ВАЦ с помощью высокочастотных кабелей. При этом ко всем резервным проводникам подключались нагрузки (SMD-резисторы), соответствующие исследуемым вариантам отказов. Все значения матрицы рассеяния для резервируемой цепи получены для 50 Ом. Для анализа временных характеристик использована система ADS. Измеренные S -параметры в формате S2P импортировались в ADS, а затем с их помощью анализировался отклик на СШП-импульс (на резисторе R_l).

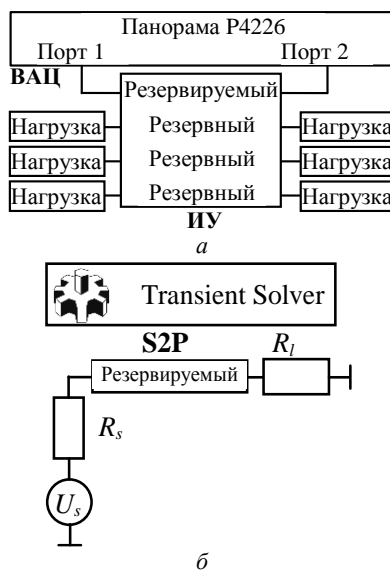


Рис. 2. Схемы измерений частотных (а) и анализа временных характеристик в системе ADS (б)

Оптимизация параметров

На рис. 3 представлено поперечное сечение структуры ПП с трехкратным МР с исполнением опорного проводника в виде боковых полигонов.

В качестве материала подложки использовался FSD1020T (аналог Rogers 3010) с параметрами: $\delta = 0,003$, $\epsilon_r = 10,2 \pm 0,05$. Толщина диэлектрической подложки $h = 254$ мкм, толщина фольги $t = 35$ мкм. В табл. 1 сведены остальные исходные параметры поперечного сечения структуры.

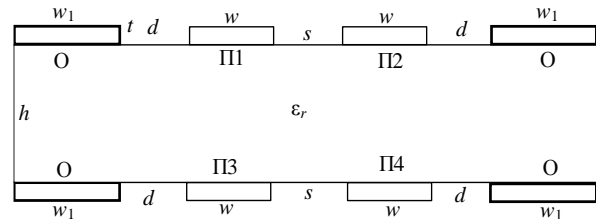


Рис. 3. Поперечное сечение структуры ПП с исполнением опорного проводника в виде боковых полигонов

На вход структуры подавалось импульсное воздействие общей длительностью 90 пс и амплитудой ЭДС 2 В. Нагрузки на концах структуры приняты равными 50 Ом (до отказов). А исходные параметры подбирались так, чтобы напряжение на входе структуры было равно половине ЭДС. На рис. 4, а представлены формы сигналов на ближнем и дальнем концах структуры длиной $l = 0,3$ м с исходным набором параметров. На ближнем конце наблюдается импульс с амплитудой напряжения 1 В, равной половине ЭДС, поэтому структура считается согласованной с трактом 50 Ом. На дальнем конце наблюдается разложение на 4 импульса с $U_{\max} = 0,25$ В, соответствующим напряжению импульса U_2 .

Оптимизация параметров структуры проводилась эвристическим поиском в системе TALGAT по двум критериям: максимизации минимальной разности погонных задержек ($\Delta\tau$) и согласованию с трактом 50 Ом.

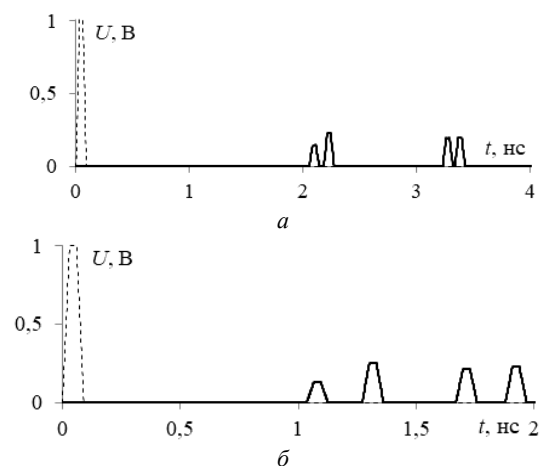


Рис. 4. Формы сигналов на ближнем (—) и дальнем (---) концах структуры с исходным (а) и оптимальным (б) наборами параметров

При изменении параметров поперечного сечения структуры до отказов, если сохранять согласование структуры с нагрузками, U_{\max} практически не изменяется и примерно равно 0,25 В. Однако после отказов, если рассматривать самый худший случай

из 62 комбинаций граничных условий, при котором U_{max} максимально и соответствует напряжению импульса U_2 . после отказов, U_{max} будет изменяться.

Если увеличивать параметр s , то $\Delta\tau_{min}$ будет уменьшаться, также будет уменьшаться U_2 после отказов. Таким образом, значение s должно быть минимально возможным. При увеличении d до 700 мкм $\Delta\tau_{min}=943$ пс и при дальнейшем увеличении d не меняется. При увеличении w до 420 мкм $\Delta\tau_{min}$ перестает увеличиваться. Поэтому, контролируя параметры d от 700 до 1000 мкм, а w от 300 до 500 мкм, подбиралось такое значение напряжения на ближнем конце, чтобы $U = 1$ В (половина ЭДС). В табл. 1 сведены оптимальные параметры структуры.

Таблица 1

Исходные и оптимальные параметры поперечного сечения структуры с трехкратным МР

Набор параметров	l , м	w , мкм	s , мкм	d , мкм	w_1 , мкм
Исходный	0,3	200	200	200	2000
Оптимальный	0,2	390	175	800	

На рис. 4, б представлены формы напряжения на ближнем и дальнем концах структуры с оптимальными параметрами структуры длиной $l = 0,2$ м. Видно, что структура согласована (напряжение на входе равно половине ЭДС), а на дальнем конце $U_{max} = 0,25$ В. В структурах с исходным и оптимальным наборами параметров значение $l\Delta\tau_{min}$ равно 110 и 202 пс соответственно, что позволяет разложить СКИ почти в 2 раза большей длительности.

На рис. 5 приведены зависимости U_{max} от номера отказа при вариантах переключения 1, 2 и 3 (которые соответствуют переключению с П1, либо на П2, либо на П3, либо на П4). Для исходного и оптимального наборов параметров структуры, после отказа 3 наибольшие значения U_{max} равны 0,39 и 0,456 В, соответственно (в обоих случаях наблюдаются у варианта R-XX, K3-R, R-K3). Для исходного и оптимального наборов параметров структуры отличия U_{max} до и после отказов достигают 27 и 29% соответственно.

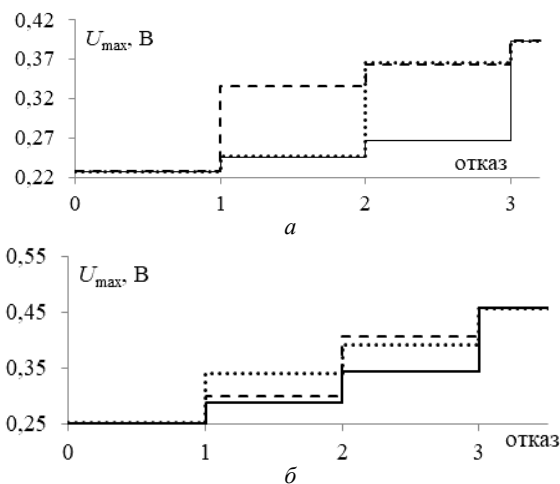


Рис. 5. Зависимости U_{max} от номера отказа при вариантах переключения 1 (· · ·), 2 (---) и 3 (—) для структуры с исходным (а) и оптимальным (б) наборами параметров

Конструкция прототипа

Здесь представлен прототип ПП с трехкратным МР с исполнением опорного проводника в виде боковых полигонов. Материал подложки и оптимальные параметры поперечного сечения выбраны выше. Часть фотошаблонов и изготовленный прототип ПП представлены на рис. 6 и 7 (вид сверху и снизу). При создании макета важно учитывать длину отводов ЛП до SMA-соединителей и компонентов, так как отводы могут существенно изменять характеристики ПП с МР. Поэтому в данном прототипе минимизированы отводы на пассивных проводниках за счет установки SMD резисторов типоразмера 1206 различных номиналов. Согласующая нагрузка имитируется короткозамкнутой перемычкой, а XX – отсутствием соединения с землей (обрывом). Для подключения к активному проводнику на ближнем и дальнем концах установлены SMA-соединители марки 82_SMA-50-0-1/111_NE (HUBER+SUHNER).

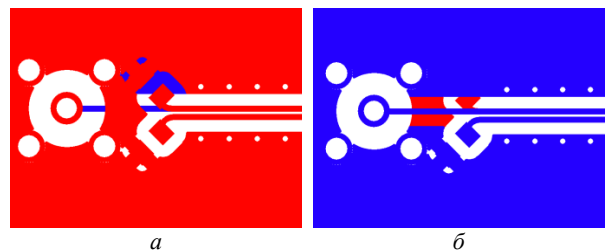


Рис. 6. Фрагменты фотошаблонов ПП для прототипа: виды сверху (а) и снизу (б)

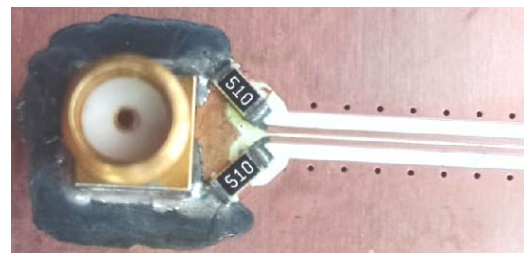


Рис. 7. Фрагмент изготовленного прототипа

Экспериментальное исследование

Далее выполняется экспериментальное исследование изготовленного прототипа в частотной и временной областях. На рис. 8 представлена частотная зависимость $|S_{21}|$ до 18 ГГц структуры с МР до отказов.

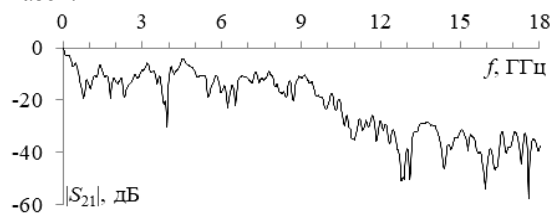


Рис. 8. Частотная зависимость $|S_{21}|$ до 18 ГГц с МР до отказов (соответствует варианту 1)

На рис. 9 представлены частотные зависимости $|S_{21}|$ для вариантов до и после отказов, которые определены при моделировании. Варианты 1, 2, 5 и

8 соответствуют порядку переключения 1, варианты 1, 3, 6 и 8 – порядку 2, варианты 1, 4, 7 и 8 – порядку 3. В табл. 2 сведены частота первого резонанса (f_0) и соответствующий уровень $|S_{21}|$ для вариантов граничных условий (частоте f_0 соответствует первый минимум $|S_{21}|$ из-за взаимной компенсации сигналов четной и нечетной мод, пришедших к концу линии в противофазе).

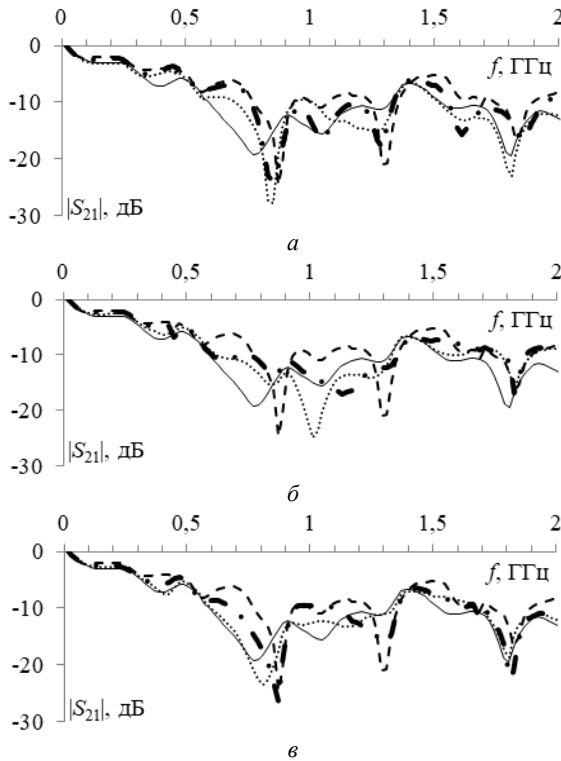


Рис. 9. Частотные зависимости $|S_{21}|$ для вариантов:
 а – 1 (—), 2 (---), 5 (-.-), 8 (-.-);
 б – 1 (—), 3 (---), 6 (-.-), 8 (-.-);
 в – 1 (—), 4 (---), 7 (-.-), 8 (-.-)

Таблица 2

Варианты граничных условий до и после отказов и значения характеристик в частотной области

№ варианта	Граничные условия	f_0 , ГГц	$ S_{21} $, дБ
1	50-50, 50-50, 50-50	0,76	-19,11
2	50-XX, 50-50, 50-50	0,84	-27,85
3	50-50, 50-K3, 50-50	1,0095	-24,811
4	50-50, 50-50, 50-K3	0,8096	-23,49
5	50-XX, K3-50, 50-50	0,849	-24,48
6	50-50, 50-K3, K3-50	1,12	-17,14
7	50-XX, 50-50, 50-K3	0,869	-26,377
8	50-XX, K3-50, 50-K3	0,869	-24,48

Видно, что максимальное значение $f_0 = 1,12$ ГГц наблюдается при варианте 6, тогда как минимальное 0,76 ГГц – при варианте 1. Разница между ними составляет 19,14%. Максимальное ослабление 27,85 дБ наблюдается при варианте 2, тогда как минимальное 17,14 дБ – при варианте 6.

На рис. 10 представлены формы напряжения на ближнем и дальнем концах структуры с трехкратным МР до отказов. На вход структуры отдельно подавались трапециевидные импульсы общей длительностью 120 и 240 пс с амплитудой ЭДС 2 В. На

ближнем конце амплитуды равны 1 и 0,95 В соответственно. Различия объясняются неоднородностью на ближнем конце активного проводника прототипа, из-за чего отражения приходят с задержкой, равной двойной задержке в ЛП от SMA соединителя до структуры с МР. На дальнем конце в обоих случаях наблюдается разложение с U_{\max} 0,17 и 0,22 В соответственно. Различия U_{\max} на выходе объясняются различием входных импульсов с различными длительностями. Таким образом, значение U_{\max} на дальнем конце структуры до отказов меньше, чем на ближнем, в 5,88 и 4,3 раза соответственно.

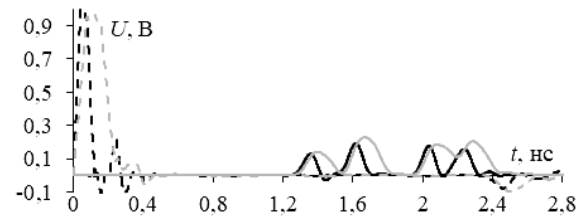


Рис. 10. Формы напряжения на ближнем (---) и дальнем (—) концах структуры с трехкратным МР до отказов

На рис. 10 и 11 представлены формы напряжения на дальнем конце структуры после отказов при длительностях входных импульсов 120 и 240 пс соответственно, для вариантов, соответствующих порядкам переключения 1, 2 и 3.

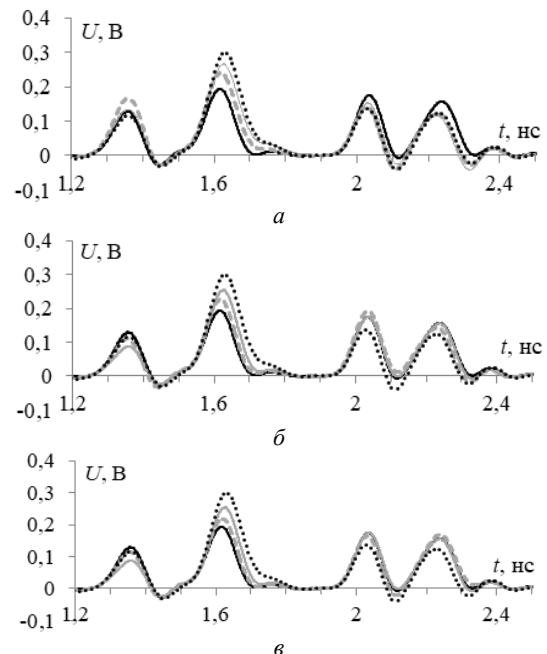


Рис. 11. Формы выходного напряжения при входном импульсе длительностью 120 пс для вариантов:

а – 1 (—), 2 (---), 5 (—), 8 (---);
 б – 1 (—), 3 (---), 6 (—), 8 (---);
 в – 1 (—), 4 (---), 7 (—), 8 (---)

В обоих случаях видно, что формы напряжения до и после отказов различаются, и различия между минимальным значением амплитуды, соответствующим состоянию до отказов, и максимальным, соответствующим состоянию 50-XX, K3-50, 50-K3, составляют 26,8 и 28%.

Значения U_{\max} из рис. 11 и 12 приведены в табл. 3. Видно, что максимальное значение напряжения наблюдается для варианта 8, а минимальное – для 1 (до отказов). Это различие объясняется уникальной комбинацией импульсов, отраженных от нагрузок резервных проводников и наведённых на активный проводник.

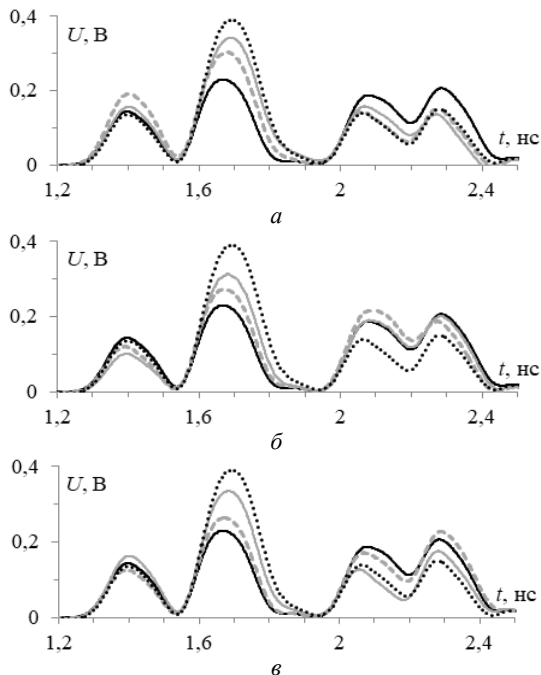


Рис. 12. Формы выходного напряжения при входном импульсе длительностью 2400 пс для вариантов: а – 1 (—), 2 (---), 5 (-), 8 (...); б – 1 (—), 3 (---); 6 (-), 8 (...); в – 1 (—), 4 (---); 7 (-); 8 (...)

Таблица 3
Максимальные значения амплитуды (В) из рис. 10 и 11

$t, \text{ пс}$	1	2	3	4	5	6	7	8
120	0,17	0,23	0,21	0,22	0,24	0,24	0,25	0,3
240	0,22	0,3	0,27	0,26	0,34	0,31	0,33	0,4

После отказов наблюдается плавное увеличение U_{\max} для вариантов переключения 1, 2 и 3. Это иллюстрируют зависимости, представленные на рис. 13.

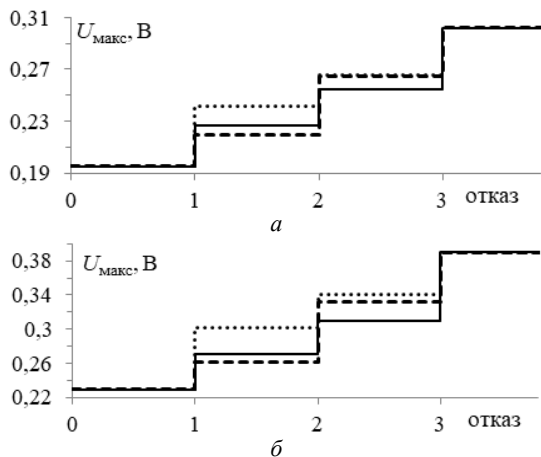


Рис. 13. Зависимости U_{\max} от номера отказа для вариантов переключения 1 (...), 2 (—) и 3(---) при длительностях входного сигнала 120 пс – а; 240 пс – б

Как видно, для порядка переключения 2 после отказа 1 U_{\max} больше, чем для порядка переключения 1, примерно на 2%, а после отказа 2 U_{\max} меньше, чем для порядков переключения 1 и 3, примерно на 3%.

Таким образом, максимальные изменения U_{\max} на дальнем конце резервируемого проводника двусторонней ПП с трехкратным МР до и после отказов при длительности входных сигналов 120 и 240 пс составляют 26,8 и 28% соответственно. Это подтверждает проведенное выше моделирование.

Сравнения эксперимента и моделирования

Выполнено сравнение результатов экспериментального исследования и электродинамического моделирования изготовленного прототипа в частотной и временной областях. Во временной области сравнение выполнено при входном импульсе длительностью 240 пс.

На рис. 14 представлены частотные зависимости $|S_{21}|$ в диапазоне частот от 10 МГц до 2 ГГц для структуры с МР до и после отказов (для случая 50-XX, КЗ-50, 50-XX) при эксперименте и моделировании. Отличия f_0 при моделировании и эксперименте для случаев 50-50, 50-50, 50-50 и 50-XX, КЗ-50, 50-XX составили 8,52 и 1,14% соответственно, а ослабления – 20,18 и 21,64%.

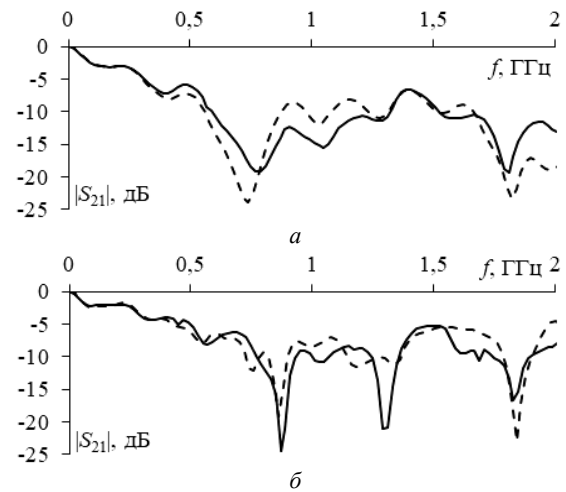


Рис. 14. Частотные зависимости $|S_{21}|$ до 2 ГГц для структуры с МР до (а) и после отказов для варианта 50-XX, КЗ-50, 50-XX (б) при эксперименте (—) и электродинамическом моделировании (- - -)

На рис. 15 представлены формы напряжения на дальнем конце этой структуры для тех же вариантов до и после отказов при эксперименте и моделировании. Из рис. 15, а и б видно 4 импульса разложения, для рис. 15, а – U_{\max} 229 и 234 мВ, а для рис. 14, б – 391 и 406 мВ соответственно. Таким образом, различия U_{\max} для эксперимента и электродинамического моделирования составили 2,13 и 3,69% соответственно. Задержки импульса 1 для рис. 14, а и б при эксперименте и моделировании отличаются и равны по 1,25 и 1,18 нс (отличие 5,6%) соответственно. Задержки импульса 3 для эксперимента и электродинамики равны 1,9 нс.

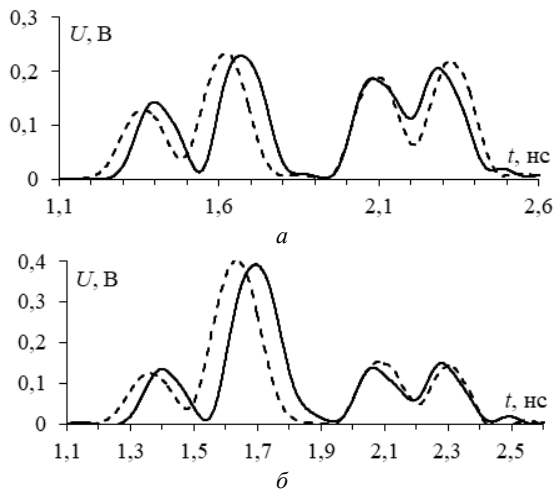


Рис. 15. Формы напряжения на дальнем конце структуры до (а) и после отказов для случая 50-XX, КЗ-50, 50-XX (б) при эксперименте (—) и электродинамическом (---) моделировании

Заключение

Таким образом, выполнена экспериментальная оценка изменения U_{\max} импульсов разложения в двусторонней ПП с трехкратным МР после отказов. Изготовлен прототип двусторонней ПП с трехкратным МР с оптимальными параметрами. В качестве нагрузок использовались SMD-резисторы. На дальнем конце резервируемого проводника ПП наблюдается разложение на 4 импульса при различной длительности входного воздействия. Максимальное изменение U_{\max} на дальнем конце резервируемого проводника двусторонней ПП с трехкратным МР до и после отказов при длительностях входных сигналов 120 и 240 пс составляет 26,8 и 28% соответственно.

Приведенное сравнение эксперимента и электродинамического моделирования во временной и частотной областях показало хорошую согласованность результатов. Максимальные отличия U_{\max} и задержек равны 3,69 и 5,6% соответственно.

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

Литература

1. IEC 61508. Functional Safety of Electrical / Electronic/Programmable Electronic Safety-Related Systems [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://webstore.iec.ch/publication/5515>, свободный (дата обращения: 03.04.2023).
2. Meany T. Functional safety and industrie 4.0 // 28th Irish Signals and Systems Conference (ISSC). – 2017. – PP. 1–7.
3. Patel M.R. Spacecraft power systems. – Boca Raton: CRC Press, 2005. – 691 p.
4. Три возможных механизма возникновения отказов электронных устройств в результате электромагнитного воздействия / Л.Н. Здухов, Ю.В. Парфёнов, О.А. Тарасов, В.М. Чепелев // Технологии ЭМС. – 2018. – № 2(65). – С. 22–34.
5. Techniques and measures to achieve EMI resilience in mission- or safety-critical systems / D. Pissort, J. Lannoo,

J. Van Waes, A. Degraeve, J. Boydens // IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine. – 2017. – Vol. 6, No. 4. – PP. 107–114.

6. Study and classification of potential IEMI sources / N. Mora, F. Vega, G. Lugrin, F. Rachidi, M. Rubinstein // System Design and Assessment Notes. – 2014. – PP. 1–43.

7. Gazizov A.T. Measurement and simulation of time response of printed modal filters with broad-side coupling / A.T. Gazizov, A.M. Zabolotskii, T.R. Gazizov // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2018. – Vol. 63, No. 3. – PP. 270–276.

8. New concept of critical infrastructure strengthening / T.R. Gazizov, P.E. Orlov, A.M. Zabolotsky, S.P. Kuksenko // International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics. – Greece, Rhodes, 2016. – PP. 1–3.

9. Пат. 2 603 850 РФ, МПК Н 04 В 15/02. Способ трассировки печатных проводников цепей с резервированием / Т.Р. Газизов, П.Е. Орлов, В.Р. Шарафутдинов и др. – № 2 015 129 253 / 07; заявл. 16.07.15; опубл. 10.12.16. – Бюл. № 34. – 7 с.

10. Пат. 2 603 851 РФ, МПК Н 04 В 15/00. Способ трассировки печатных проводников с дополнительным диэлектриком для цепей с резервированием / Т.Р. Газизов, П.Е. Орлов, В.Р. Шарафутдинов и др. – № 2 015 129 263/07; заявл. 16.07.15; опубл. 10.12.16. – Бюл. № 34. – 8 с.

11. Шарафутдинов В.Р. Анализ способов резервирования на основе модальной фильтрации / В.Р. Шарафутдинов, Т.Р. Газизов // Системы управления, связи и безопасности. – 2019. – № 3. – С. 117–144.

12. Пат. 2738955 РФ, МПК Н04В 15/02. Способ трехкратного резервирования межсоединений / В.Р. Шарафутдинов (РФ), Т.Р. Газизов (РФ), А.В. Медведев (РФ). – № 2019138502; Заявл. 09.12.2019; опубл. 21.12.2020. – Бюл. № 36. – 4 с.

13. Пат. 2663230 РФ, Н04В 15/02. Способ трехкратного резервирования цепей в многослойных печатных платах / Т.Р. Газизов (РФ), П.Е. Орлов (РФ), В.Р. Шарафутдинов (РФ). – № 2017113045; Заявл. 14.04.2017; опубл. 02.08.2018. – Бюл. № 22. – 8 с.

14. Switching order after failures in symmetric protective electrical circuits with triple modal reservation / A.O. Belousov, A.V. Medvedev, E.B. Chernikova, T.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky // Symmetry. – 2021. – Vol. 13, No. 6. – PP. 1–22.

15. Monolithic MEMS T-type Switch for Redundancy Switch Matrix Applications / K.Y. Chan, M. Daneshmand, A.A. Fomani, R.R. Mansour, R. Ramer // Microwave Conference, EuMC 2008. 38th European. – 2008. – PP. 1513 – 1516.

16. Medvedev A.V. Experimental Study of a Structure with Triple Modal Reservation Before and After Failures / A.V. Medvedev, Y.S. Zhechev, T.R. Gazizov // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2022. – Vol. 65, No. 1. – PP. 1–4.

17. Малютин Н.Д. и др. Регулярные и нерегулярные многосвязанные полосковые структуры и устройства на их основе: расчет первичных параметров, импульсные измерения характеристик. – Томск: ТУСУР, 2012. – 218 с.

18. Kosteletskii V.P. Method for experimental study of circuits with triple modal reservation in time and frequency domains / V.P. Kosteletskii, A.V. Medvedev, Y.S. Zhechev // 2022 International ural conference on electrical power engineering (UralCon). – Magnitogorsk, Russian, 23–25 September 2022. – PP. 80–85.

19. Kuksenko S.P. Preliminary results of TUSUR University project for design of spacecraft power distribution network: EMC simulation // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – No. 012110. – PP. 1–7.

Медведев Артём Викторович

Аспирант каф. телевидения и управления (ТУ)

Томского государственного ун-та

систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050

ORCID: 0000-0003-4718-1024

Тел.: +7-909-538-72-38

Эл. почта: medart20@rambler.ru

Medvedev A.V.

Experimental evaluation of decomposition pulse voltage in a double-sided PCB with triple modal reservation after failures

The relevance of research on the rational use of redundancy by applying triple modal redundancy (MR) techniques to increase the resistance to ultra-wideband interference is highlighted. An experimental evaluation of the change in maximum voltage of decomposed pulses in a bilateral printed circuit board (PCB) with triple MR after failures has been performed. A special prototype of a double-sided PCB with triple MR with optimum parameters has been fabricated. SMD resistors were used as loads. At the far end of the redundant conductor of the PCB, a decomposition into 4 pulses at different input durations is shown. The maximum voltage changes before and after failures at input durations of 120 ps and 240 ps are 26.8% and 28%, respectively. The above comparison of the experimental and electrodynamic simulation results in the time and frequency domains showed their consistency. The maximum voltage and delay differences are 3.69 and 5.6 %, respectively.

Keywords: template, component, formatting, style, correct way to use the styles.**DOI:** 10.21293/1818-0442-2023-26-1-48-55*References*

- [Functional Safety of Electrical / Electronic / Programmable Electronic Safety-Related Systems]. *IEC 61508*, Available at: <https://webstore.iec.ch/publication/5515>, free (Accessed: March 03, 2023).
- Patel M.R. *Spacecraft Power Systems*. USA, FL, Boca Raton: CRC Press, 2005, 691 p.
- Meany T. Functional safety and industrie 4.0. 2017 28th Irish Signals and Systems Conference (ISSC). Killarney, Ireland, 2017, pp. 1–7.
- Zdoukhov L.N., Parfenov Yu.V., Tarasov O.A., Chepelev V.M. [Three possible mechanisms for the failure of electronic devices as a result of electromagnetic interference]. *Technologies of Electromagnetic Compatibility*, 2018, no. 2, pp. 22–34 (in Russ.).
- Pissoort D., Lannoo J., Van Waes J., Degraeve A., Boydens J. Techniques and measures to achieve EMI resilience in mission- or safety-critical systems. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, 2017, vol. 6, no. 4, pp. 107–114.
- Mora N., Vega F., Lugin G., Rachidi F., Rubinstein M. Study and Classification of Potential IEMI Sources. *System Design and Assessment Notes*, 2014, pp. 1–43.
- Gazizov A.T., Zabolotskii A.M., Gazizov T.R. Measurement and Simulation of Time Response of Printed Modal Filters with Broad-Side Coupling. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2018, vol. 63, no. 3., pp. 270–276.

8. Gazizov T.R., Orlov P.E., Zabolotsky A.M., Kuksenko S.P. [New concept of critical infrastructure strengthening]. *AIP Conference Proceedings*, 2016, vol. 1738, 4 p. (in Russ.).

9. Gazizov T.R., Orlov P.E., Sharafutdinov V.R. Sposob trassirovki pechatnyh provodnikov cepej s rezervirovaniem [Method of routing printed conductors of circuits with redundancy]. Patent RF, no. 2603850, 2016) (in Russ.).

10. Gazizov T.R., Orlov P.E., Sharafutdinov V.R. Sposob trassirovki pechatnyh provodnikov s dopolnitel'nym dielektrikom dlya cepej s rezervirovaniem [Method of routing printed conductors with additional dielectric for circuits with redundancy]. Patent RF, no. 2603851, 2016) (in Russ.).

11. Sharafutdinov V.R., Gazizov T.R. [Analysis of redundancy methods based on modal filtering]. *Control, Communications and Security Systems*, 2019, no. 3, pp. 117–144 (in Russ.).

12. Sharafutdinov V.R., Gazizov T.R., Medvedev A.V., Sposob trehkratnogo rezervirovania mehsoedinenii [Method of triple interconnection reservation]. Patent RF, no. 2738955, 2020.

13. Gazizov T.R., Orlov P.E., Sharafutdinov V.R. Sposob trehkratnogo rezervirovania mehsoedinenii v mnogosloinnyh pehatnih platat [Method for triple circuit redundancy in multi-layer printed circuit boards]. Patent RF, no. 2663230, 2017.

14. Belousov A.O., Medvedev A.V., Chernikova E.B., Gazizov T.R., Zabolotsky A.M. Switching order after failures in symmetric protective electrical circuits with triple modal reservation, *Symmetry*, 2021, vol. 13, no. 6, pp. 1–22.

15. Chan K.Y., Daneshmand M., Fomani A.A., Mansour R.R., Ramer R. Monolithic MEMS T-type Switch for Redundancy Switch Matrix Applications. *2008 38th European Microwave Conference*, 2008, pp. 1513–1516.

16. Medvedev A.V. Zhechev Y.S., Gazizov T.R. Experimental Study of a Structure with Triple Modal Reservation Before and After Failures, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2022, vol. 65, no. 1, pp. 1–4.

17. Malyutin N.D. Regular and irregular multi-coupled strip structures and devices based on them: calculation of primary parameters, pulse measurements of characteristics, Tomsk State University Control Systems and Radioelectronics, 2012, 218 p. (in Russ.).

18. Kosteletskii V.P., Medvedev A.V. Zhechev Y.S. Method for experimental study of circuits with triple modal reservation in time and frequency domains, *2022 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*, 2022, pp. 1–8.

19. Kuksenko S.P. Preliminary results of TUSUR University project for design of spacecraft power distribution network: EMC simulation, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, no. 012110., pp. 1–7.

Artem V. Medvedev

Postgraduate student, Department of Television and Control,

Tomsk State University of Control Systems

and Radioelectronics (TUSUR)

40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050

ORCID: 0000-0003-4718-1024

Phone: +7-909-538-72-38

Email: medart20@rambler.ru