

УДК 621.391

Е. Зима, Р.Р. Газизов

Модальное резервирование: современное состояние

Модальное резервирование (МР) является одним из эффективных способов одновременного обеспечения электромагнитной совместимости и надежности радиоэлектронной аппаратуры. Ранее выполнен развернутый обзор истории развития МР и исследований по нему до 2021 г. В силу бурного развития МР в последние годы выполнен обзор последних исследований, в том числе патентов и зарегистрированных программ для ЭВМ по настоящее время и выделена значимость каждого из них. На основе этого обзора выявлены структуры, подходящие для исследования уровня излучаемой эмиссии от них квазистатическим подходом и экспериментально в ТЕМ-камерах. Обобщена новизна представленных исследований.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, модальная фильтрация, модальное резервирование, печатная плата, гибкий печатный кабель, кондуктивная эмиссия, излучаемая эмиссия.

DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-3-55-69

При проектировании радиоэлектронных устройств (РЭУ) большое внимание уделяется их надежности и функциональной безопасности, а с ростом числа РЭУ и усложнением их конструкции вопрос обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) становится особенно острым. Это весьма важно для РЭУ, применяющихся в критических системах, например, спутниковых, бортовых и военных, где требуется их стабильная непрерывная работа. Выход таких систем из строя приводит к серьезным финансовым и информационным потерям. Распространенным способом обеспечения надежности РЭУ является резервирование, т.е. введение избыточности в структуру устройства [1].

Недостатком данного способа является повышение стоимости и массы конструкции, а также отсутствие ослабления электромагнитных помех (ЭМП). ЭМП могут также быть вызваны преднамеренно. Сверхкороткие импульсы (СКИ) являются одним из опасных видов преднамеренных ЭМП. Из-за их малой длительности, широкого спектра и высокой мощности классические устройства защиты от помех не могут эффективно справляться с их подавлением. Модальная фильтрация (МФ) – принцип защиты от СКИ, основанный на разложении импульса помехи в многопроводных линиях передачи на импульсы меньшей амплитуды за счет электромагнитной связи между линиями [2]. На основе данного принципа созданы модальные фильтры, отличающиеся высокой эффективностью при борьбе с ЭМП, а также небольшой массой и стоимостью [3].

Модальное резервирование (МР) является одним из новых способов трассировки и компоновки элементов печатных плат (ПП), одновременно обеспечивающим ЭМС РЭУ за счет применения МФ и повышение их надежности за счет резервирования. Обеспечение ЭМС происходит за счет повышения помехозащищенности РЭУ использованием модального разложения благодаря электромагнитной связи между резервируемыми и резервными проводниками в неоднородной диэлектрической среде. Повышение надежности происходит за счет холодного резервирования замещением резервируемых проводников (при

любых видах отказов) резервными проводниками, не принимающими активного участия в работе РЭУ и не потребляющими энергию. Применение МР может дать стабильную непрерывную работу РЭУ в критических системах.

В настоящее время ведутся активные исследования в области развития и повышения эффективности МР при трассировке и монтаже ПП. Уже тщательно исследовалось применение МР в различных типах ПП. Особое внимание уделялось их исследованию в части кондуктивной эмиссии. Некоторые исследования посвящались оценке излучаемой эмиссии (ИЭ) от ПП с МР. Однако такая оценка выполнялась только на простых классических структурах с бесконечной плоскостью земли, изготовленной в виде одного слоя. Тем временем необходимо обратить внимание на ИЭ от структур сложных геометрических моделей, как, например, от структуры с конечной землей, исполненной в виде одного опорного проводника. Такие исследования позволят в дальнейшем более тщательно исследовать характеристики ПП с МР и проектировать их макеты с учетом уровня ИЭ от них.

Ранее в работах [4, 5] рассмотрена история развития МР с обзором исследований и патентов до 2021 г. Тем не менее целесообразно выполнить обзор свежих исследований для оценки развития данной области за прошедшее время, выделив значимость каждого из них. Также важно выявить возможные структуры ПП с МР с конечной землей, подходящие для оценки уровня ИЭ от них в диапазоне частот, в том числе в условиях критических температур моделью из [6]. Это позволит изготовить их макеты для последующих экспериментальных исследований.

Цель работы – выполнить обзор исследований по МР, выполненных с 2021 г. до настоящего времени, и выявить возможные структуры ПП с МР с конечной землей, подходящие для оценки уровня ИЭ от них квазистатическим подходом, обобщив новизну представленных исследований.

Исследования по МР за 2021–2023 гг.

В рассмотренных здесь работах исследованы структуры с различной кратностью МР: однократным [7–19], двукратным [20–23] и трехкратным [24–

36]. Моделируемые эквивалентные схемы здесь не приводятся, поскольку они везде одинаковы: связанные или многопроводные линии с резисторами 50 Ом на всех концах проводников. Вход и выход на концах одного из проводников.

В работе [7] впервые экспериментально продемонстрировано разложение СКИ в четырехслойной (по числу слоев трассировки) ПП с однократным МР (рис. 1) до и после отказов. Для анализа влияния СКИ на безопасность функционирования структуры использовались N -нормы.

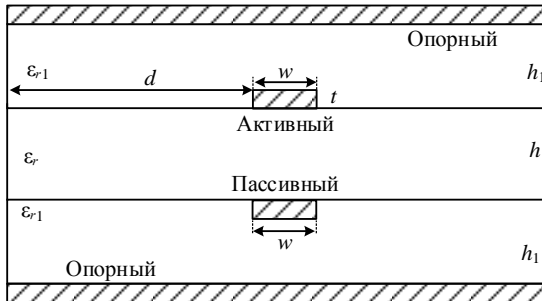


Рис. 1. Поперечное сечение четырехслойной ПП с однократным МР [7]

Для сравнения с результатами эксперимента также выполнены квазистатический и электродинамический анализы. Исследованы случаи короткого замыкания (КЗ) и холостого хода (ХХ) на входе и выходе резервируемого проводника. Для демонстрации разложения СКИ до и после отказов на вход структуры подавались два колоколообразных импульса с общими длительностями 0,15 и 1,5 нс. Экспериментально показано, что структура с МР до и после отказов ведет себя как фильтр низких частот, а отклонения частот резонанса и среза от прогнозируемых после отказов могут достигать 45 и 19% соответственно.

Также показано, что после отказов максимальные амплитуды разложенных импульсов на дальнем конце структуры с МР изменяются в зависимости от длительности импульсов помех на входе. Это влияние объяснено длиной трасс к соединителям SMA. Установлено, что когда двойная задержка в трассе больше общей длительности импульса, то после отказов амплитуда не изменится, так как отраженные импульсы не будут накладываться на основные. Однако с увеличением длины трассы импульсы помех будут накладываться на основные и менять максимальные амплитуды. Все обнаруженные в данной работе явления необходимо учитывать при проектировании четырехслойных ПП с однократным МР. Таким образом, в указанной работе эта структура впервые исследована столь обстоятельно (разными видами анализа, в том числе экспериментально) и системно (в том числе после отказов и с учетом влияния отводов).

В работе [8] исследована двухпроводная (3-й проводник – схемная земля) асимметричная структура с однократным МР, представленная на рис. 2. Эвристическим поиском определены оптимальные

значения геометрических параметров поперечного сечения структуры для достижения минимального уровня вносимых потерь. Показано влияние расположения резервируемого и резервирующего проводников на уровень ослабления импульсов помехи в синфазном и дифференциальном режимах работы при объединении двух центрально-симметричных модальных фильтров, а также определено их оптимальное расположение.

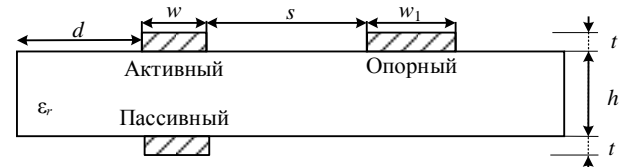


Рис. 2. Поперечное сечение двухпроводной асимметричной структуры с однократным МР [8]

На вход структуры подавались трапециевидный импульс амплитудой 1 В, оцифрованный с осциллографа сигнал амплитудой 0,5 В и два классических сверхширокополосных импульса одинаковой и разной полярностей с амплитудой 1 В. Уровень ослабления в дифференциальном режиме составил $-5,19; 11,57; 5,26$ и $5,22$ дБ, а в синфазном $-5,45; 11,7; 5,65$ и $5,65$ дБ для трапециевидного, оцифрованного, однополярного и биполярного воздействий соответственно. Переход на ближе расположенные пары проводников снижает уровень вносимых потерь на $0,57-0,76$ дБ для синфазного режима и на $0,61-0,82$ дБ для дифференциального режима в зависимости от выбранных линий. В итоге впервые исследованы синфазный и дифференциальные режимы работы сдвоенных структур с лицевой связью, что соответствует требованиям, обычно задаваемым (по обоим режимам) на практике по ослаблению.

При исследовании структур с МР в качестве объектов могут выступать не только ПП, но и гибкие печатные кабели (ГПК). Они могут использоваться для безопасного и надежного соединения между основным (резервируемым) и вторичным (резервирующим) элементами РЭУ. В [9, 10], в отличие от предыдущих работ, исследуются ГПК с однократным МР. Как и в [7], в работе [9] исследована способность ГПК с МР ослаблять СКИ после различных видов отказов.

Исследованы три структуры ГПК: двустороннего [11] (рис. 3), зеркально-симметричного двустороннего (рис. 4) и с лицевой и боковой связями с разным расположением опорных проводников (рис. 5). Для всех продемонстрировано ослабление СКИ после отказов в случае КЗ на входе, ХХ на входе, КЗ на входе и выходе, ХХ на входе и на выходе, КЗ на входе и ХХ на выходе. В качестве входного воздействия использовался трапециевидный импульс амплитудой 2 В. В случае отказа только на одном конце уровень ослабления больше, чем до отказа. Максимальный уровень ослабления достиг 5 раз в случае ХХ на входе: максимальная амплитуда выходного импульса до отказа равна 0,4 В, а после – 0,195 В. При отказе на обоих концах также наблюдается ослабление, но

значительно меньше (в 1,3–1,9 раза). В некоторых случаях при КЗ на входе и ХХ на выходе ослабление оказалось больше, чем до отказа и отказа на одном конце.

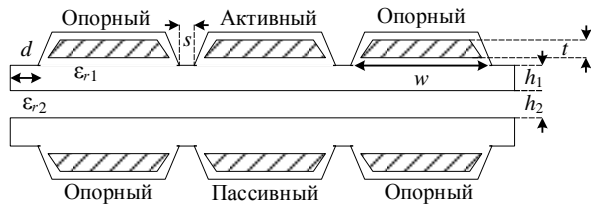


Рис. 3. Поперечное сечение двустороннего ГПК [9, 10]

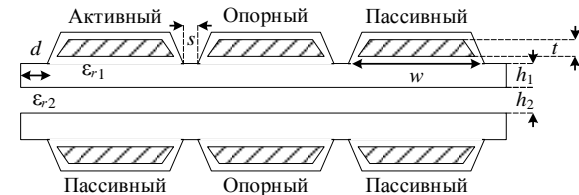


Рис. 4. Поперечное сечение зеркально-симметричного ГПК [9, 10]

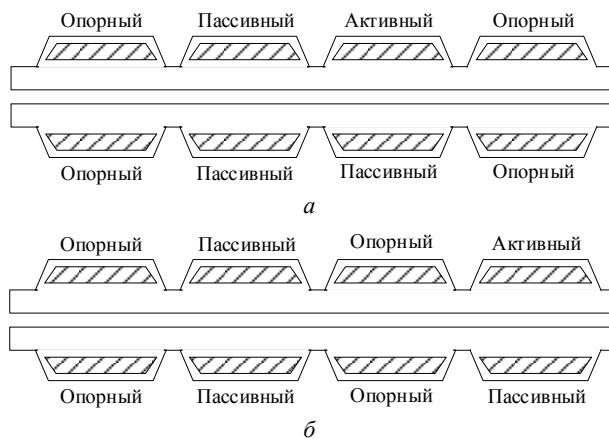


Рис. 5. Поперечные сечения ГПК с боковой и лицевой связью (а) и с попарно-лицевой связью (б) [9, 10]

В [10] рассмотрены ранние исследования различных структур ГПК с МФ, а также, как в [9], выполнено квазистатическое моделирование трех структур ГПК, основанных на модификации МФ на двухсторонней ПП. Выбрана одна из них для реализации ГПК с однократным МР. Также исследовано влияние расстояния между ГПК на разность погонных задержек и амплитуду импульсов разложения. Выявлено, что с ростом этого расстояния уменьшаются разность задержек и ослабление СКИ. При минимальном исследованном расстоянии между ГПК получено ослабление 3,2 раза для двухстороннего ГПК (рис. 3), 3,8 раза – для зеркально-симметричного ГПК (рис. 4) и 4 раза – для ГПК с лицевой и боковой связью (рис. 5, а). Важность этого исследования заключается в том, что, как многие кабели, ГПК могут иметь довольно большую длину, способствующую модальному разложению СКИ, а также много проводников, используемых не как сигнальные, а экранирующие, расположение которых влияет на ослабление

СКИ. Примечательно и обстоятельное исследование влияния на эффективность МР граничных условий после различных отказов.

В работе [12] рассмотрены временные характеристики двуслойной ПП с однократным МР с проводниками на внешнем слое (рис. 6), а также исследовано влияние геометрических параметров поперечного сечения структуры на разность погонных задержек и среднее геометрическое импедансов мод. Временной отклик рассчитывался при подаче трапецидального импульса амплитудой 2 В общей длительностью 30 нс. Исследованная структура гарантирует ослабление входного импульса в 2 раза. В результате установлено, что из всех рассмотренных параметров наиболее сильно на разность погонных задержек влияют высота нижнего слоя подложки и толщина проводников. Поэтому для увеличения разности погонных задержек для таких структур рекомендовано брать максимально возможные из указанных параметров с учетом их влияния на среднее геометрическое импедансов мод. Это исследование примечательно возможностью использования для МР (за счет максимизации разности задержек четной и нечетной мод) структуры, которая ранее исследовалась как пара связанных подвешенных полосковых линий с целью минимизации перекрестной наводки на дальнем конце (за счет выравнивания задержек четной и нечетной мод).

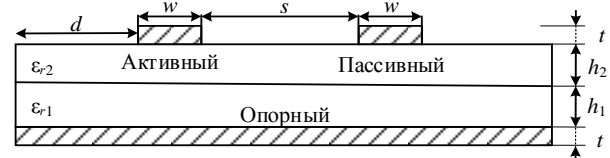


Рис. 6. Поперечное сечение ПП с проводниками на внешнем слое [12]

При изучении характеристик структур с МР до и после отказов также необходимо исследовать влияние климатических условий окружающей среды на эти характеристики. Таким целям посвящена работа [13]. В ней представлены результаты экспериментальных исследований ПП с МР (рис. 7) до и после отказов, но, в отличие от остальных работ, исследования выполнены в частотной области и с учетом температуры окружающей среды от минус 50 до 150 °С с использованием специальной климатической камеры.

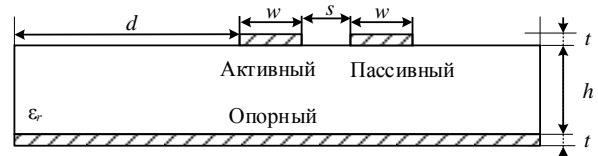


Рис. 7. Поперечное сечение ПП с однократным МР [13]

Рассмотрены частотные зависимости модулей коэффициентов отражения $|S_{11}|$ и передачи $|S_{21}|$. Показано, что после отказа сохраняется эффект МР, но при высоких температурах замечено сужение диапазона

рабочих частот полезного сигнала. При сравнении ПП с и без МР наблюдалось уменьшение $|S_{11}|$ и $|S_{21}|$ с МР со сдвигом в сторону низких частот. Также $|S_{11}|$ и $|S_{21}|$ ПП с МР до и после отказов уменьшаются при повышении температуры и увеличиваются при ее понижении относительно результатов при комнатной температуре. Параметры $|S_{12}|$ и $|S_{21}|$ для ПП с МР оказались меньше на 1,2 дБ, чем без МР, а после отказов – на 0,5 дБ. А $|S_{11}|$ и $|S_{22}|$ после КЗ оказались в среднем на 5 дБ меньше, чем до отказа и без МР, а после ХХ – на 4 дБ выше. Результаты исследования позволят в дальнейшем уменьшить чувствительность характеристик ПП к перепадам температуры окружающей среды за счет выбора других материалов ПП. Эта объемная работа уникальна совокупностью исследованных аспектов: частотные характеристики, температура, виды отказов с МР и без него.

Для защиты высокоскоростных интегральных схем (ИС) от ЭСР и перенапряжения используются дополнительные электронные компоненты: резисторы, стабилитроны, TVS-диоды и т.д. Помимо перечисленных устройств, также могут применяться схемы с МР.

В работе [14] исследована критичность влияния СКИ различной полярности на эффективность защиты ИС, состоящей из диодной схемы и структуры с МР. Рассмотрены случаи подачи импульсов амплитудой 1 000 В одной полярности, образовавшихся на выходе резервируемого проводника в схеме с МР, и различной полярности, образовавшихся на выходе резервирующего проводника, на вход диодной системы с включенным питанием и без питания. Наибольшая амплитуда импульса 414 В на выходе защитной системы наблюдалась при подаче двух однополярных импульсов с выключенным питанием. При подаче импульсов разной полярности амплитуда достигала 395 В. Когда защитная схема подключена к питанию, амплитуда импульсов на ее выходе не превышала 85 В. В результате авторы рекомендовали совместно использовать диодную схему и структуру с МР для повышения эффективности и надежности защиты ИС. Это исследование важно оценкой возможных угроз не только резервной, но и резервирующим цепям.

Работа [15] отличается от рассмотренных прежде работ тем, что в ней исследовано распространение СКИ при подключении ГПК (рис. 8) к ПП с однократным МР с лицевой (см. рис. 7) и боковой связями (см. рис. 1).

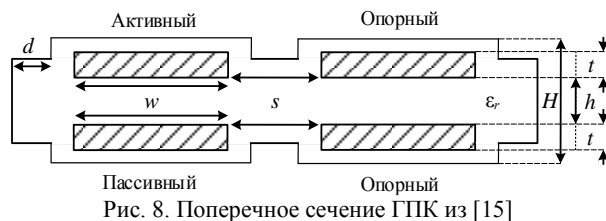


Рис. 8. Поперечное сечение ГПК из [15]

Показано, что для лицевой связи разница в задержках разложенных импульсов не меняла свой знак и варьировалась от 2,2 до 2,65 нс для максималь-

ных длин кабеля и линий ПП соответственно. Для торцевой связи эта разница меняла свой знак, варьируясь от минус 1,25 до +2,65 нс для максимальных длин линий ПП и ГПК соответственно. В результате показано, что при соотношении длин 0,32 разница задержек будет равна нулю. Таким образом, впервые показаны возможные изменения характеристик МР в структурах ГПК–ПП.

Помимо исследований в части кондуктивных помех, для полноценного анализа структур с МР исследовалась ИЭ от них. В работе [17] выполнено квазистатическое моделирование структуры с однократным МР в мини-ТЕМ-камере до 5 ГГц (рис. 9), а в [16] – в классической ТЕМ-камере до 2 ГГц. Сравнены полученные частотные зависимости напряжений на концах центрального проводника камер с измеренными результатами из других работ. В ходе моделирования относительная диэлектрическая проницаемость подложки ПП из стеклотекстолита варьировалась в диапазоне 4,7–5,6. Обнаружено, что её рост меняет резонансную частоту, при её максимальном значении результаты моделирования ближе всего к измеренным, а отличия объяснимы разницей в длине линий ПП и центрального проводника камер. Полученные результаты подтвердили возможность использования вычислительных ресурсов для получения быстрых оценок ИЭ без измерений, что позволяет оптимизировать и исследовать структуры с МР с учетом ИЭ еще на этапе проектирования до изготовления макетов. Это исследование открыло путь к виртуальным испытаниям устройств с МР.

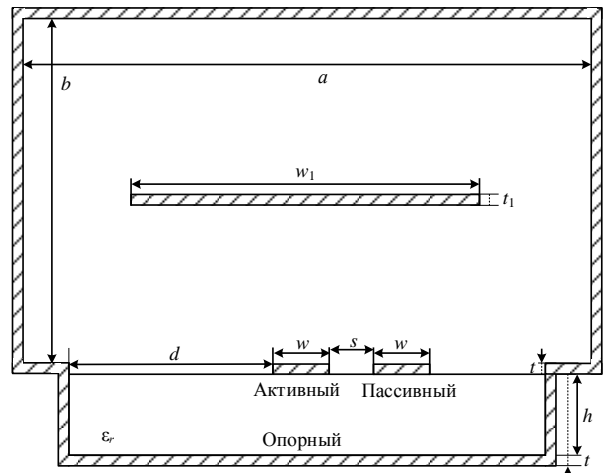


Рис. 9. Поперечное сечение ПП внутри ТЕМ-камеры [17]

В работе [18] выполнены анализ и оптимизация многослойной ПП с однократным МР проводников на внешнем (см. рис. 6) и внутреннем (рис. 10) слоях. Впервые выявлена зависимость разности погонных задержек от параметров подобных структур. Для анализа временных откликов на их вход поступал импульс амплитудой 1 В. Амплитуда выходных импульсов для обеих структур составила 0,5 В. Однако у ПП с проводниками на внутреннем слое наблюдалась малая разность задержек – 0,04 нс, в то время как на внешнем – 1 нс. Оптимизация геометрических пара-

метров структур выполнялась эвристическим поиском и генетическим алгоритмом с целью максимизации модуля разности погонных задержек с учетом и без учета согласования линий в тракте 50 Ом.

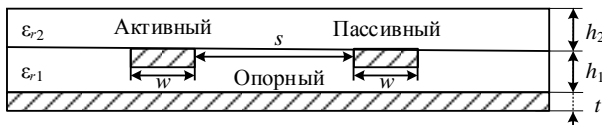


Рис. 10. Поперечное сечение ПП с проводниками на внутреннем слое [18]

В результате оптимизации получены наборы параметров, которые можно использовать для реализации различных задач при проектировании ПП. Например, в цифровых цепях или в радиочастотных и СВЧ-схемах, где требуется согласование линии передачи с трактом, выявлены возможности получения нулевой чувствительности характеристик структур к изменению отдельных параметров. Это исследование также примечательно возможностью использования для МР (за счет максимизации разности задержек четной и нечетной мод), но только уже более сложной структуры, которая ранее исследовалась как последовательно соединенные отрезки связанных подвешенных полосковых линий и связанных обращенных полосковых линий с целью минимизации перекрестной наводки на дальнем конце (за счет выравнивания задержек четной и нечетной мод).

В [19], как и [13], исследовано влияние окружающей среды, а именно температуры и влажности, на характеристики ПП с МР. Предложены модели для оценки этого влияния на ПП с однократным МР с боковой связью (см. рис. 7) во временной области. Рассмотрены три случая: при 25 °С, под слоем 1 мм воды при 25 °С и льда при -50 °С. Вычислен временной отклик на воздействие импульса с амплитудой ЭДС 1 В. Для воды максимальная амплитуда импульсов на выходе достигала 0,76 В, для льда - 0,42 В, а без них - 0,44 В. Также выявлено, что влажность и температура могут значительно влиять на *N*-нормы вдоль проводников. Разработанные в работе модели позволят упростить и автоматизировать оценку влияния жестких условий окружающей среды на ПП с МР.

Несколько работ посвящено двукратному МР. Так, в работе [20] исследовано влияние магнетодиэлектрического покрытия на ИЭ в структуре (рис. 11, а) с расчетом временного отклика на воздействие трапецеидального импульса с амплитудой ЭДС 1 В. Выявлено, что покрытие уменьшило амплитуду импульсов разложения на 0,17 В и напряжение, характеризующее ИЭ от структуры, на 0,2 В. Исследование отличается уникальным сочетанием: двукратное МР, магнетодиэлектрическое покрытие и ИЭ.

В работе [21] исследованы различные варианты асимметрии ПП с двукратным МР (см. рис. 11, б) и их влияние на ее характеристики при воздействии трапецеидального импульса с амплитудой ЭДС 1 В. Также рассмотрены различные варианты порядка переключения в цепи после отказа ее элементов с

учетом симметрии и асимметрии ее проводников. Наименьшей амплитудой (0,346 В) обладал набор параметров с разной шириной проводников, но с одинаковым расстоянием между ними. В результате показано, что асимметрия ПП с МР улучшает их временные характеристики. Таким образом, работа выявила новый ресурс совершенствования МР.

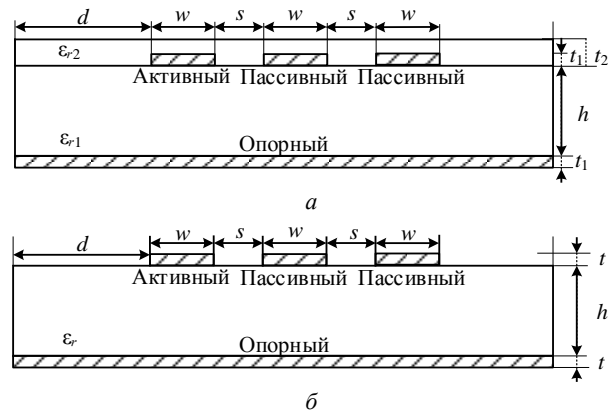


Рис. 11. Поперечное сечение ПП с двукратным МР с магнетодиэлектрическим покрытием (а) и без него (б) [20, 21]

В работах [22, 23] экспериментально исследованы ПП с двукратным МР (см. рис. 11) в части ИЭ. В [22] измерены ИЭ от ПП с двукратным МР до и после отказов через напряжение на концах линий в ТЕМ-камере, работающей до 2 ГГц, а в [23] – до 5 ГГц. Рассмотрены различные виды отказов на концах проводников и определен оптимальный вариант трассировки активного проводника по отношению к пассивным. После проведенного анализа рекомендовано трассировать активный проводник между пассивными, так как после отказов уровень ИЭ от него практически не увеличивается по сравнению с его трассировкой на краях. Также при его трассировке между пассивными восприимчивость ПП к ИЭ после отказов снижается на 20%, а на краях – на 40%. Результаты данных исследований позволят проектировать ПП с учетом уровней ИЭ от них и восприимчивости к ИЭ. Важно, что такие измерения для двукратного МР выполнены впервые, в том числе после отказов.

Много работ посвящено трехкратному МР. Например, в [24] рассмотрено применение зеркально-симметричной двусторонней ПП в качестве структуры с МР (рис. 12). Она отличается простой и недорогой реализацией по сравнению с ранее разработанными аналогами. Рассмотрены различные случаи отказов элементов цепи и варианты переключения после них: на нижний правый проводник, нижний левый и верхний правый. Впервые проанализировано подавление СКИ в подобной структуре. При воздействии трапецеидального импульса с амплитудой ЭДС 1 В максимальная из амплитуд выходных импульсов была 0,242 В до отказов, а после отказа в случае ХХ-50 и переключения на нижний правый пассивный проводник - 0,304 В. Кроме того, анализ *N*-норм разложенных импульсов показал, что 3-крат-

ное МР в данной структуре не только ослабляет СКИ, но и снижает вероятность электрического и диэлектрического пробоя и повреждения компонентов оборудования. Результаты моделирования показали, что вероятность диэлектрического пробоя в резервирующих цепях меньше, чем в резервируемой. Исследования показательны сочетанием простоты конструкции, высокой кратности (3) МР, полноты (после отказов) и оценкой угроз резервным цепям.

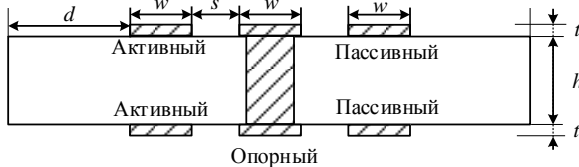


Рис. 12. Поперечное сечение двусторонней ПП [24]

В [25] моделировались и оптимизировались ПП с трехкратным МР двух типов: с опорным проводником в центре структуры (рис. 13) и в виде боковых полигонов (рис. 14). При этом рассмотрены как частотные, так и временные характеристики обеих ПП. Вычислены временные отклики на трапециевидный импульс с амплитудой ЭДС 2 В, электростатический разряд (ЭСР) третьего уровня критичности и оцифрованный импульс с осциллографа С9-11 амплитудой 0,249 В.

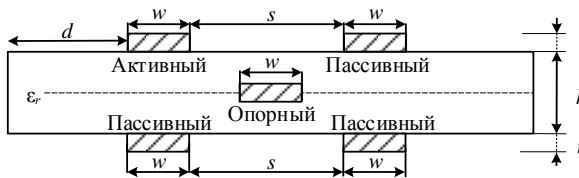


Рис. 13. Поперечное сечение ПП с опорным проводником в центре [25]

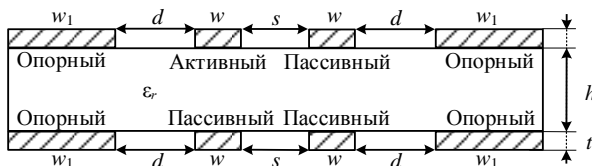


Рис. 14. Поперечное сечение ПП с опорным проводником в виде боковых полигонов [25]

Для трапециевидного импульса структура с опорным проводником в центре обеспечивает ослабление входного импульса в 4,04 раза, а в виде боковых полигонов – в 4,18 раза. ЭСР структуры ослабляют в 1,32 и 1,55 раза соответственно, а импульс с осциллографа с учетом потерь в линиях – в 7,32 и 5,79 раза. Благодаря оптимизации эвристическим поиском удалось снизить максимальное напряжение на выходе структуры с опорным проводником в виде боковых полигонов с 0,243 до 0,235 В, а также выровнять временные интервалы между импульсами разложения для обеих структур. Показано, что они могут быть успешно использованы при проектировании новых устройств с трехкратным МР. Работа отличается комплексным характером: две структуры, временные и частотные характеристики, оптимизация.

В [26] предложен новый метод экспериментального исследования характеристик цепей с трехкратным МР (рис. 15) в частотной и временной областях до и после отказов, позволяющий также определять оптимальный порядок переключения после отказов. Метод позволяет по характеристикам ПП, измеренным в частотной области, вычислить временной отклик с помощью программного обеспечения ADS. Измерены S-параметры до и после различных вариантов отказов на концах линий. Так, при воздействии импульса с амплитудой ЭДС 2 В на выходе структуры наблюдалось разложение с максимальной амплитудой 0,159 В (ослабление в 6,3 раза). Данный метод не требует генераторов специальных воздействий и измерения их результатов, а моделирует их по измеренным частотным зависимостям S-параметров, что значительно сокращает затраты средств и времени.

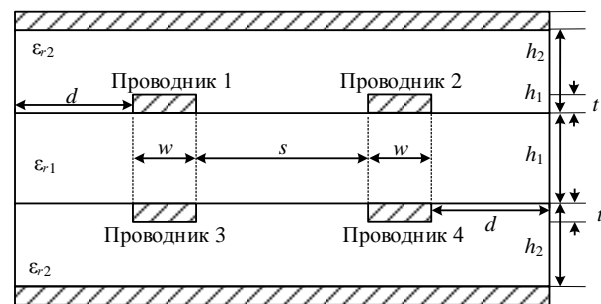


Рис. 15. Поперечное сечение четырехслойной экранированной ПП [26]

В работе [27] проведен предварительный анализ частотных и временных характеристик двуслойной ПП с трехкратным МР (см. рис. 14) для различных материалов диэлектрической подложки. Рассмотрены материалы с относительной диэлектрической проницаемостью ϵ_r от 3,8 до 5,4 марок AD (410, 430 и 450) и FR-4. Для анализа временных характеристик на вход структуры подавался импульс с амплитудой ЭДС 2 В. Определены оптимальные параметры поперечного сечения структур, при которых достигаются максимизация минимальных разностей задержек и согласование структуры с трактом для всех рассмотренных материалов.

Для структур с оптимальными параметрами рассмотрены частотные зависимости S-параметров электродинамическим анализом. Выявлено, что с ростом ϵ_r незначительно уменьшаются частота среза и уровень первого резонанса: наибольшие значения у материала AD 410, а наименьшие – у FR-4. Таким образом, работа отличается редким исследованием (причем строгим электродинамическим анализом) улучшения трёхкратного МР за счет выбора реальных материалов, рост ϵ_r которых является основным для улучшения.

В [28] выполнены квазистатический и электродинамический анализы, а также измерения четырехпроводной ПП с трехкратным МР (см. рис. 14) при отказах ее элементов с различными вариантами переключения. При подаче воздействия с амплитудой ЭДС 2 В на выходе структуры наблюдались 4 импульса

амплитудой 0,25 В. Оптимизацией эвристическим поиском минимальная разность задержек между импульсами почти удвоена. Экспериментальное исследование проводилось на основе метода из работы [26]. Максимальное изменение амплитуды импульсов на дальнем конце резервируемого проводника до и после отказов при длительностях входных сигналов 120 и 240 пс составляет 26,8 и 28% соответственно. Результаты эксперимента и моделирования во временной и частотной областях согласуются. Таким образом, это исследование особо отличается полнотой и завершенностью.

В [29] разработана ПП с трехкратным МР с опорным проводником в виде боковых полигонов, анализ проводился только во временной области электродинамическим анализом для различных наклонов отводов исследуемой структуры. По рассчитанным временным откликам на воздействие импульса с амплитудой ЭДС 2 В видно, что для отводов с углами 90 и 60° наблюдается наименьшее влияние отражений от нагрузок по сравнению с отводом в 45°. В результате для реализации ПП с трехкратным МР выбран угол 90°. Исследование важно для практики изготовления макетов ПП с МР.

В [30] представлен алгоритм для анализа структур с трехкратным МР (см. рис. 14) после различных видов отказа. Он позволяет проводить моделирование, оценку и выбор оптимального порядка переключения цепей. Выполнена апробация алгоритма квазистатическим анализом на конкретной структуре с трехкратным МР. При подаче импульса с амплитудой ЭДС 2 В на ее выходе наблюдалось его разложение на 4 импульса с максимальной амплитудой 0,238 В до отказа. Определен оптимальный порядок переключения после отказа по критерию минимальной амплитуды на выходе.

В [31] также изучен квазистатическим анализом порядок переключения ПП с трехкратным МР до и после отказов, но в данном исследовании объектом анализа являлась экранированная ПП (см. рис. 15). При подаче импульса с амплитудой ЭДС 2 В на выходе максимальное напряжение достигало 0,243 В до отказа. Как и в [30], оптимальный порядок переключения определен по критерию максимального ослабления. Указанные исследования важны открывающейся возможностью уменьшения помех после отказов вовсе без затрат: выбором оптимального порядка последующих переключений на остающиеся резервные цепи.

В работе [32] продолжено исследование, начатое в [7], на ПП с трехкратным МР до и после отказов (см. рис. 15). Представлены результаты вычислений электродинамическим анализом и измерений во временной и частотной областях, а также зависимости N -норм от отказов. Как и в предыдущих работах, рассмотрены различные варианты переключений цепи после отказов и выбран оптимальный. Обнаружено, что изменение максимальной амплитуды на выходе после отказов не превышает 8,18%, из чего можно сделать вывод о том, что данная структура с МР

ослабляет СКИ даже после отказов. Данный вывод подтвердился сравнением результатов, полученных моделированием и экспериментально. Поэтому это исследование важно своей обстоятельностью и продолжением экспериментальных исследований в части перехода от однократного к трёхкратному МР.

В [33] впервые исследованы 4 структуры с трехкратным МР с исходным и оптимальным наборами параметров после отказов вдоль проводников квазистатическим анализом. Рассмотрены варианты отказа на конце, вдоль проводников и отказов двух проводников одновременно. Рассмотренные структуры: ПП с опорным проводником в центре (см. рис. 13), кабель с опорным проводником вокруг (рис. 16), ПП с опорным проводником сверху и снизу (см. рис. 15) и ПП с опорным проводником в виде боковых полигонов (см. рис. 14). Для каждой структуры выбран оптимальный порядок переключения, позволяющий уменьшить максимальное выходное напряжение на 5–72 %. Таким образом, обстоятельно исследованы сразу несколько структур с трёхкратным МР и впервые с возможностью отказа вдоль трассы, в том числе с оптимизацией порядка переключения.

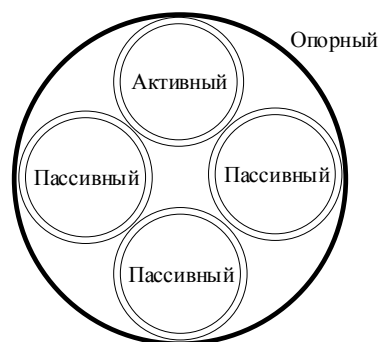


Рис. 16. Поперечное сечение структуры с МР и опорным проводником вокруг сигнальных [32]

В [34] представлены результаты квазистатического моделирования во временной и частотной областях для структур с трехкратным МР и опорными проводниками двух типов: вокруг сигнальных (см. рис. 16), а также сверху и снизу (см. рис. 15). Временной отклик рассчитывался при подаче на структуру трех типов воздействия, ранее описанных в [25]. Структуры с опорным проводником вокруг сигнальных и сверху и снизу ослабили входной сигнал: для трапециoidalного импульса – в 2,01 и 3,98 раза, для ЭСР – в 1,22 и 1,17 раза, для оцифрованного импульса – в 2,28 и 5,29 раза соответственно. Для обеих структур выполнена оптимизация параметров эвристическим поиском, уравнивая разности задержек между разложенными импульсами и уменьшившая их амплитуду с 0,5 до 0,29 В с опорным проводником вокруг сигнальных и с 0,25 до 0,24 В – снизу и сверху. Анализ, проведенный в работе, показал, что эти структуры можно использовать при разработке новых устройств с трехкратным МР. Работа примечательна анализом структур с различными опорными проводниками.

В работах [35, 36], как и в [22, 23], представлены измерения ИЭ, но на ПП с трехкратным МР (рис. 17). Оценены ИЭ от ПП с МР путем измерения их S -параметров в ТЕМ-камере после отказов. Определен оптимальный вариант трассировки активного проводника по отношению к пассивным с учетом уровня ИЭ: на краях четырехпроводной ПП. Работа важна своей практической направленностью (измерения), высокой кратностью МР (3) и мало исследованной оценкой (ИЭ).



Рис. 17. Поперечное сечение четырехпроводной ПП [35]

В табл. 1 и 2 представлена классификация рассмотренных в обзоре работ по конструктивным признакам исследуемых структур и по видам и особенностям анализа соответственно.

Видно, что большая часть рассмотренных работ направлена на исследование характеристик структур с однократным и трехкратным МР как во временной, так и в частотной областях. В основном исследования проведены моделированием с помощью квазистатического анализа. Это можно объяснить тем, что он позволяет с достаточной точностью анализировать различные конфигурации без значительных вычислительных затрат по сравнению с электродинамическим анализом. Также можно отметить, что в большей части работ основным объектом исследования выступают ПП с МР, только в некоторых работах изучены характеристики ГПК и других кабелей. Основная часть рассмотренных работ представляет результаты исследований структур с МР до и после отказов и оптимального порядка переключения проводников.

Только в двух работах исследованы характеристики структур с МР при различных условиях окружающей среды, в остальных анализ выполнялся при нормальных условиях. Самые распространенные структуры для анализа в рассмотренных работах: ПП с опорным проводником в виде боковых полигонов и экранированная четырехслойная ПП.

Таблица 1

Классификация работ по конструктивным признакам исследуемых структур

№	Кратность МР			Объект исследования			Тип материала	ϵ_r	Число слоев ПП			№ рисунка
	1	2	3	ПП	ГПК	Кабель			2	3	≥ 4	
[5]	+			+				5,4	+			7
[7]	+			+			FR-4 1080, RO-3010	10,2; 4,3			+	1
[8]	+			+			FR-4	4,6	+			2
[9]	+				+		Полиимид	3,5				3, 4, 5
[10]	+				+		Полиимид	3,5				3, 4, 5
[12]	+			+			Стеклотекстолит	10,2; 4	+			6
[13]	+			+			Стеклотекстолит	4,7	+			7
[14]	+			+					+			7
[15]	+			+	+			4; 4,3	+		+	1, 7, 8
[16]	+			+			Стеклотекстолит	4,7–5,6	+			7
[17]	+			+			Стеклотекстолит	4,7–5,6	+			7
[18]	+			+				4; 10,2	+			6, 10
[19]	+			+				4,4; 4,57	+			7
[20]		+		+				4,6	+			11 (а)
[21]		+		+			FR-4	4	+			11 (б)
[22]		+		+				4,7	+			11 (б)
[23]		+		+				4,7	+			11 (б)
[24]			+	+				4,5	+			12
[25]			+	+				4,5; 5	+	+		13, 14
[26]			+	+				4,3; 10,2			+	15
[27]			+	+			AD (410, 430, 450), FR-4	3,8-5,4	+			14
[28]			+	+			FSD1020T	10,2	+			14
[29]			+	+			Оксид алюминия	9,8	+			14
[30]			+	+				4,5	+			14
[31]			+	+				4,3; 10,2			+	15
[32]			+	+			FR-4 1080, RO-3010	11,2; 4,55			+	15
[33]			+	+		+		5; 10; 6; 16; 30; 4,3	+	+	+	13, 14, 15, 16
[34]			+	+		+		10; 4,5			+	15, 16
[35]			+	+				4,7	+			17
[36]			+	+				4,7	+			17

Таблица 2

Классификация работ по видам и особенностям анализа

№	Вид анализа			Область исследования		Отказы	Учет температуры	Оптимизация	ИЭ
	Эксперимент	Моделирование		Временная	Частотная				
		Квазистатическое	Электродинамическое						
[5]	+				+	+	+		+
[7]	+	+	+	+	+	+			
[8]		+		+				+	
[9]		+		+		+			
[10]		+		+					
[12]		+		+					
[13]	+				+	+	+		+
[14]			+	+					
[15]		+		+					
[16]		+			+				+
[17]		+			+				+
[18]		+		+				+	
[19]		+		+			+		
[20]			+	+					+
[21]		+		+		+			
[22]	+				+	+			+
[23]	+				+	+			+
[24]		+		+		+			
[25]		+		+	+			+	
[26]	+		+	+	+	+			
[27]		+	+	+	+			+	
[28]	+	+	+	+	+	+			
[29]			+	+					
[30]		+		+		+			
[31]		+		+		+			
[32]	+		+	+	+	+			
[33]		+		+		+			
[34]		+		+	+			+	
[35]	+				+	+			+
[36]	+				+	+			+

При исследовании характеристик ПП в большей части работ в качестве материала диэлектрической подложки выбирались дешевые стеклотекстолит и FR-4, но за счет роста относительной диэлектрической проницаемости также пытались увеличить интервалы между импульсами разложения или их ослабление. Между тем мало работ по учету уровня ИЭ от структур с МР.

Также стоит отметить, что в результате исследований за обозреваемый период зарегистрированы программы для ЭВМ и патенты. Программы [37–39] предназначены для оценки ИЭ: [37] – для структур с МР, [38] – для одного и двух связанных проводов над плоскостью земли с диэлектриком и без него, [39] – для ПП с МР путём виртуальных испытаний в мини-ТЕМ-камере. Программа [40] предназначена для анализа четырехслойной зеркально-симметричной полосковой структуры с трехкратным МР.

Все полученные за обозреваемый период патенты относятся к конструированию и трассировке

ПП с МР. Патент [41] предлагает способ трассировки ПП с МР (рис. 18), включающий трассировку резервируемой цепи на верхнем слое, а резервирующей – зеркально на нижнем. За прототип принят способ [11], предлагающий компоновку и трассировку резервируемой цепи на верхнем слое подложки, выполнение сигнальных проводников за счет зазоров в опорной проводящей пластине, а компоновку и трассировку резервной цепи на нижнем слое подложки зеркально верхнему слою. Недостатком старого способа является большая масса ПП и недостаточное ослабление СКИ. Новый предложенный способ уменьшает массу ПП и увеличивает уровень ослабления СКИ. При воздействии с амплитудой ЭДС 2 В максимальная амплитуда выходного импульса достигает 0,42 В, в то время как у прототипа – 0,5 В.

В том же году получен патент [42], основанный на классическом способе [43], который отличается малым коэффициентом ослабления, большой массой ПП и изгибом, возникающим из-за асимметрии рас-

положения проводников на нижней и верхней сторонах ПП. Новый патент предлагает способ симметричной трассировки сигнальных и опорных проводников цепей с МР (рис. 19), в результате которого достигается уменьшение массы и изгиба ПП, а также на 20% увеличивается уровень ослабления СКИ: 0,42 В на выходе, в то время как у прототипа – 0,5 В.

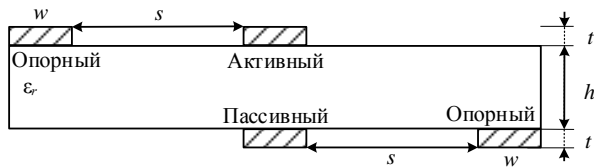


Рис. 18. Поперечное сечение способа трассировки двухсторонней ПП с МР и уменьшенным количеством проводников [41]

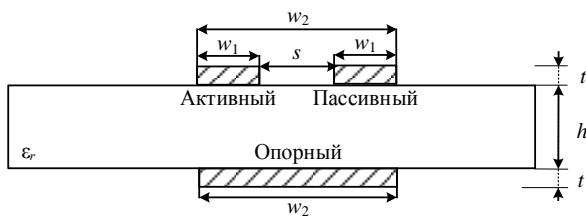


Рис. 19. Поперечное сечение способа симметричной трассировки сигнальных и опорных проводников цепей с МР [42]

Патент [44] также усовершенствует способ [43], повышая надежность ПП за счет трассировки резервируемых и резервных проводников с единым опорным проводником (рис. 20). При этом над резервным и резервируемым проводниками располагается связывающий проводник так, чтобы он имел необходимую для модального разложения электромагнитную связь с сигнальными. Одновременно с патентом [44] получен патент [45], предлагающий способ удаленной компоновки печатных проводников цепей с трехкратным МР. Патент усовершенствует способ, предложенный в [46], недостатком которого являлась низкая надежность цепи из-за высокой плотности компоновки (рис. 21) позволяет повысить защиту структуры от механического повреждения при сохранении помехозащищенности за счет модального разложения.

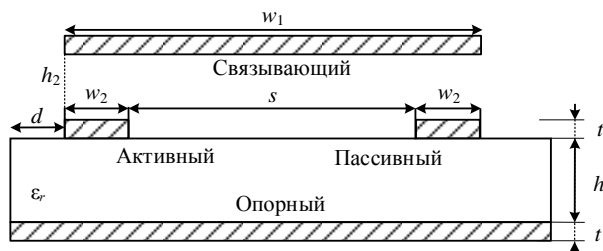


Рис. 20. Поперечное сечение структуры с удаленной трассировкой печатных проводников цепей с однократным МР [44]

Выбор структур с конечной землей для исследований ИЭ

Для анализа ИЭ квазистатическим подходом с последующим изготовлением макетов для экспери-

ментального исследования необходимо определить ПП с конечной схемной землей в виде одного опорного проводника с однократным или многократным МР, подходящие для такой цели.

Исследование экранированных ПП из работ [7, 26] с однократным (см. рис. 1) и трехкратным (см. рис. 15) МР затруднено их сложной структурой, не позволяющей выполнить экспериментальную оценку ИЭ в ТЕМ-камере, а также квазистатическим подходом с помощью модели, разработанной в [6], из-за присутствия нескольких опорных проводников. По этой же причине для анализа не подходят ПП из [24, 25, 46, 41]: в этих структурах несколько опорных проводников трассируются на двух сторонах ПП (см. рис. 12, 14, 18) или внутри слоя подложки (см. рис. 21).

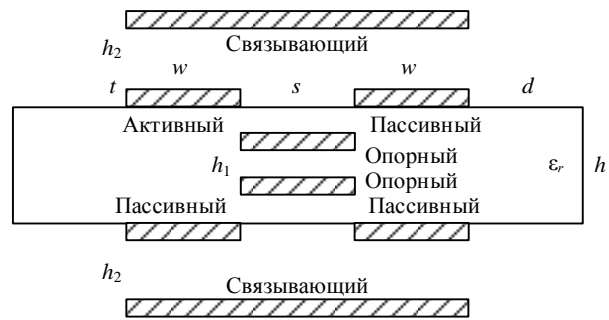


Рис. 21. Поперечное сечение структуры с удаленной компоновкой печатных проводников цепей с трехкратным МР [45]

Экспериментально оценить уровень ИЭ в ТЕМ-камере от ГПК [9, 10, 15] затруднительно из-за их гибкости и нарушения однородности поля в камере, возникающей вследствие отсутствия связи схемной земли покрытого ГПК с землей камеры. Более того, в них присутствует несколько опорных проводников (см. рис. 3–5, 8). По тем же причинам кабель из работы [32] не подходит для измерения ИЭ в ТЕМ-камере (см. рис. 16).

Структуры из работ [13, 20, 21, 35] не подходят для планируемого исследования, так как имеют бесконечную плоскость земли (см. рис. 7, 11, 17). Более того, они уже исследованы в части ИЭ: как моделированием, так и экспериментально.

ПП из [12, 18] также имеют бесконечную землю, при этом в ПП из [18] (см. рис. 10) сигнальные проводники расположены внутри слоя диэлектрической подложки, что усложняет оценку ИЭ от них экспериментально в ТЕМ-камере и моделированием квазистатическим подходом (см. рис. 6). ПП из [45] (см. рис. 20) также не подходит для рассматриваемого исследования как экспериментально, так и моделированием.

В результате для исследований в части ИЭ подходят только следующие структуры: ПП с однократным МР, рассмотренная в работе [8] (см. рис. 2), ПП с однократным МР, предложенная в новом способе [43] (см. рис. 19), ПП с трехкратным МР, рассмотренная в работе [25] (см. рис. 13). Для этих структур ранее не проводилось исследований ИЭ квазистатическим подходом и экспериментально.

Заключение

В работе выполнен обзор исследований и достижений в области МР с 2021 г. до настоящего времени. Он выявил ряд новых тенденций.

– В табл. 1 и 2 сведены разные аспекты МР, которые почти не рассматривались ранее или в совокупности.

– Исследования дифференциального и синфазного режимов.

– Расширение исследований кабелей с МР, поскольку они имеют большие ресурсы для МР в части длины и числа проводников.

– Исследования структур для МР, в которых оно ранее считалось неэффективным.

– МР в структурах кабель–плата.

– Первые виртуальные испытания устройств с МР.

– Использование различных диэлектрических материалов, в том числе магнитоэлектриков с потерями.

– Асимметрия поперечного сечения, позволяющая улучшить характеристики МР.

– Анализ ИЭ.

– Оценка угроз резервным цепям.

– Широкое использование вычисления временного отклика на любое воздействие по измеренным S -параметрам структуры с МР.

– Исследование оптимального порядка последующих переключений на остающиеся резервные цепи при многократном МР.

– Анализ структур с различными опорными проводниками.

– Новые способы МР (со связывающими проводниками), повышающие стойкость к механическим воздействиям за счет удаленной трассировки резервных проводников.

Обзор обращает особое внимание на следующие факты.

– Много работ направлено на исследование временных характеристик различных структур при распространении в них СКИ.

– Исследования характеристик до и после отказов элементов цепи с МР показали эффективность его применения даже после выхода системы из строя и при различных условиях окружающей среды.

– Оптимизированы параметры ПП с МР с ранее предложенными способами трассировки для достижения наилучших временных характеристик.

– Также исследована эффективность применения МР совместно с другими защитными системами для повышения эффективности и надежности защиты ИС.

– Результаты исследований применимы в проектировании бортовой аппаратуры.

Между тем в результате выполненного обзора и анализа рассмотренных работ можно сделать следующие выводы.

– Тема ИЭ от структур с многократным МР недостаточно изучена, несмотря на проведенные исследования в ТЕМ-камерах, разработанные подходы и зарегистрированные программы для ЭВМ.

– Различные типы ПП широко исследованы в части кондуктивной эмиссии, в то время как в части ИЭ рассмотрены только классические структуры с плоскостью земли.

– Выбраны оптимальные структуры с конечной схемной землей для дальнейшего исследования уровня ИЭ от них и последующего изготовления реальных макетов этих структур для проведения измерений.

Исследование МР имеет высокую актуальность, а также большой потенциал. Это подтверждается двумя поддержанными и успешно выполненными проектами РФ (каждый по 3 года с продолжением по 2 года), а также рядом ведущихся сейчас проектов по малым грантам РФ. Кроме того, множество новых решений свидетельствует о том, что проблема далека от окончательного решения, но есть исследователи, продолжающие её решать.

Исследование выполнено в ТУСУРе за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00579, <https://rscf.ru/project/24-29-00579/>.

Литература

1. Шарафутдинов В.Р. Способы резервирования элементов радиотехнических устройств на основе модальной фильтрации: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2019. – 153 с.

2. Gazizov T.R. New approach to EMC protection / T.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky // The 18th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility. – Munich, Germany, 2007. – P. 273–276. DOI: 10.1109/EMCZUR.2007.4388248.

3. Заболоцкий А.М. Модальные фильтры для защиты бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата: монография / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов. – Томск: Изд-во ТУСУРа, 2013. – 151 с.

4. Алхадж Хасан А. Обзор исследований по модальному резервированию / А. Алхадж Хасан, Т.Р. Газизов // Доклады ТУСУР. – 2022. – Т. 25, № 4. – С. 54–67.

5. Alhaj Hasan A. Ensuring the Reliability and EMC by Modal Reservation: A Brief History and Recent Advances / A. Alhaj Hasan, T.R. Gazizov // Symmetry. – 2022. – Vol. 14. – P. 2466. DOI: 10.3390/sym14112466.

6. Zima Y. Improved Estimation of the Radiated Emission from Structures with Multiple Modal Reservation / Y. Zima, A.F. Alhaj Hasan // 2024 IEEE 25th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – 2024. – P. 780–783. DOI: 10.1109/EDM61683.2024.10615032.

7. Medvedev A.V. Experimental study of a structure with single modal reservation before and after failure / A.V. Medvedev, Y.S. Zhechev, T.R. Gazizov // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2022. – Vol. 64, No. 4. – P. 1171–1181.

8. Lakoza A.M. The Efficiency of Conductor Placement in Circuits with Single Modal Redundancy in Differential and Common Modes / A.M. Lakoza, V.P. Kosteletsky // 2023 IEEE 24th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – 2023. – P. 1210–1214. DOI: 10.1109/EDM58354.2023.10225177.

9. Samoylichenko M.A. Influence of Failures in Flexible Printed Cables with Single Modal Reservation on the Attenuation of an Ultra-Short Pulse / M.A. Samoylichenko, T.R. Gazizov // 2023 IEEE 24th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices

(EDM). – 2023. – P. 520–524. DOI: 10.1109/EDM58354.2023.10225220.

10. Samoylichenko M.A. Single Modal Reservation of Flexible Printed Cables / M.A. Samoylichenko, T.R. Gazizov // 2023 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – 2023. – P. 317–322. DOI: 10.1109/ICIEAM57311.2023.10138969.

11. Пат. 2 603 843 РФ, МПК Н 04 В 15/02. Способ резервирования для печатных плат / Т.Р. Газизов, П.Е. Орлов, В.Р. Шарафутдинов и др. – № 2015137547/07; заявл. 02.09.15; опубл. 10.12.2016, Бюл. № 34. – 8 с.

12. Морозов С.Р. Характеристики структуры с проводниками на внешнем слое печатной платы с модальным резервированием / С.Р. Морозов, А.В. Медведев // Научная сессия ТУСУР–2023: сборник избр. статей междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 17–19 мая 2023 г. – Томск: В-Спектр (ИП В.М. Бочкарева); ТУСУР, 2023. – Ч. 2. – С. 48–51.

13. Алхадж Хасан А. Сравнение измеренных частотных характеристик печатных плат с модальным резервированием до и после отказа при разных температурах / А. Алхадж Хасан, Т.Р. Газизов // Изв. высш. учеб. завед. России. Радиоэлектроника. – 2023. – Т. 26, № 2. – С. 37–51.

14. Zhecheva A.V. Simulating Integrated Circuit Immunity to Powerful Conducted Emissions in Circuits with Single Modal Reservation / A.V. Zhecheva, Y.S. Zhechev // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). – 2021. – №. 4. – P. 122–126.

15. Medvedev A.V. Studying the Propagation of an Ultrashort Pulse in a Cable Attached to a PCB System with Modal Reservation // 2021 IEEE 22th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – 2021. – P. 167–170. DOI: 10.1109/EDM52169.2021.9507706.

16. Алхадж Хасан А. Виртуальные испытания структуры с модальным резервированием в системе TALGAT // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-28–2022): докл. 28-й Междунар. науч.-практ. конф., Томск, 16 ноября 2022 г. – Томск: ТУСУР, 2022. – С. 102–107.

17. Алхадж Хасан А. Квазистатическое моделирование мини-ТЕМ-камеры в системе TALGAT для испытания структур с модальным резервированием до частоты 5 ГГц // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-28–2022): докл. 28-й Междунар. науч.-практ. конф., Томск, 16 ноября 2022 г. – Томск: ТУСУР, 2022. – С. 96–101.

18. Морозов С.Р. Квазистатический анализ и оптимизация многослойной печатной платы с модальным резервированием и двусторонней трассировкой / С.Р. Морозов, А.В. Медведев // Системы управления, связи и безопасности. – 2023. – № 3. – С. 91–106. DOI: 10.24412/2410-9916-2023-3-91-106.

19. Gazizov R.R. The Models for Evaluation of Environment Impact for the Circuit Board with Modal Reservation Using N-norms / R.R. Gazizov, T.R. Gazizov // 2022 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT) – 2022. – P. 119–121.

20. Мурманский М.С. Применение магнитодиэлектрического покрытия в структуре с двукратным модальным резервированием / М.С. Мурманский, Е.С. Жечев // Научная сессия ТУСУР–2022: сборник избр. статей междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 18–20 мая 2022 г. – Томск: В-Спектр, 2022. – Ч. 1. – С. 227–230.

21. Morozov S.R. Simulating an asymmetric structure with double modal reservation / S.R. Morozov, A.V. Medvedev // 2023 IEEE XVI International scientific and technical conference actual problems of electronic instrument engineering (APEIE) – 2023. – P. 610–613.

22. Alhaj Hasan A. Radiated emissions from PCBs with double MR before and after failure / A. Alhaj Hasan, V.A. Semenyuk, T.R. Gazizov // 2023 Russian workshop on power engineering and automation of metallurgy industry: research & practice (PEAMI). – 2023. – P. 49–53.

23. Alhaj Hasan A. Understanding the effectiveness of double modal reservation in PCB manufacturing: experimental study on radiated emissions / A. Alhaj Hasan, V.A. Semenyuk, T.R. Gazizov // 2023 Russian workshop on power engineering and automation of metallurgy industry: research & practice (PEAMI). – 2023. – P. 44–48.

24. Samoylichenko M.A. Application of a Mirror-Symmetric Modal Filter on a Double-Sided Printed Circuit Board for Multiple Modal Reservation / M.A. Samoylichenko, A.V. Zhecheva // 2023 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). – 2023. – P. 359–363.

25. Chernikova E.B. Multivariate analysis of multiconductor transmission lines for triple modal reservation / E.B. Chernikova, A. Belousov, A. Zabolotsky // 22st International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices EDM. – 2021. – P. 158–162.

26. 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). – 2022. – P. 80–85.

27. Медведев А.В. Анализ защитных характеристик структуры двуслойной печатной платы из различных материалов с трехкратным модальным резервированием / А.В. Медведев, С.Р. Морозов // 28-я Междунар. науч.-практ. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. СИБРЕСУРС-28–2022». – Томск: ТУСУР, 2022. – С. 126–134.

28. Медведев А.В. Моделирование и экспериментальное исследование четырехпроводной полосковой структуры с трехкратным модальным резервированием при отказах её элементов // Доклады ТУСУР. – 2023. – Т. 26, № 1. – С. 48–55.

29. Лакоза А.М. Разработка печатной платы с трехкратным модальным резервированием с исполнением опорного проводника в виде боковых полигонов / А.М. Лакоза, А.В. Медведев // Сборник избр. статей междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2022»: в 3 ч. – Ч. 1. – Томск: В-Спектр, 2022. – С. 224–227.

30. Медведев А.В. Алгоритм анализа структур с трехкратным модальным резервированием после отказов / А.В. Медведев, Т.Р. Газизов // Матер. X Всерос. науч.-техн. конф.: Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем. МЭС–2021, Москва. – 2021. – С. 59–66.

31. Medvedev A.V. Studying the circuit switching order after failures for a shielded structure with triple modal reservation / A.V. Medvedev, T.R. Gazizov // 2021 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT). – 2021. – P. 0427–0430.

32. 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. – 2023. – No. 65(1). – P. 360–363.

33. Медведев А.В. Моделирование, оценка и выбор оптимального порядка переключения цепей с трехкратным модальным резервированием после отказов вдоль проводников // Системы управления, связи и безопасности. – 2023. – № 2. – С. 175–203.

34. Chernikova E.B. Quasi-static analysis of shielded multiconductor transmission lines for triple modal reservation /

E.B. Chernikova, A.O. Belousov // 2021 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBERIT). – 2021. – P. 0259–0263.

35. Alhaj Hasan A. Experimental study on after failure radiated emissions of triple modal reservation circuits / A. Alhaj Hasan, V.A. Semenyuk, T.R. Gazizov // 2023 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – 2023. – P. 837–842.

36. Alhaj Hasan A. Exploring the impact of triple modal reservation on radiated emissions: experimental insights for PCB manufacturing / A. Alhaj Hasan, V.A. Semenyuk, T.R. Gazizov // Матер. VII Междунар. научной конф. «Информационные технологии и технические средства управления» (ICST–2023), 2–6 октября 2023 г., Астрахань. – 2023. – С. 173–176.

37. Св-во о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021663568. Программа для оценки излучаемой эмиссии структуры с модальным резервированием / А. Алхадж Хасан, А.А. Квасников, Т.Р. Газизов. – Заявка № 2021662273. Дата поступ.: 6 августа 2021 г. Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 18 августа 2021 г.

38. Св-во о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021663457. Программа для оценки излучаемой эмиссии от одного и двух связанных проводов над плоскостью земли с диэлектриком и без него / А. Алхадж Хасан, Т.Р. Газизов. – Заявка № 2021662294. Дата поступ.: 6 августа 2021 г. Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 17 августа 2021 г.

39. Св-во о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022683074. Оценка излучаемых эмиссий от печатной платы с модальным резервированием путём виртуальных испытаний в мини-ТЕМ-камере / А. Алхадж Хасан, А.А. Квасников, Т.Р. Газизов. – Заявка № 2022681828. Дата поступ.: 18 ноября 2022 г. Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 30 ноября 2022 г.

40. Св-во о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021680554. Анализ четырехслойной зеркально-симметричной полосковой структуры с трехкратным модальным резервированием / Е.С. Жечев, С.В. Власов, А.М. Заболоцкий. – Заявка № 2021669877. Дата поступ.: 08 декабря 2021 г. Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 13 декабря 2021 г.

41. Пат. 2 784 710 РФ, МПК Н 04 В 15/02. Способ трассировки двухсторонней печатной платы с модальным резервированием и уменьшенным количеством проводников / М.А. Самойличенко, Т.Р. Газизов. – № 2 022 122 228; заявл. 16.08.22; опубл. 29.11.2022, Бюл. № 34. – 8 с.

42. Пат. 2 794 739 РФ, МПК Н 04 В 15/00. Способ симметричной трассировки сигнальных и опорных проводников цепей с модальным резервированием / А. Алхадж Хасан, Т.Р. Газизов. – № 2 022 130 296; заявл. 23.11.2022; опубл. 24.04.2023, Бюл. № 12. – 6 с.

43. 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; заявл. 16.07.2015; опубл. 10.12.2016, Бюл. № 34. – 7 с.

44. Пат. 2 801 688 РФ, МПК Н 04 В 15/02. Способ удаленной трассировки печатных проводников цепей с однократным модальным резервированием / Т.Р. Газизов, И.А. Иванцов. – № 2 022 131 709; заявл. 16.12.2022; опубл. 14.08.2023, Бюл. № 23. – 8 с.

45. Пат. 2 801 830 РФ, МПК Н 04 В 15/02. Способ удаленной компоновки печатных проводников цепей с трехкратным модальным резервированием / Т.Р. Газизов, И.А. Иванцов. – № 2 022 132 011; заявл. 08.12.2022; опубл. 16.08.2023, Бюл. № 23. – 8 с.

46. Пат. 2 751 672 РФ, МПК Н 04 В 15/02. Способ компоновки печатных проводников для цепей с модальным резервированием / Е.С. Жечев, А.О. Белоусов, Т.Р. Газизов и др. – № 2 020 126 549; заявл. 10.08.2020; опубл. 15.07.2021, Бюл. № 20. – 9 с.

Зима Елизавета

Студентка, инженер каф. телевидения и управления (ТУ) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-913-884-63-10
Эл. почта: zima_liza_1503@mail.ru

Газизов Рустам Рифатович

Мл. н.с. каф. ТУ ТУСУРа
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0002-7717-4215
Тел.: +7-952-802-23-10
Эл. почта: rustam.r.gazizov@tusur.ru

Zima Y., Gazizov R.R.

Modal reservation: state of the art

Modal reservation (MR) is one of the most effective ways to ensure electromagnetic compatibility and reliability of radio electronic equipment. Previously, a detailed review on the history of MR development and research related to it up to 2021 was performed. To evaluate the degree of MR development, a review of recent studies, including patents and registered computer programs, up to the present is performed and importance of each study is highlighted. Based on the review, the structures fitting for studying the level of radiated emission from them experimentally in TEM-cells and using the quasi-static approach were identified. In conclusion, novelty of presented studies is summarized.

Keywords: electromagnetic compatibility, modal filtration, modal reservation, printed circuit board, flexible printed cable, conducted emission, radiated emission.

DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-3-55-69

References

1. Sharafutdinov V.R. *Sposoby rezervirovaniya elementov radiotekhnicheskikh ustroystv na osnove modal'noi fil'tratsii* [Methods of radio devices elements reservation based on modal filtering]. Dissertation for the Candidate of Sciences degree. Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 2019, 153 p. (in Russ.).

2. Gazizov T.R., Zabolotsky A.M. New approach to EMC protection. *The 18th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 2007, pp. 273–276. DOI: 10.1109/EMCZUR.2007.4388248.

3. Zabolotskii A.M., Gazizov T.R. *Modal'nye fil'try dlya zashchity bortovoi radioelektronnoi apparatury kosmicheskogo apparata* [Modal filters for protection of on-board radioelectric equipment of a spacecraft]. TUSUR Publishing office, 2013, 151 p.

4. Alhaj Hasan A., Gazizov T.R. [A review of studies on modal reservation]. *Proceedings of TUSUR University*, 2022, vol. 25, no. 4, pp. 54–67 (in Russ.).

5. Alhaj Hasan A., Gazizov T.R. Ensuring the Reliability and EMC by Modal Reservation: A Brief History and Recent

Advances. *Symmetry*, 2022, vol. 14, p 2466. DOI:10.3390/sym14112466.

6. Zima Y., Alhaj Hasan A.F. Improved Estimation of the Radiated Emission from Structures with Multiple Modal Reservation. *2024 IEEE 25th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*, 2024, pp. 780–783. DOI: 10.1109/EDM61683.2024.10615032.

7. Medvedev A.V., Zhechev Y.S., Gazizov T.R. Experimental study of a structure with single modal reservation before and after failure. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2022, vol. 64, no. 4, pp. 1171–1181.

8. Lakoza A.M., Kosteletsky V.P. The Efficiency of Conductor Placement in Circuits with Single Modal Redundancy in Differential and Common Modes. *2023 IEEE 24th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*, 2023, pp. 1210–1214. DOI: 10.1109/EDM58354.2023.10225177.

9. Samoylichenko M.A., Gazizov T.R. Influence of Failures in Flexible Printed Cables with Single Modal Reservation on the Attenuation of an Ultra-Short Pulse. *2023 IEEE 24th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*, 2023, pp. 520–524. DOI: 10.1109/EDM58354.2023.10225220.

10. Samoylichenko M.A., Gazizov T.R. Single Modal Reservation of Flexible Printed Cables. *2023 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, 2023, pp. 317–322. DOI: 10.1109/ICIEAM57311.2023.10138969.

11. Gazizov T.R., Orlov P.E., Sharafutdinov V.R., Kuznetsova-Tadzhibaeva O.L., Zabolotskiy A.M., Kuksenko S.P., Buichkin E.N. *Sposob rezervirovaniya dlya pechatnykh plat* [Reservation method for printed circuit boards]. Patent RF, no. 2603843, 2016 (in Russ.).

12. Morozov S.R., Medvedev A.V. *Harakteristiki struktury s provodnikami na vneshnem sloe pechatnoy platy s modal'nym rezervirovaniem* [Characteristics of the structure with conductors on the outer layer of the PCB with modal reservation]. *Nauchnaya sessiya TUSUR-2023: sbornik izbr. statej Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [TUSUR Scientific Session: Proceedings of the International scientific conference for Bachelor, Master and Postgraduate students], 2023, vol. 2, pp. 48–51.

13. Alhaj Hasan A., Gazizov T.R. [Comparing the Measured Frequency Characteristics of PCBs with Modal Reservation Before and After Failure at Different Temperatures]. *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2023; vol. 26, no. 2, pp. 37–51 (in Russ.).

14. Zhecheva A.V., Zhechev Y.S. Simulating Integrated Circuit Immunity to Powerful Conducted Emissions in Circuits with Single Modal Reservation. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanojelektronnykh sistem (MJeS)* [Problems of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems Development (MES)], 2021, no. 4, pp. 122–126.

15. Medvedev A.V. Studying the Propagation of an Ultra-short Pulse in a Cable Attached to a PCB System with Modal Reservation. *2021 IEEE 22th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*, 2021, pp. 167–170. DOI: 10.1109/EDM52169.2021.9507706.

16. Alhaj Hasan A. [Virtual experiment of a structure with modal reservations in the TALGAT system]. *Natural and Intellectual Resources of Siberia: Proceedings of the 28th International Scientific and Practical Conference*, 2022, pp. 102–107.

17. Alhaj Hasan A. [Quasi-static simulation of a mini-TEM cell in the TALGAT system for testing structures with modal reservation up to a frequency of 5 GHz]. *Natural and*

Intellectual Resources of Siberia: Proceedings of the 28th International Scientific and Practical Conference, 2022, pp. 96–101.

18. Morozov S.R., Medvedev A.V. [Quasi-static analysis and optimization of a multilayer PCB with modal reservation and a two-sided routing]. *Systems of Control, Communication and Security*, 2023, no. 3, pp. 91–106. DOI: 10.24412/2410-9916-2023-3-91-106.

19. Gazizov R.R., Gazizov T.R. The Models for Evaluation of Environment Impact for the Circuit Board with Modal Reservation Using N-norms. *2022 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT)*, 2022, pp. 119–121.

20. Murmanskii M.S. *Primenenie magnitodielektricheskogo pokrytiya v strukture s dvukratnym modal'nym rezervirovaniem* [Application of magnetodielectric coating in a structure with double modal redundancy]. *Nauchnaya sessiya TUSUR-2023: sbornik izbr. statej Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [TUSUR Scientific Session: Proceedings of the International scientific conference for Bachelor, Master and Postgraduate students], 2022, vol. 1, pp. 227–230.

21. Morozov S.R., Medvedev A.V. Simulating an asymmetric structure with double modal reservation. *2023 IEEE XVI International Scientific and Technical Conference Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE)*, 2023, pp. 610–613.

22. Alhaj Hasan A., Semenyuk V.A., Gazizov T.R. Radiated emissions from PCBs with double MR before and after failure. *2023 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI)*, 2023, pp. 49–53.

23. Alhaj Hasan A., Semenyuk V.A., Gazizov T.R. Understanding the effectiveness of double modal reservation in PCB manufacturing: experimental study on radiated emissions. *2023 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: research & Practice (PEAMI)*, 2023, pp. 44–48.

24. Samoylichenko M.A., Zhecheva A.V. Application of a Mirror-Symmetric Modal Filter on a Double-Sided Printed Circuit Board for Multiple Modal Reservation. *2023 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*, 2023, pp. 359–363.

25. Chernikova E.B., Belousov A., Zabolotskiy A. Multivariate analysis of multiconductor transmission lines for triple modal reservation. *22st International Conference of Young Specialists on Micro/nanotechnologies and Electron Devices EDM*, 2021, pp. 158–162.

26. 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 (Ural-Con)*, 2022, pp. 80–85.

27. Medvedev A.V. [Analysis of the protective characteristics of the structure of a two-layer printed circuit board made of various materials with three-fold modal reservation]. *Natural and Intellectual Resources of Siberia: Proceedings of the 28th International Scientific and Practical Conference*, 2022, pp. 126–134.

28. Medvedev A.V. [Experimental evaluation of decomposition pulse voltage in a double-sided PCB with triple modal reservation after failures]. *Proceedings of TUSUR University*, 2022, vol. 26, no. 1, pp. 48–55 (in Russ.).

29. Lakoza A.M., Medvedev A.V. *Razrabotka pechatnoy platy s trekhkratnym modal'nym rezervirovaniem s ispolneniem opornogo provodnika v vide bokovykh poligonov* [Designing a printed circuit board with triple modal reservation with side polygons as reference conductor] *Nauchnaya sessiya TUSUR-*

2023: *sbornik izbr. statej Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. studentov, aspirantov i molodyh uchenykh* [TUSUR Scientific Session: Proceedings of the International scientific conference for Bachelor, Master and Postgraduate students], 2022, vol. 1, pp. 224–227.

30. Medvedev A.V., Gazizov T.R. [Algorithm for analysis of structures with triple modal reservation after failures]. *All-Russia Science&Technology Conference Problems of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems Development*, 2021, pp. 59–66.

31. Medvedev A.V., Gazizov T.R. Studying the circuit switching order after failures for a shielded structure with triple modal reservation. *2021 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT)*, 2021, pp. 0427–0430.

32. 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*, 2023, no. 65(1), pp. 360–363.

33. Medvedev A.V. [Simulating, evaluating, and selecting the optimum switching order for circuits with triple modal reservation after failures along the conductors]. *Systems of Control, Communication and Security*, 2023, no. 2, pp. 175–203.

34. Chernikova E.B., Belousov A.O. Quasi-static analysis of shielded multiconductor transmission lines for triple modal reservation. *2021 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT)*, 2021, pp. 0259–0263.

35. Alhaj Hasan A., Semenyuk V.A., Gazizov T.R. Experimental study on after failure radiated emissions of triple modal reservation circuits. *2023 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*, 2023, pp. 837–842.

36. Alhaj Hasan A., Semenyuk V.A., Gazizov T.R. Exploring the impact of triple modal reservation on radiated emissions: experimental insights for PCB manufacturing. *2023 7th International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT-2023)*, 2023, pp. 173–176.

37. Alhaj Hasan A., Kvasnikov A.A., Gazizov T.R. *Programma dlya otsenki izluchaemoy emissii struktury s modal'nykh rezervirovaniem* [Program for estimating the radiated emission from a structure with modal reservation]. Certificate of state registration of computer program RF, no 2021663568, 2021 (in Russ.).

38. Alhaj Hasan A., Gazizov T.R. *Programma dlya otsenki izluchaemoy emissii ot odnogo i dvukh svyazannykh provodov nad ploskost'yu zemli s dielektrikom i bez nego* [Program for estimating the radiated emission from one and two bounded conductors above the ground plane with and without dielectrics]. Certificate of state registration of computer program RF, no 2021663457, 2021 (in Russ.).

39. Alhaj Hasan A., Kvasnikov A.A., Gazizov T.R. *Otsenka izluchaemykh emissii ot pechatnoi platy s modal'nykh rezervirovaniem putem virtual'nykh ispytaniy v mini-TEM-kamere* [Estimation of radiated emissions from a PCB with modal reservation by virtual testing in a mini-TEM cell]. Certificate of state registration of computer program RF, no 2022683074, 2022 (in Russ.).

40. Zhechev E.S., Vlasov S.V., Zabolotskii A.M. *Analiz chetyrekhslonnoi zerkal'no-simmetrichnoi poloskovoi struktury s trekhkratnykh modal'nykh rezervirovaniem* [Analysis of a four-layer mirror-symmetric strip structure with triple modal reservation]. Certificate of state registration of computer program RF, no 2021680554, 2021 (in Russ.).

41. Samoilenko M.A., Gazizov T.R. *Sposob trassirovki dvukhstoronnei pechatnoi platy s modal'nykh rezervirovaniem i umen'shenykh kolichestvom provodnikov* [Method for routing a double-sided pcb with modal reservation and a reduced number of conductors]. Patent RF, no. 2784710, 2022 (in Russ.).

42. Alhaj Hasan A., Gazizov T.R. *Sposob simmetrichnoi trassirovki signal'nykh i opornykh provodnikov tsepei s modal'nykh rezervirovaniem* [Method of symmetric routing of signal and reference conductors of circuits with modal reservation]. Patent RF, no. 2794739, 2023 (in Russ.).

43. Gazizov T.R., Orlov P.E., Sharafutdinov V.R., Kuznetsova-Tadzhibaeva O.L., Zabolotskij A.M., Kuksenko S.P., Buichkin E.N. *Sposob trassirovki pechatnykh provodnikov tsepei s rezervirovaniem* [Method of routing printed conductors of circuits with redundancy]. Patent RF, no. 2603850, 2016 (in Russ.).

44. Gazizov T.R., Ivantsov I.A. *Sposob udalennoi trassirovki pechatnykh provodnikov tsepei s odнократnykh modal'nykh rezervirovaniem* [Method for remote tracing of printed circuit conductors with single modal redundancy]. Patent RF, no. 2801688, 2023 (in Russ.).

45. Gazizov T.R., Ivantsov I.A. *Sposob udalennoi komponovki pechatnykh provodnikov tsepei s trekhkratnykh modal'nykh rezervirovaniem* [Method for remote layout of printed conductors of circuits with three-time modal reservation]. Patent RF, no. 2801830, 2023 (in Russ.).

46. Zhechev E.S., Belousov A.O., Gazizov T.R., Zabolotskii A.M., Chernikova E.B. *Sposob komponovki pechatnykh provodnikov dlya tsepei s modal'nykh rezervirovaniem* [Method for arranging printed conductors for circuits with modal redundancy]. Patent RF, no. 2751672, 2021 (in Russ.).

Yelizaveta Zima

Student, Engineer of the Television and Control Department, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-913-884-63-10
Email: zima_liza_1503@mail.ru

Rustam R. Gazizov

Junior Researcher, Department of the Television and Control, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0002-7717-4215
Phone: +7-952-802-23-10
Email: rustam.r.gazizov@tusur.ru