

УДК 621.391

А. Алхадж Хасан, Т.Р. Газизов

Обзор исследований по модальному резервированию

Усложнение радиоэлектронных устройств и рост их количества приводят к необходимости их защиты и повышению их надежности. Существует множество методов обеспечения этого, и они отличаются по возможностям, эффективности и легкости реализации. Среди этих методов модальное резервирование (МР) является одним из наиболее эффективных, надежных и несложных методов, применяемых в настоящее время. Использование метода при трассировке и монтаже печатных плат позволяет обеспечить как электромагнитную совместимость, так и надежность конечного электронного устройства. Проведены многочисленные исследования по изучению и развитию МР, включая 18 патентов на изобретения. Однако до сих пор нет полного и развернутого обзора публикаций по применению этого метода для проведения исследований на его основе. В данной статье представлен обзор истории и недавних исследований по МР для выявления возможности изготовления различных макетов структур с МР для экспериментальных исследований с целью оценки уровня излучаемых эмиссий в диапазоне частот, в том числе в условиях критических температур, при исследовании впервые обобщены основные достоинства МР.

Ключевые слова: резервирование, модальное резервирование, модальная фильтрация, электромагнитная совместимость, электромагнитные помехи, излучаемые эмиссии, линии передачи, печатная плата.

DOI: 10.21293/1818-0442-2022-25-4-54-67

Высоконадежная система требует от инженеров повышения надежности компонентов (например, изменения материала, используемого в производстве) или применения методов резервирования с использованием имеющихся ресурсов без нарушения ограничений по стоимости, массе и объему системы [1, 2]. Второй вариант предпочтительнее из-за своей простоты [3], а его первое упоминание относится к 1956 г. [4]. Резервирование, как правило, применяется в критически важных системах, где требуется непрерывная работа, а их обслуживание сложно и дорого, например в случае бортовых радиоэлектронных систем. В этом случае время работы спутников связи может длиться более 10 лет [5]. Системы или подсистемы могут быть зарезервированы в активном или неактивном режиме с более низкой вероятностью отказа, поскольку зарезервированные компоненты будут находиться в режиме ожидания до отказа [6].

Кроме того, эти типы можно комбинировать, и они также делятся на подтипы: параллельное и k -из- n -активное резервирование, а также холодное, горячее и теплое резервирование [7, 8]. Резервирование может быть использовано для повышения не только надежности, но и эффективности системы [9]. Более того, резервирование считается быстрым решением для достижения любого желаемого уровня надежности на ранней стадии проектирования [10]. Поскольку резервирование может осуществляться в различных формах, оптимизированную модель системы можно получить, достигнув баланса между стоимостью и надежностью системы.

Несколько работ посвящено разработке математических моделей для определения надежности системы [11–13] даже в приложениях реального времени [14]. Резервирование во всех его видах используется в различных сферах. Оно применяется в защите информации [15], мемристорных устройствах [16], а также в нейронных сетях [17]. Оно применя-

лось даже в нанотехнологиях, которые характеризуются высоким уровнем дефектов [18, 19]. Более того, оно также популярно в космических [20, 21] и авиационных [22] приложениях, а также в современных системах, касающихся беспилотных летательных аппаратов, например для защиты их канала передачи данных [23].

Резервирование также используется в коммуникационных приложениях [24]. Отказы печатных плат (ПП) могут привести к критическим проблемам, и они имеют различные причины, такие как старение, нагрев и загрязнение [25]. Чтобы бороться с этими отказами, обычно рекомендуется использовать резервирование при проектировании ПП. Его использованию в этих целях посвящены работы [26, 27].

Однако использование резервирования не всегда приносит пользу, например, если система не приспособлена для борьбы с искусственными или естественными электромагнитными помехами (ЭМП), которые также могут возникать из-за самого резервирования [28]. Таким образом, обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) при проектировании ПП, даже если конструкция включает резервирование, является неизбежным для борьбы с ЭМП [29, 30]. Некоторые исследователи пытались повысить надежность ПП с помощью резервирования с учетом ЭМП [31], но универсального способа для достижения этой цели нет [32, 33]. В целом можно сказать, что все традиционные способы устранения последствий ЭМП недостаточно эффективны, особенно против сверхкоротких импульсов (СКИ) [34].

Модальное резервирование (МР), которое рассматривается в данной работе, является методом, который может одновременно повысить надежность радиоэлектронных устройств с помощью холодного резервирования и обеспечить их ЭМС за счет использования модальной фильтрации [35]. Она применяется для защиты радиоэлектронных устройств

от СКИ и в бесконтактном методе обнаружения и диагностики электрических соединений, скрытых в стенах [36]. МР может использоваться в различных приложениях, наиболее важными из которых являются критические и бортовые радиоэлектронные устройства. Например, МР использовалось для повышения помехоустойчивости ПП блока цифровой обработки сигналов [37] и ПП системы питания [38] автономной системы навигации космического аппарата. МР имеет несколько типов: на основе кратности резервирования (однократное, двукратное, трехкратное) [39], на основе симметричности структуры (симметричная и асимметричная) [40] и на основе рассматриваемого объекта (плата или кабель) [41, 42]. Большинство из этих типов интенсивно исследовалось в части кондуктивных эмиссий. Чтобы полностью прояснить механизм этого метода и проанализировать его следствия, необходимо также изучить его характеристики в части излучаемых эмиссий (ИЭ). Это начали исследовать лишь в нескольких работах [43–46], но только на основе анализа результатов моделирования и без учета климатического воздействия.

Поэтому целесообразно и необходимо провести экспериментальное исследование для оценки ИЭ от структур с МР при учете климатических воздействий. Необходима проработка возможности изготовления различных макетов структур с одно-, двух- и трёхкратным МР для будущих экспериментальных исследований с целью оценки уровня ИЭ в диапазоне частот, в том числе в условиях критичных температур. Для этого будет рассмотрена история развития МР со сравнительной оценкой технологичности, применимости и эффективности использования конструкций на основе разных способов МР, что является целью данной работы.

В общем МР заключается в такой трассировке ПП, что резервируемый и резервирующий проводники ПП трассируются таким образом, что между ними достигнута сильная электромагнитная связь в неоднородной диэлектрической среде. Это позволяет использовать преимущество модальной фильтрации и применять модальное разложение для подавления кондуктивных СКИ, которые имеют сильную способность проникновения из-за их короткой длительности, высокой мощности и широкого спектра.

Для достижения модального разложения необходимо, чтобы длительность СКИ была меньше абсолютного значения разности задержек четной и нечетной мод в структуре со связанными проводниками. В результате этого СКИ разлагается на импульсы, амплитуды которых меньше, чем амплитуда исходного СКИ. По этой причине основная ПП будет защищена и ее ЭМС будет обеспечена. Более того, если резервируемая ПП испытает отказ, резервная ПП немедленно начнет работу, не влияя на функциональность устройства. Таким образом, повышается надежность устройства, определяемая кратностью резервирования и вероятностью отказа каждой резервной ПП.

История МР

Идея МР была впервые сформулирована в 2015 г., а первые работы по ней были опубликованы в 2016 г. Первый патент на способ трассировки проводников печатной схемы с резервированием получен в 2016 г. [47]. Этот способ, являющийся самым простым (рис. 1), позволил уменьшить амплитуду СКИ в два раза. В том же году в [48] предложен другой способ трассировки ПП. Амплитуды СКИ также уменьшаются в два раза, но отличие данного способа от предыдущего из [47] заключается в том, что значение относительной диэлектрической проницаемости (ϵ_r) диэлектрика, который заполняет зазор между резервным и резервируемым проводниками, больше, чем диэлектрика, из которого изготовлена подложка ПП (рис. 2).

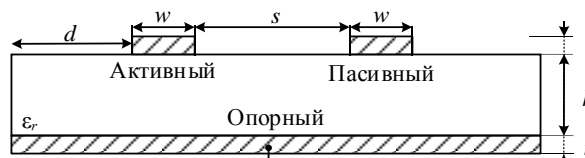


Рис. 1. Поперечное сечение структуры для способа трассировки печатных проводников схем с МР [47]



Рис. 2. Поперечное сечение структуры для способа трассировки печатных проводников с дополнительным диэлектриком для схем с МР [48]

Поскольку изменение ϵ_r может влиять на разницу между погонными задержками четной и нечетной мод сигнала, увеличение ϵ_r может быть использовано для увеличения этой разницы, тем самым повышая эффективность модальной фильтрации. В способе, предложенном в [49], резервный и резервируемый проводники располагаются друг под другом симметрично относительно подложки, а остальные электрически соединены друг с другом (рис. 3). Уменьшение амплитуды СКИ также осуществляется в два раза. Аналогичного результата можно достичь, используя способ, предложенный в [50], но уменьшив и массу ПП за счет отсутствия одного опорного проводника, однако без уменьшения уровня подавления СКИ (рис. 4).



Рис. 3. Поперечное сечение структуры для способа трассировки двухсторонней ПП с МР [49]

В [51] предложен другой способ, который отличается от способа из [47]. Каждые два проводника в структуре формируют виток меандровой линии, а вместе они образуют отрезок четырехпроводной

линии передачи (рис. 5). При этом уменьшение амплитуды СКИ может достигь 4 раз.

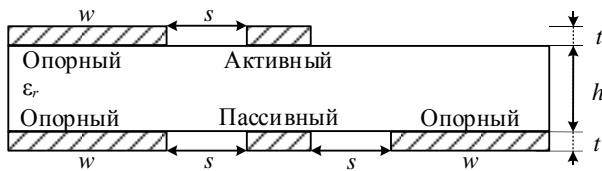


Рис. 4. Поперечное сечение структуры для способа трассировки двухсторонней ПП с МР без одного опорного проводника [50]

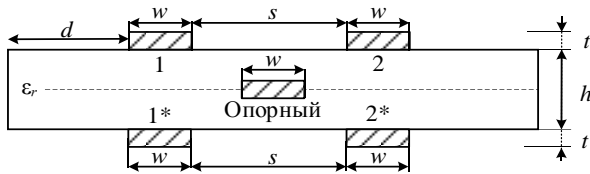


Рис. 5. Поперечное сечение структуры для способа однократного МР витков меандровой линии [51]

Одноименные проводники резервируемой и резервной цепей формируют связанную линию передачи с различными значениями погонных задержек. Проводники можно попарно соединить на одном конце на одном слое (проводники 1-2 и 1*-2* из рис. 5), на разных слоях (проводники 1-1* и 2-2* из рис. 5) или диагонально (проводники 1-2* и 2-1* из рис. 5). На основе использования различных диэлектрических материалов в [52, 53] предложены еще два способа МР. Улучшение в первом способе, относительно приведенных в [47–49], состоит в повышении надежности за счет увеличения кратности резервирования и помехоустойчивости за счет увеличения длительности СКИ, разлагаемого полностью (рис. 6, где любой проводник может быть активным). Второй способ гарантирует то же самое, но с возможностью трассировки печатных проводников на двух сигнальных слоях ПП: внешнем и внутреннем (рис. 7).



Рис. 6. Поперечное сечение структуры для способа трассировки печатных проводников с дополнительным диэлектриком для двукратного МР [52]



Рис. 7. Поперечное сечение структуры для способа трассировки печатных проводников на внешнем (а) и внутреннем (б) сигнальных слоях ПП с МР [53]

Способ, аналогичный описанным в [47, 51], предложен в [54]. В нём трассировка резервируемых и резервных проводников ПП выполняется попарно на каждом из основных двух слоев (рис. 8). При этом проводники имеют минимальный допустимый зазор между ними. Опорные проводники и проводники питания выполняются в виде отдельных слоев и располагаются между сигнальными слоями. При этом резервируются не только сигнальные проводники, но и проводники питания, которые выполнены с помощью зазоров в опорных проводниках и образуют связанные линии. Этот способ может уменьшить восприимчивость резервируемых проводников питания к внешним кондуктивным эмиссиям и снизить уровень кондуктивных эмиссий от них.

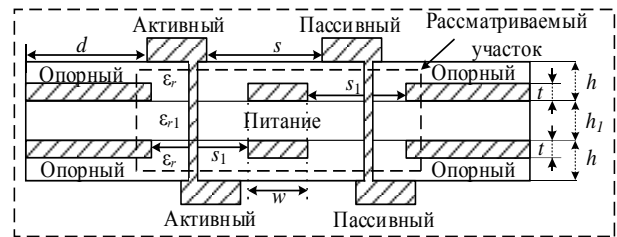


Рис. 8. Поперечное сечение структуры для способа трассировки печатных проводников питания цепей с МР [54]

Способ из [55] основан на взаимных расположении, компоновке и трассировке резервируемых и резервных ПП. Отличается он выполнением опорного проводника в виде отдельных слоев на резервируемой и резервной печатных платах, склеенных диэлектрическим слоем с ϵ_r большей, чем у подложек резервируемой и резервной ПП (рис. 9). ПП расположены параллельно и друг под другом, а их электронные компоненты размещены на противоположных сторонах этих ПП. Здесь амплитуда СКИ уменьшается в 2,5 раза.

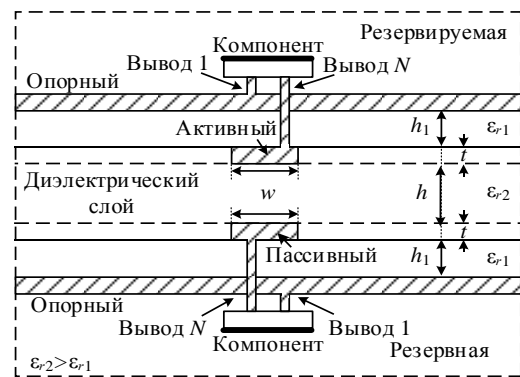


Рис. 9. Поперечное сечение структуры для метода компоновки неформованных радиоэлектронных компонентов на печатных платах для цепей с резервированием [55]

Недостаток состоит в разнице трассировки резервируемой и резервной ПП, что вызвано асимметричным расположением выводов электронных компонентов относительно диэлектрического слоя, который склеивает резервируемую и резервную платы таким образом, что одноименные выводы компонентов не находятся друг под другом. Вследствие этого

уменьшается длина отрезков электромагнитно связанных линий, формирующихся одноименными трассами резервируемой и резервной цепей, что снижает полезные связи между ними.

Способ из [56], в отличие от предыдущего из [55], использует формовку выводов резервируемых компонентов в одном направлении относительно корпуса компонента, а резервных – в противоположном, причем эти компоненты находятся друг под другом (рис. 10, 11). Это максимизирует длину связанных линий, приводя к дополнительному снижению кондуктивных эмиссий (к плате и от нее).

В [57] предложен другой способ. Его особенность заключается в расположении резервируемых и резервных компонентов на внутренней стороне ПП в слое склеивающего диэлектрика, а не на внешней (рис. 12). Уменьшение амплитуды СКИ с помощью этого способа достигает 2,25 раза.

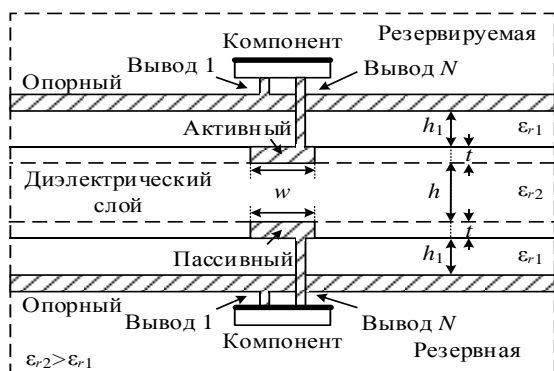
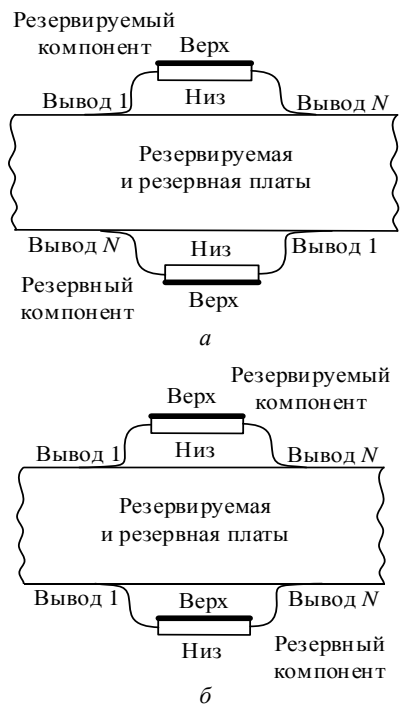


Рис. 11. Поперечное сечение структуры для способа компоновки неформованных радиоэлектронных компонентов на печатных платах с МР [56]

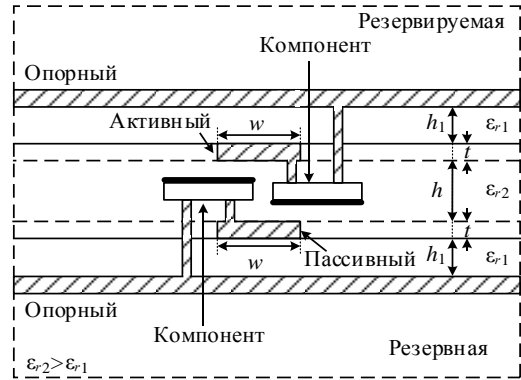


Рис. 12. Поперечное сечение структуры для способа внутренней компоновки печатных плат для цепей с МР [57]

В [58] предложен способ для резервирования плоских кабелей, где проводники резервируемого кабеля располагаются на одном уровне в диэлектрическом слое, а соответствующие одноименные резервные проводники – под ними на другом уровне (рис. 13). Эффективность использования этих способов в приложениях связи и управления оценена в [59, 60].

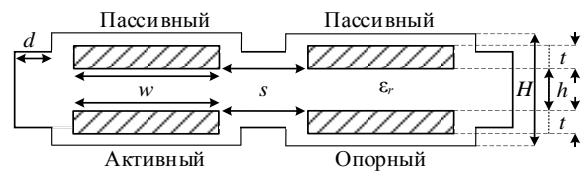


Рис. 13. Поперечное сечение структуры для способа МР плоских кабелей [58]

Для трехкратного МР первый способ представлен в [61]. Его отличие от способа из [55] состоит в добавлении двух резервных цепей для увеличения кратности резервирования (рис. 14). На одной ПП располагаются резервируемая и одна резервная цепи, а на второй – остальные две. С помощью этого способа амплитуда СКИ может быть уменьшена в 4 раза.

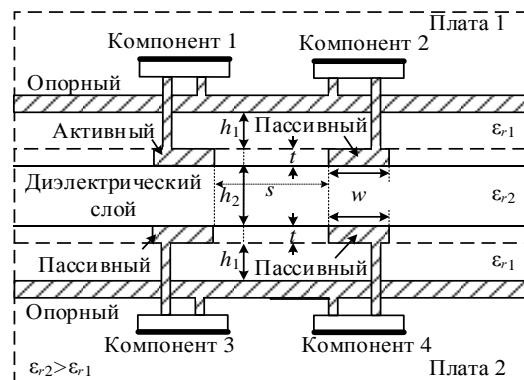


Рис. 14. Поперечное сечение структуры для способа трёхкратного МР в многослойных печатных платах [61]

В [62] предложен другой способ трехкратного МР цепи. Его отличие от способа из [49] заключается в том, что сигнальные проводники разделяются на два одинаковых проводника с минимальным зазором между ними (рис. 15). Также проведены срав-

нительные исследования по использованию этих способов.



Рис. 15. Поперечное сечение структуры для способа трехкратного МР проводников печатной платы [62]

Например, в [63] авторы доказали, что с помощью способа МР из [49] можно увеличить коэффициент ослабления помехового сигнала до 12 дБ. Они также сравнили результаты, полученные с помощью этого способа и способов из [47, 55]. Применив МР в блоке цифровой обработки сигналов автономной навигационной системы космического аппарата, авторы улучшили его помехоустойчивость.

В отличие от [47, 57], в [64] предложен другой способ МР, обеспечивающий взаимные расположение, компоновку и трассировку резервируемой и резервной плат с землей в виде отдельных двух печатных проводников в диэлектрическом слое, склеивающем эти платы (рис. 16). Это облегчает изготовление ПП и монтаж ее компонентов и снижает восприимчивость резервируемой цепи к внешним кондуктивным эмиссиям.

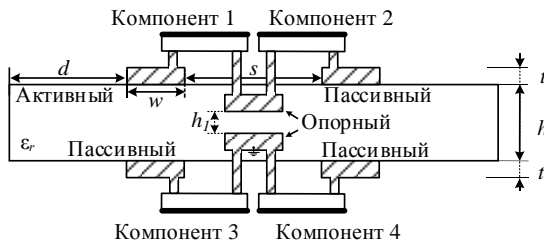


Рис. 16. Поперечное сечение структуры для способа компоновки печатных проводников с трёхкратным МР [64]

Кроме того, в [65] предложен другой способ МР. Он отличается от [55] тем, что в нем предлагается использовать дополнительные сигнальные слои таким образом, чтобы резервные и резервируемые проводники одних и тех же цепей трассировались на внешних и внутренних сигнальных слоях ППП, соединенных отверстиями (рис. 17). Земля выполнена в виде отдельных слоев, при этом резервируемая и резервная ППП изготовлены из двух диэлектрических слоев.

Поскольку одной из главных особенностей МР является надежность, необходимо изучить эффективность МР и после отказов. Поэтому в [66] исследована устойчивость к воздействию СКИ для ППП с однократным и трехкратным МР после отказов в виде короткого замыкания и холостого хода. Проведенный анализ показал, что при однократном МР ослабление после отказа уменьшилось с 2,3 до 1,7 раза. Для трехкратного МР выявлено, что после отказа предпочтительнее переключиться на цепь, электромагнитная связь которой с резервируемой цепью меньше. Это объясняется тем, что отклонение ам-

плитуд разложенных импульсов в случае отказа на конце одного из резервных проводников от амплитуд до отказа минимально. Эти и другие результаты были обсуждены и подтверждены для однократного МР в [67] не только во временной, но и в частотной области до 2 ГГц в [68], а также до 18 ГГц с использованием квазистатического и электродинамического анализа для сравнения с результатами, полученными экспериментально в [69].

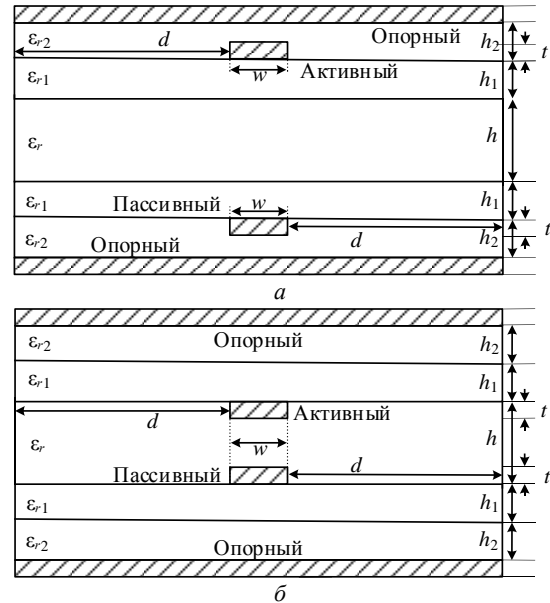


Рис. 17. Поперечное сечение структуры для способа компоновки многослойной печатной платы с МР внутренних (а) и внешних (б) сигнальных слоев [65]

Порядок переключения после отказов для двухкратного МР обсуждался в [70]. Подробно исследовался порядок переключения после отказа для трехкратного МР во временной [71] и частотной [72] областях. На основе этих исследований получены два патента на способы переключения после отказа для двухкратного [73] (рис. 18) и трехкратного [74] (рис. 19) МР.



Рис. 18. Поперечное сечение структуры для способа переключения цепей с двукратным МР после отказов [73]

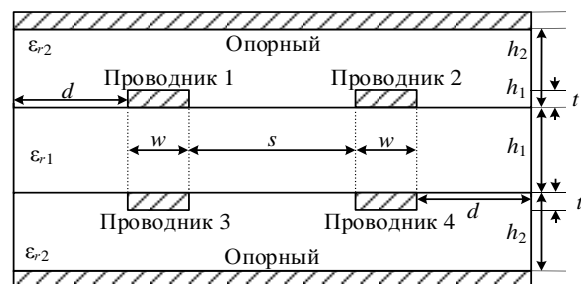


Рис. 19. Поперечное сечение структуры для способа переключения цепей с трехкратным МР после отказов [74]

Более того, исследование показало, что вероятность отказа резервной трассы при использовании МР ниже, чем у резервируемой. Это было доказано в [75, 76] для однократного и в [77] для трехкратного МР с помощью пяти N -норм [34], которые используются для оценки опасности воздействия СКИ на радиоэлектронные устройства.

Измерительное оборудование

Соответствующие уровни помехоэмиссии и помехоустойчивости устанавливаются требованиями по ЭМС радиоэлектронной аппаратуры. Стандарты на помехоэмиссию, такие как IEC 61967-2 и IEC 62132-2, содержат информацию о порядке измерений этих уровней, необходимых приборах и оснастке. По этим стандартам ТЕМ-камера является одним из устройств, применяемых при таких видах исследований.

Такие ТЕМ-камеры на основе коаксиальной линии передачи прямоугольного сечения широко используются для тестирования на помехоэмиссию и помехоустойчивость интегральных схем. Когда генератор подает сигнал с заранее заданными характеристиками на вход тестируемого устройства, расположенного в регулярной части камеры, поперечная электромагнитная волна распространяется во внутреннем пространстве камеры, образуя однородное электромагнитное поле. Затем сигнал может быть поглощен согласованной нагрузкой, расположенной на противоположной стороне камеры. Первая резонансная частота ТЕМ-камеры определяется ее геометрическими параметрами, которые, в свою очередь, определяют верхнюю границу рабочего диапазона частот ТЕМ-камеры [78]. Используя такие камеры, можно оценить уровень излучаемых эмиссий также от ПП, поскольку он пропорционален амплитудам напряжения на концах центрального проводника камеры.

В ТУСУРе разработаны и созданы два лабораторных макета ТЕМ-камеры, отличающихся диапазоном рабочих частот. Первая камера, называемая миниатюрной мини-ТЕМ-камерой, работает до 5 ГГц [79]. Ее высота составляет 31 мм, а длина регулярной части 104 мм, ширина ее центрального проводника 40 мм, а его толщина 1 мм (рис. 20). Вторая, называемая классической большой ТЕМ-камерой, работает до 2 ГГц [80]. Ее высота составляет 120 мм, а длина регулярной части 140 мм, ширина ее центрального проводника 106,2 мм, а его толщина 2 мм (рис. 21). Исследуемое устройство (здесь ПП) при использовании этих камер должно иметь размеры 100×100 мм. Также желательно, чтобы земля ПП была сплошной и соединялась с корпусом камеры для сохранения его целостности. И поскольку важно оценить излучаемые эмиссии от ПП с МР и при разных климатических условиях, то необходимо использование специальной камеры для контроля температуры.

В ТУСУРе в таких целях используется климатическая (испытательная) камера тепла-холода ESPEC SU-262, в которой помещается только мини-

атюрная ТЕМ-камера. Поэтому при использовании таких измерительных приборов для проведения такого типа экспериментов необходимо учитывать много факторов, таких как термостойкость используемых материалов в изготовлении ПП, гибкость и геометрия структуры самой ПП, которая является основным рассматриваемым фактором в данной работе.

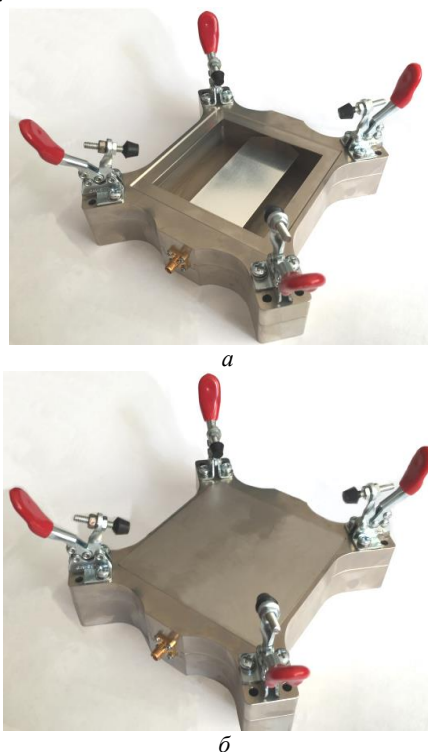


Рис. 20. Лабораторный макет миниатюрной ТЕМ-камеры с открытой (а) и закрытой (б) апертурой

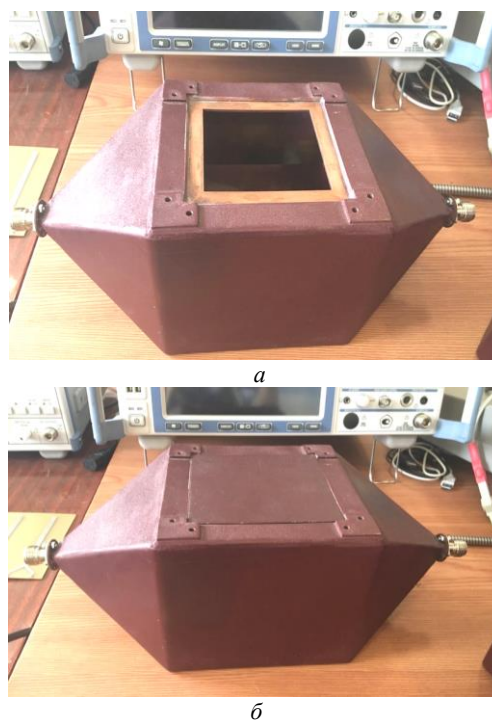


Рис. 21. Лабораторный макет классической ТЕМ-камеры с открытой (а) и закрытой (б) апертурой

Выбор структур для исследования эмиссий

Для проработки возможности изготовления различных макетов структур с одно-, двух- и трёхкратным МР для будущих экспериментальных исследований с целью оценки уровня излучаемых эмиссий в диапазоне частот, в том числе в условиях критичных температур, рассмотрим способы МР и проанализируем возможность их применения для этой цели.

Для однократного МР самым простым по технологичности является макет по способу [47]. Макеты такого типа уже использовались для подобного исследования, например в работе [81]. Способ из [48] немного сложнее, так как требуется добавление тонкого слоя диэлектрика между проводниками ПП.

В отличие от макетов для способов из [47, 48], изготовление макетов для способов из [49, 50] может затруднить оценку уровня излучаемых эмиссий, так как нужно будет измерять его в ТЕМ-камере с двух сторон ПП, т.е. измерять два раза. Но, несмотря на это, использование такого способа для выполнения цели работы остаётся возможным. То же самое касается изготовления макета для способа из [53], но здесь растёт сложность изготовления из-за трассировки двух сигнальных слоев на макете с малыми размерами (100×100 мм), а также из-за необходимости материалов с разными значениями диэлектрической проницаемости. Тем более здесь будет увеличено влияние на характеристики линий передачи изменения диэлектрической проницаемости с изменением температуры. Поэтому здесь сложно будет оценить вклад изменения тепловых коэффициентов двух разных материалов в уровень излучаемых эмиссий.

Способы из [49, 50, 54] также усложняют задачу, поскольку в них нет сплошной земли, а это нарушает однородность поля в камере. Между тем способ из [54] соединяет сложности при использовании способов из [49, 53], тем более, что он направлен на МР не только сигнальных проводников, но и проводников питания. Поэтому использовать его в таком виде эксперимента нецелесообразно. Это же относится к способу из [50], поскольку отсутствие одного опорного проводника усложняет измерения уровня излучаемых эмиссий в камере с двух сторон ПП.

Способ из [51] не подходит для изготовления макетов с такой целью, так как опорный проводник находится внутри слоя диэлектрика. Это также относится и к способам из [55–57, 65], в которых ПП экранирована с двух сторон.

В результате способы из [48, 49, 53], несмотря на сложность изготовления макетов для них, являются оптимальным выбором для изготовления макетов с целью исследования излучаемых эмиссий от ПП с однократным МР.

Что касается многократного МР, то можно сказать, что выводы для способа [48] подходят также к способу из [52]. Здесь уровень сложности даже меньше, так как легче покрыть другим диэлектриком

всю ПП, чем только зазор между проводниками. Аналогично выводы по способам из [49, 51] подходят также к способу из [62, 64] соответственно. Способ из [58] не подходит для изготовления макетов с целью исследования излучаемых эмиссий в камере, так как он направлен на резервирование сигнальных проводников в плоских кабелях.

Способ из [61] также не подходит для такого типа эксперимента по причинам, относящимся к способам из [55–57, 65]. Способы из [73, 74] предложены как способы переключения после отказов, поэтому их использование в предварительных исследованиях нецелесообразно. Между тем в будущем можно оценить уровень эмиссий после переключения, используя только способ из [73], так как в способе из [74] ПП экранирована. В результате можно сказать, что для оценки излучаемых эмиссий от ПП с двухкратным и трехкратным МР способы из [52, 62], соответственно, оптимальны для изготовления макетов.

Заключение

Модальное резервирование (МР) по существу использует избыточность полосы пропускания линий передачи, когда их верхняя частота гораздо выше верхней частоты спектра полезного сигнала. Тогда выполняется преобразование одноименных одиночных линий нескольких одинаковых цепей с резервированием за счет изготовления в единой конструкции с образованием их электромагнитной связи в связанные (однократное резервирование) или многопроводные (многократное резервирование) линии передачи. При этом верхняя частота полосы пропускания уменьшается до верхней частоты спектра полезного сигнала. Таким образом, передача полезного сигнала не нарушается. Однако у линий передачи появляются новые свойства, которые можно использовать для ослабления помеховых сигналов.

Так, на частотах выше верхней частоты спектра полезного сигнала появляются минимумы в частотной зависимости коэффициента передачи. При кондуктивном воздействии сверхширокополосного импульса опасной амплитуды на вход любой из линий этот импульс разлагается на импульсы меньшей амплитуды. В результате каждый проводник цепи с резервированием совместно с единым опорным проводником становится помехозащитным фильтром. Это достигается без введения каких-либо компонентов, а лишь конструктивно. Такие структуры взаимны или близки к ним, что позволяет ослаблять не только внешние кондуктивные воздействия, но и помехоэмиссии от компонентов резервируемых цепей. Кроме того, могут уменьшаться и излучаемые эмиссии от таких линий, позволяя ослабить требования к экранированию.

Всё это касается работы резервируемой цепи до отказа, так что эти преимущества могут использоваться довольно долго, пока резервируемая цепь не выйдет из строя. После её отказа и переключения на резервную цепь эти преимущества могут несколько измениться, но незначительно и только в участке

цепи с отказом, тогда как в остальных участках они сохраняются. В случае многократного МР возможен выбор более предпочтительной резервирующей цепи из оставшихся для переключения на неё. Отметим, что при однократном МР амплитуда воздействующего импульса может уменьшаться в 2 раза, а при трёхкратном – в 4 раза, что достигается за счет зеркальной симметрии по одной и двум плоскостям соответственно. Это получается даже при слабой электромагнитной связи, тогда как при сильной связи эти значения могут увеличиться в несколько раз. При этом увеличивается и временной интервал между импульсами, что препятствует их частичному наложению.

Таким образом, МР дает уникальную возможность не только повысить надежность критичной радиоэлектронной аппаратуры за счет её резервных цепей, но и непрерывно обеспечивать за счет них (как до, так и после выхода их из строя) ЭМС в части уменьшения кондуктивных и излучаемых эмиссий этой аппаратуры, а также ослабления воздействий на неё, особенно преднамеренных сверхкоротких импульсов, создаваемых электромагнитным оружием.

В ходе данной работы выполнен обзор исследований по МР и проанализированы все предложенные способы на его основе. В результате анализа выявлены возможные варианты изготовления макетов ПП с МР для экспериментальных исследований с целью оценки уровня излучаемых эмиссий в диапазоне частот, в том числе в условиях критичных температур.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проекты 19-19-00424, <https://rscf.ru/project/19-19-00424/>, обзор по однократному МР и 20-19-00446, <https://rscf.ru/project/20-19-00446/>, обзор по многократному МР) в ТУСУР.

Литература

1. Trivedi K. Reliability and Availability Engineering: Modeling, Analysis, and Applications / K. Trivedi, A. Bobbio. – Cambridge: Cambridge University Press, 2017. – 712 p. DOI: 10.1017/9781316163047.
2. Amari S.V. Redundancy optimization problem with warm-standby redundancy. / S.V. Amari, G. Dill // San Jose, CA: IEEE Proceedings - Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), 2010. – P. 1–6. DOI: 10.1109/RAMS.2010.5448068.
3. Optimal Reliability Design: Fundamentals and Applications / S.V.W. Kuo, V.R. Prasad, F.A. Tillman, C.L. Hwang. – Cambridge: Cambridge University Press, 2001. – 412 p.
4. Von Neumann J. Probabilistic logics and the synthesis of reliable organisms from unreliable components // Princeton. – Automata Studies: Princeton University Press, 1956. – P. 43–98.
5. Chen D.M. Satellite engineering series: communications satellite payload technology. – China Astronautic Publishing House, 2001.
6. Coit D.W. Maximization of System Reliability with a Choice of Redundancy Strategies // IIE Transactions. – 2003. – Vol. 35. – P. 535–543. – DOI: /10.1080/07408170304420.
7. Grida M. Repairable 3-out-of-4: Cold standby system availability / M. Grida, A. Zaid, G. Kholief // Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS). – 2017. – P. 1–6. DOI: 10.1109/RAM.2017.7889797.
8. Lobur M. Modelling of type I and II errors of switching device for systems with hot and cold redundancy based on two-terminal dynamic fault tree / M. Lobur, T. Stefanovych, S. Shcherbovskykh // The 14th International Conference of The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM). – 2017. – P. 19–21. DOI: 10.1109/CADSM.2017.7916075.
9. Redundancy design of modular DC solid-state transformer based on reliability and efficiency evaluation / Y. Li, Y. Zhang, R. Cao, X. Liu, C. Lv, J. Liu // CPSS Transactions on Power Electronics and Applications. – 2021. – Vol. 6, No. 2. – P. 115–126. DOI: 10.24295/CPSSSTPEA.2021.00010.
10. Design and optimization of an Integrated Reliability redundancy system with multiple constraints / G. Sankaraiah, Y. Raghunatha Reddy, C. Umasankar, B.D. Sarma // The 2nd International Conference on Reliability, Safety and Hazard – Risk-Based Technologies and Physics-of-Failure Methods (ICRESH). – 2010. – P. 118–122. DOI: 10.1109/ICRESH.2010.5779527.
11. Pan D. Study on Optimization of System Reliability Redundancy Based on Hybrid Intelligent Algorithm // The International Conference on Environmental Science and Information Application Technology. – 2009. – P. 560–563. DOI: 10.1109/ESIAT.2009.426.
12. Boland P.J. Component redundancy vs system redundancy in the hazard rate ordering / P.J. Boland, E. El-Newehi // IEEE Transactions on Reliability. – 1995. – Vol. 44, No. 4. – P. 614–619. DOI: 10.1109/24.475980.
13. Shcherbovskykh S. Modelling features of type I and II errors of switching device for system with double hot and double cold redundancy based on two-terminal dynamic fault tree / S. Shcherbovskykh, T. Stefanovych // The 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET). – 2018. – P. 753–756. DOI: 10.1109/TCSET.2018.8336309.
14. Neves F.G.R. Comparison between Redundancy Techniques for Real Time Applications / F.G.R. Neves, O. Saotome // The fifth International Conference on Information Technology: New Generations (ITNG). – 2008. – P. 1299–1300. DOI: 10.1109/ITNG.2008.229.
15. Peterson W. Error-Correcting Codes / W. Peterson, E. Weldon. – Cambridge, MA: MIT Press, 1972. – 576 p.
16. Memristive Stateful Logic with N-Modular Redundancy Error Correction Design towards High Reliability / X. Zhu, H. Xu, H. Long, Q. Li, Z. Li, H. Liu, Y. Wang // The 5th IEEE Electron Devices Technology & Manufacturing Conference (EDTM). – 2021. – P. 1–3. DOI: 10.1109/EDTM.50988.2021.9420918.
17. Logic Computing with Stateful Neural Networks of Resistive Switches / Z. Sun, E. Ambrosi, A. Bricalli, D. Ielmini // Adv. Mater. – 2018. – Vol. 30, No. 38. – P. 1–8. DOI: 10.1002/adma.201802554.
18. A performance evaluation of the Intel iAPX 432 / P. Hansen, M. Linton, R. Mayo, M. Murphy, D. Patterson // SIGARCH Comput. Archit. News. – 1982. – Vol. 10, No. 4. – P. 17–26. DOI: 10.1145/641542.641545.
19. Namazi A. Gate-Level Redundancy: A New Design-for-Reliability Paradigm for Nanotechnologies / A. Namazi, M. Nourani // IEEE Transactions on Very Large-Scale Integration (VLSI) Systems. – 2010. – Vol. 18, No. 5. – P. 775–786. DOI: 10.1109/TVLSI.2009.2016206.
20. Xiong X. Research on Redundancy Solution of Satellite Transponders Based on Reliability Analysis / X. Xiong, H.T. Zhao, T.B. Hu // The International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering

(QR2MSE). – 2019. – P. 689–694. DOI: 10.1109/QR2MSE.46217.2019.9021237.

21. Sklaroff J.R. Redundancy Management Technique for Space Shuttle Computers // *IBM Journal of Research and Development*. – 1976. – Vol. 20, No. 1. – P. 20–28. DOI: 10.1147/rd.201.0020.

22. Xiao C. Reliability Research on Airborne Dual Redundancy of Electrical Wiring Interconnection System / C. Xiao, L. Deng // *The 11th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID)*. – 2018. – P. 137–140. DOI: 10.1109/ISCID.2018.10132.

23. GPR-Based EMI Prediction for UAV's Dynamic Datalink / D. Zhang, M. Zhao, E. Cheng, Y. Chen // *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. – 2021. – Vol. 63, No. 1. – P. 19–29. DOI: 10.1109/TEMC.2020.3000919.

24. Rentschler M. Performance analysis of parallel redundant WLAN / M. Rentschler, P. Laukemann // *Proceedings of 2012 IEEE 17th International Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA 2012)*. – 2012. – P. 1–8. DOI: 10.1109/ETFA.2012.6489647.

25. Introduction to printed circuit board failures / D. Slee, J. Stepan, W. Wei, J. Swart // *IEEE Symposium on Product Compliance Engineering*. – 2009. – P. 1–8. DOI: 10.1109/PSES.2009.5356012.

26. Heterogeneous Redundancy for PCB Track Failures: An Automotive Example / M.G. Labib, D.G. Mahmoud, G.I. Alkady, I. Adly, H.H. Amer, R.M. Daoud, H.M. ElSayed // *The 14th International Conference on Computer Engineering and Systems (ICCES)*. – 2019. – P. 189–194. – DOI: 10.1109/ICCES48960.2019.9068123.

27. Chen H.C. Improvement of High-Current Density PCB Design with PSU Load Balance and Redundancy on a High End Server System / H.C. Chen, Y.W. Bai // *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*. – 2014. – Vol. 37, No. 4. – P. 203–211. DOI: 10.1109/CJECE.2014.2327091.

28. Functional safety standard's techniques and measures in light of electromagnetic interference / J.V. Waes, J. Vankeirsbilck, D. Pisssoort, J. Boydens // *XXVI International Scientific Conference Electronics (ET)*. – 2017. – P. 1–4. DOI: 10.1109/ET.2017.8124403.

29. Pisssoort D. Why is the IEEE developing a standard on managing risks due to EM disturbances? / D. Pisssoort, K. Armstrong // *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC)*. – 2016. – P. 78–83. DOI: 10.1109/ISEMC.2016.7571612.

30. Resilience of Error Correction Codes Against Harsh Electromagnetic Disturbances: Fault Mechanisms / J.V. Waes, D. Vanoost, J. Vankeirsbilck, J. Lannoo, D. Pisssoort, J. Boydens // *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. – 2020. – Vol. 62, No. 4. – P. 1017–1027. DOI: 10.1109/TEMC.2019.2931369.

31. Luo S. A review of distributed power systems. Part II. High frequency AC distributed power systems / S. Luo, I. Batarseh // *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*. – 2006. – Vol. 21, No. 6. – P. 5–14. DOI: 10.1109/MAES.2006.1662037.

32. Techniques and measures to achieve EMI resilience in mission- or safety-critical systems / D. Pisssoort, J. Lannoo, J.V. Waes, A. Degraeve, J. Boydens // *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*. – 2017. – Vol. 6, No. 4. – P. 107–114. DOI: 10.1109/MEMC.0.8272297.

33. Study on the use of different transmission line termination strategies to obtain EMI-diverse redundant systems / J. Lannoo, A. Degraeve, D. Vanoost, J. Boydens, D. Pisssoort // *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC/APEMC)*. – 2018. – P. 210–215. DOI: 10.1109/IEMC.2018.8393768.

34. Study and Classification of Potential IEMI Sources / N. Mora, F. Vega, G. Lugin, F. Rachidi, M. Rubinstein // *System Design and Assessment Notes*. – 2014. – P. 1–43.

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

36. Orlov P.E. Contactless Modal Phenomena Based Approach to Detecting, Identifying, and Diagnosing of Electrical Connections / P.E. Orlov, T.R. Gazizov // *Complexity*. – 2018. – Vol. 2018. – P. 5081684. DOI: 10.1155/2018/5081684.

37. Quasistatic simulation of ultrashort pulse propagation in the spacecraft autonomous navigation system circuit with modal reservation / P.E. Orlov, A.V. Medvedev, V.R. Sharafutdinov, I.F. Kalimulin // *International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON)*. – 2017. – P. 495–500. DOI: 10.1109/SIBIRCON.2017.8109935.

38. Orlov P.E. Quasistatic Simulation of Ultrashort Pulse Propagation in the Spacecraft Autonomous Navigation System Power Circuit with Modal Reservation / P.E. Orlov, A.V. Medvedev, V.R. Sharafutdinov // *The 19th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*. – 2018. – P. 1–6. DOI: 10.1109/EDM.2018.8435026.

39. Method of lay-out of a multilayer PCB for circuits with triple reservation / P.E. Orlov, E.N. Buichkin, A.O. Belousov, T.R. Gazizov // *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. – 2017. – P. 1–4. DOI: 10.1109/SIBCON.2017.7998528.

40. From Symmetry to Asymmetry: The Use of Additional Pulses to Improve Protection against Ultrashort Pulses Based on Modal Filtration / A.O. Belousov, E.B. Chernikova, M.A. Samoylichenko, A.V. Medvedev, A.V. Nosov, T.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky // *Symmetry*. – 2020. – Vol. 12, No. 7. – P. 1117. DOI: 10.3390/sym12071117.

41. Orlov P.E. Quasistatic and electromagnetic simulation of interconnects of printed circuit boards with modal reservation / P.E. Orlov, E.N. Buichkin // *The 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*. – 2017. – P. 54–58. DOI: 10.1109/EDM.2017.7981707.

42. Optimization of stack parameters of multi-layer PCB for circuits with redundancy by genetic algorithm / P.E. Orlov, T.R. Gazizov, V.R. Sharafutdinov, I.F. Kalimulin // *International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON)*. – 2017. – P. 463–467. DOI: 10.1109/SIBIRCON.2017.8109928.

43. Hasan A.A. Approach to Estimation of Radiated Emission from Circuits with Modal Reservation / A.A. Hasan, A.A. Kvasnikov, T.R. Gazizov // *The 21st International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*. – 2020. – P. 169–173. DOI: 10.1109/EDM49804.2020.9153498.

44. Hasan A.A. Estimation of the Radiated Emission from a Single and Coupled Wires with Insulation above the Ground Plane / A.A. Hasan, T.R. Gazizov // *IEEE 22nd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)*. – 2021. – P. 149–152. DOI: 10.1109/EDM52169.2021.9507613.

45. Hasan A.A. Estimation of radiated emissions from a structure with a single modal reservation / A.A. Hasan, Y.S. Zhechev, T.R. Gazizov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – Vol. 1862, No. 1. 012003. DOI: 10.1088/1742-6596/1862/1/012003.

46. Hasan A.A. Comparing the Estimates of the Radiated Emission from a Structure with Modal Reservation by Two

Approaches / A.A. Hasan, T.R. Gazizov // IEEE 22nd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). – 2021. – P. 145–148. DOI: 10.1109/EDM52169.2021.9507636.

47. 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. 10.12.2016, Бюл. № 34. – 7 с.

48. 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. 10.12.2016, Бюл. № 34. – 8 с.

49. 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. – 2 015 137 547 / 07; заявл. 02.09.15; опубл. 10.12.2016, Бюл. № 34. – 8 с.

50. Пат. 2 762 336 РФ, МПК Н 05 К 3/00, Н 04 В 15/02. Способ трассировки двухсторонней печатной платы для цепей с модальным резервированием / Т.Р. Газизов, М. Самойличенко. – 2 021 105 511; заявл. 04.03.21; опубл. 20.12.2021, Бюл. № 35. – 7 с.

51. Пат. 2 732 607 РФ, МПК Н 04 В 15/00, Н 01 Р 11/00. Способ однократного модального резервирования межсоединений / Т.Р. Газизов, А.О. Белоусов, Е. Черникова. – 2 019 140 187; заявл. 09.12.19; опубл. 25.09.2020, Бюл. № 27. – 7 с.

52. Пат. 2 752 232 РФ, МПК Н 04 В 15/02, Н 01 Р 11/00. Способ трассировки печатных проводников с дополнительным диэлектриком для цепей с двукратным резервированием / Т.Р. Газизов, А.В. Медведев. – 2 019 140 181; заявл. 19.12.19; опубл. 23.07.2021, Бюл. № 16. – 7 с.

53. Пат. 2 752 233 РФ, МПК Н 04 В 15/02. Способ трассировки печатных проводников на двуслойной печатной плате для цепей с резервированием / Т.Р. Газизов, А.В. Медведев. – 2 020 122 274; заявл. 06.07.20; опубл. 23.07.2021, Бюл. № 21. – 8 с.

54. Пат. 2 779 536 РФ, МПК Н 04 В 15/02. Способ трассировки печатных проводников цепей питания с резервированием / Т.Р. Газизов, А.В. Медведев и др. – 2 021 115 972; заявл. 03.06.21; опубл. 08.09.2022, Бюл. № 25. – 6 с.

55. Пат. 2 614 156 РФ, МПК Н 04 В 15/02, Н 03 Н 3/00, Н 05 К 3/36. Способ компоновки печатных плат для цепей с резервированием / Т.Р. Газизов, П.Е. Орлов, В.Р. Шарафутдинов и др. – 2 015 137 532; заявл. 02.09.15; опубл. 06.03.2017, Бюл. № 7. – 10 с.

56. Пат. 2 693 838 РФ, МПК Н 04 В 15/02. Способ компоновки неформованных радиоэлектронных компонентов на печатных платах для цепей с резервированием / Т.Р. Газизов, П.Е. Орлов, В.Р. Шарафутдинов. – 2 018 124 928; заявл. 06.07.18; опубл. 05.07.2019, Бюл. № 19. – 12 с.

57. Пат. 2 624 637 РФ, МПК Н 04 В 15/02, Н 03 Н 3/00, Н 05 К 3/36. Способ внутренней компоновки печатных плат для цепей с резервированием / Т.Р. Газизов, П.Е. Орлов, В.Р. Шарафутдинов и др. – 2 015 137 548; заявл. 02.09.15; опубл. 05.07.2017, Бюл. № 19. – 10 с.

58. Пат. 2 603 848 РФ, МПК Н 04 В 15/02. Способ резервирования плоских кабелей / Т.Р. Газизов, П.Е. Орлов, В.Р. Шарафутдинов и др. – 2 015 156 667 / 07; заявл. 28.12.15; опубл. 10.12.2016, Бюл. № 34. – 6 с.

59. Orlov P.E. Evaluation of efficiency of modal filtration in different types of redundant electrical connections / P.E. Orlov, T.R. Gazizov, E.N. Buichkin // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – 2016. – P. 1–3. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491786.

60. Orlov P.E. Method of lay-out of multilayer PCBs for circuits with redundancy / P.E. Orlov, E.N. Buichkin, T.T. Gazizov // The 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – 2016. – P. 155–158. DOI: 10.1109/EDM.2016.7538715.

61. Пат. 2 663 230 РФ, МПК Н 04 В 15/02. Способ трехкратного резервирования цепей в многослойных печатных платах / Т.Р. Газизов, П.Е. Орлов, В.Р. Шарафутдинов. – 2 017 113 045; заявл. 14.04.17; опубл. 02.08.2018, Бюл. № 22. – 8 с.

62. Пат. 2 738 955 РФ, МПК Н 04 В 15/02. Способ трёхкратного резервирования межсоединений / Т.Р. Газизов, А.В. Медведев, В.Р. Шарафутдинов. – 2 019 138 502; заявл. 27.11.19; опубл. 21.12.2020, Бюл. № 36. – 8 с.

63. Methods for increasing noise immunity of radio electronic systems with redundancy / P.E. Orlov, A.V. Medvedev, V.R. Sharafutdinov, T.R. Gazizov, A.V. Ubaichin // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1015, No. 5. – P. 052022. DOI: 10.1088/1742-6596/1015/5/052022.

64. Пат. 2 751 672 РФ, МПК Н 04 В 15/02, Н 01 Р 11/00. Способ компоновки печатных проводников для цепей с модальным резервированием / Т.Р. Газизов, Е.С. Жечев, А.О. Белоусов и др. – 2 020 126 549; заявл. 10.08.20; опубл. 15.07.2021, Бюл. № 20. – 9 с.

65. Пат. 2 754 078 РФ, МПК Н 04 В 15/02, Н 05 К 3/00. Способ компоновки многослойных печатных плат для цепей с резервированием / Т.Р. Газизов, А.В. Медведев и др. – 2 020 122 293; заявл. 06.07.20; опубл. 26.08.2021, Бюл. № 24. – 7 с.

66. Sharafutdinov V.R. Using Modal Reservation for Ultrashort Pulse Attenuation After Failure / V.R. Sharafutdinov, A.V. Medvedev // International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). – 2019. – P. 0293–0296. DOI: 10.1109/SIBIRCON48586.2019.8958018.

67. Medvedev A.V. Evaluating modal reservation efficiency before and after failure / A.V. Medvedev, T.R. Gazizov, Y.S. Zhechev // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1488, No. 1. – P. 012015. DOI: 10.1088/1742-6596/1488/1/012015.

68. Medvedev A.V. Analysis of frequency characteristics of a structure with single modal reservation before and after failure / A.V. Medvedev, Y.S. Zhechev // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 862, No. 2. – P. 022037. DOI: 10.1088/1757-899x/862/2/022037.

69. 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. DOI: 10.1109/TEMC.2022.3171770.

70. Medvedev A.V. Studying the switching order for a three-wire structure with modal reservation after failures. – Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 919, No. 5. – P. 052022. DOI: 10.1088/1757-899x/919/5/052022.

71. Medvedev A.V. Studying the circuit switching order after failures for a shielded structure with triple modal reservation / A.V. Medvedev, T.R. Gazizov // Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT). – 2021. – P. 0427–0430. DOI: 10.1109/USBREIT51232.2021.9455028.

72. 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. – P. 1074. DOI: 10.3390/sym13061074.

73. Пат. 2 770 516 РФ, МПК Н 04 В 15/02. Способ переключения цепей с двукратным резервированием после

отказов / Т.Р. Газизов, А.В. Медведев. – 2 021 115 974; заявл. 03.06.21; опубл. 18.04.2022, Бюл. № 11. – 7 с.

74. Пат. 2 767 190 РФ, МПК Н 02 Н 3/05. Способ переключения цепей с трехкратным резервированием после отказов / Т.Р. Газизов, А.В. Медведев и др. – 2 021 116 338; заявл. 07.06.21; опубл. 16.03.2022, Бюл. № 8. – 7 с.

75. Using N-norms for analysing a device with a single modal reservation / Y.S. Zhechev, A.V. Zhecheva, A.V. Medvedev, T.R. Gazizov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2020. – Vol. 1611, No. 1. – P. 012065. DOI: 10.1088/1742-6596/1862/1/012003.

76. Gazizov R.R. Using Portraits of N-Norms for Large-Scale Investigation of Circuits with Modal Reservation / R.R. Gazizov, A.V. Medvedev, T.R. Gazizov // *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)*. – 2021. – P. 1–4. DOI: 10.1109/Dynamics52735.2021.9653464.

77. Using N-norms for analyzing symmetric protective electrical circuits with triple modal reservation / Y.S. Zhechev, A.V. Zhecheva, A.A. Kvasnikov, A.M. Zabolotsky // *Symmetry*. – 2021. – Vol. 13, No. 12. – P. 2390. DOI: 10.3390/sym13122390.

78. Demakov A.V. Improved TEM-cell for EMC tests of integrated circuits / A.V. Demakov, M.E. Komnatnov // *IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON)*. – 2017. – P. 399–402. DOI: 10.1109/SIBIRCON.2017.8109915.

79. Пат. 2 727 075 РФ, МПК Н 01 Р 1/00. ТЕМ-камера для оценки помехоэмиссии и помехоустойчивости интегральных схем / Т.Р. Газизов, А.В. Демаков, М.Е. Комнатнов. – 2 019 140 183; заявл. 09.12.19; опубл. 17.07.2020, Бюл. № 20. – 12 с.

80. Пат. 2 606 173 РФ, МПК Н 01 Р 1/00. ТЕМ-Камера / Т.Р. Газизов, М.Е. Комнатнов. – 2 015 156 668; заявл. 28.12.15; опубл. 10.01.2017, Бюл. № 1. – 15 с.

81. Hasan A.A. Frequency Characteristics of PCB with Modal Reservation before and after Failure Using TALGAT / A.A. Hasan, T.R. Gazizov // *IEEE 23rd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)*. – 2022. – P. 140–146. DOI: 10.1109/EDM55285.2022.9855089.

Алхадж Хасан Аднан

Аспирант каф. телевидения и управления (ТУ)
Томского государственного университета
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0001-7403-7023
Тел.: +7-996-957-97-63
Эл. почта: alhaj.hasan.adnan@yandex.ru

Газизов Тальгат Рашитович

Д-р техн. наук каф. ТУ ТУСУРа
Ленина пр-1, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0002-1192-4853
Тел.: +7-913-826-07-24
Эл. почта: talgat@tu.tusur.ru

Alhaj Hasan A., Gazizov T.R.

A review of studies on modal reservation

A growing number and increasing complexity of radioelectronic devices leads to the need to protect them from interference and enhance their reliability. There are many methods to ensure this, and they differ in capability, efficiency, and ease

of implementation. Among these methods, a modal reservation (MR) is one of the most effective, reliable, and uncomplicated methods currently in use. Using this method in PCB tracing and assembling ensures both electromagnetic compatibility and reliability of the final electronic device. Much research has been performed on the study and development of MR, including 18 patents for inventions. However, there is still no a complete and extensive review of this method in order to perform research based on it. Therefore, this article presents a review of history and recent research on MR to identify the possibility of making various prototypes of MR-based structures. These structures could be used for experimental studies to estimate the level of radiated emissions in the frequency range, including the situations when the temperatures are extreme. In the conclusion, the main advantages of MR are summarized for the first time.

Keywords: redundancy, modal reservation, modal filtering, electromagnetic compatibility, electromagnetic interference, radiated emissions, transmission lines, printed circuit board.

DOI: 10.21293/1818-0442-2022-25-4-54-67

References

1. Trivedi K., Bobbio A. *Reliability and Availability Engineering: Modeling, Analysis, and Applications*. Cambridge. Cambridge University Press, 2017. 712 p. DOI: 10.1017/9781316163047.
2. Amari S.V., Dill G. Redundancy optimization problem with warm-standby redundancy. *Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, 2010, pp. 1–6. DOI: 10.1109/RAMS.2010.5448068.
3. Kuo S.V.W., Prasad V.R., Tillman F.A., Hwang C.L. *Optimal Reliability Design: Fundamentals and Applications*. Cambridge. Cambridge University Press, 2001, 412 p.
4. Von Neumann J. *Probabilistic logics and the synthesis of reliable organisms from unreliable components*. Automata Studies, Princeton University Press, 1956, pp. 43–98.
5. Chen D.M. *Satellite engineering series: communications satellite payload technology*. China Astronautic Publishing House, 2001.
6. Coit D.W. Maximization of System Reliability with a Choice of Redundancy Strategies. *IIE Transactions*, 2003, vol. 35, pp. 535–543. DOI: /10.1080/07408170304420.
7. Grida M., Zaid A., Kholief G. Repairable 3-out-of-4: Cold standby system availability. *Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, 2017, pp. 1–6. DOI: 10.1109/RAM.2017.7889797.
8. Lobur M., Stefanovych T., Shcherbovskykh S. Modeling of type I and II errors of switching device for systems with hot and cold redundancy based on two-terminal dynamic fault tree. *The 14th International Conference of The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)*, 2017, pp. 19–21. DOI: 10.1109/CADSM.2017.7916075.
9. Li Y., Zhang Y., Cao R., Liu X., Lv C., Liu J. Redundancy design of modular DC solid-state transformer based on reliability and efficiency evaluation. *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*, 2021, vol. 6, no. 2, pp. 115–126. DOI: 10.24295/CPSSPEA.2021.00010.
10. Sankaraiah G., Raghunatha Reddy Y., Umasankar C., Sarma B. D. Design and optimization of an Integrated Reliability redundancy system with multiple constraints. *The 2nd International Conference on Reliability, Safety and Hazard - Risk-Based Technologies and Physics-of-Failure Methods (ICRESH)*, 2010, pp. 118–122. DOI: 10.1109/ICRESH.2010.5779527.
11. Pan D. Study on Optimization of System Reliability Redundancy Based on Hybrid Intelligent Algorithm. *The In-*

ternational Conference on Environmental Science and Information Application Technology, 2009, pp. 560–563. DOI: 10.1109/ESIAT.2009.426.

12. Boland P.J., El-Newehi E. Component redundancy vs system redundancy in the hazard rate ordering. *IEEE Transactions on Reliability*, 1995, vol. 44, no. 4, pp. 614–619. DOI: 10.1109/24.475980.

13. Shcherbovskiykh S., Stefanovych T. Modelling features of type I and II errors of switching device for system with double hot and double cold redundancy based on two-terminal dynamic fault tree. *The 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, 2018, pp. 753–756. DOI: 10.1109/TCSET.2018.8336309.

14. Neves F.G.R., Saotome O. Comparison between Redundancy Techniques for Real Time Applications. *The fifth International Conference on Information Technology: New Generations (ITNG)*, 2008, pp. 1299–1300. DOI: 10.1109/ITNG.2008.229.

15. Peterson W., Weldon E. *Error-Correcting Codes*. Cambridge, MA: MIT Press, 1972, 576 p.

16. Zhu X. et al. Memristive Stateful Logic with N-Modular Redundancy Error Correction Design towards High Reliability. *The 5th IEEE Electron Devices Technology & Manufacturing Conference (EDTM)*, 2021, pp. 1–3. DOI: 10.1109/EDTM50988.2021.9420918.

17. Sun Z., Ambrosi E., Bricalli A., Ielmini D. Logic Computing with Stateful Neural Networks of Resistive Switches. *Advanced Materials*, 2018, vol. 30, no. 38, pp. 1–8. DOI: 10.1002/adma.201802554.

18. Hansen P., Linton M., Mayo R., Murphy M., Patterson D. A performance evaluation of the Intel iAPX 432. *SIGARCH Computer Architecture News*, 1982, vol. 10, no. 4, pp. 17–26. DOI: 10.1145/641542.641545.

19. Namazi A., Nourani M. Gate-Level Redundancy: A New Design-for-Reliability Paradigm for Nanotechnologies. *IEEE Transactions on Very Large-Scale Integration (VLSI) Systems*, 2010, vol. 18, no. 5, pp. 775–786. DOI: 10.1109/TVLSI.2009.2016206.

20. Xiong X., Zhao H.T., Hu T.B. Research on Redundancy Solution of Satellite Transponders Based on Reliability Analysis. *The International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE)*, 2019, pp. 689–694. DOI: 10.1109/QR2MSE46217.2019.9021237.

21. Sklaroff J.R. Redundancy Management Technique for Space Shuttle Computers. *IBM Journal of Research and Development*, 1976, vol. 20, no. 1, pp. 20–28. DOI: 10.1147/rd.201.0020.

22. Xiao C., Deng L. Reliability Research on Airborne Dual Redundancy of Electrical Wiring Interconnection System. *The 11th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID)*, 2018, pp. 137–140. DOI: 10.1109/ISCID.2018.10132.

23. Zhang D., Zhao M., Cheng E., Chen Y. GPR-Based EMI Prediction for UAV's Dynamic Datalink. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2021, vol. 63, no. 1, pp. 19–29. DOI: 10.1109/TEMC.2020.3000919.

24. Rentschler M., Laukemann P. Performance analysis of parallel redundant WLAN. *Proceedings of 2012 IEEE 17th International Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA 2012)*, 2012, pp. 1–8. DOI: 10.1109/ETFA.2012.6489647.

25. Slee D., Stepan J., Wei W., Swart J. Introduction to printed circuit board failures. *IEEE Symposium on Product Compliance Engineering*, 2009, pp. 1–8. DOI: 10.1109/PSES.2009.5356012.

26. Labib M.G., et al. Heterogeneous Redundancy for PCB Track Failures: An Automotive Example. *The 14th International Conference on Computer Engineering and Systems (ICCES)*, 2019, pp. 189–194. DOI: 10.1109/ICCES48960.2019.9068123.

27. Chen H.C., Bai Y.W. Improvement of High-Current Density PCB Design with PSU Load Balance and Redundancy on a High-End Server System. *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2014, vol. 37, no. 4, pp. 203–211. DOI: 10.1109/CJECE.2014.2327091.

28. Waes J.V., Vankeirsbilck J., Pissoot D., Boydens J. Functional safety standard's techniques and measures in light of electromagnetic interference. *XXVI International Scientific Conference Electronics (ET)*, 2017, pp. 1–4. DOI: 10.1109/ET.2017.8124403.

29. Pissoot D., Armstrong K. Why is the IEEE developing a standard on managing risks due to EM disturbances?. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC)*, 2016, pp. 78–83. DOI: 10.1109/IEMC.2016.7571612.

30. Waes J.V., Vanoost D., Vankeirsbilck J., Lannoo J., Pissoot D., Boydens J. Resilience of Error Correction Codes Against Harsh Electromagnetic Disturbances: Fault Mechanisms. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2020, vol. 62, no. 4, pp. 1017–1027. DOI: 10.1109/TEMC.2019.2931369.

31. Luo S., Batarseh I. A review of distributed power systems. Part II. High frequency AC distributed power systems. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2006, vol. 21, no. 6, pp. 5–14. DOI: 10.1109/MAES.2006.1662037.

32. Pissoot D., Lannoo J., Waes J.V., 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. DOI: 10.1109/MEMC.0.8272297.

33. Lannoo J., Degraeve A., Vanoost D., Boydens J., Pissoot D. Study on the use of different transmission line termination strategies to obtain EMI-diverse redundant systems. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC/APEMC)*, 2018, pp. 210–215. DOI: 10.1109/IEMC.2018.8393768.

34. Mora N., Vega F., Lugrin G., Rachidi F., Rubinstein M. Study and Classification of Potential IEMI Sources. *System Design and Assessment Notes*, 2014, pp. 1–43.

35. 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.

36. Orlov P.E., Gazizov T. R. Contactless Modal Phenomena Based Approach to Detecting, Identifying, and Diagnosing of Electrical Connections. *Complexity*, 2018, vol. 2018, p. 5081684. DOI: 10.1155/2018/5081684.

37. Orlov P.E., Medvedev A.V., Sharafutdinov V.R., Kalimulin I.F. Quasistatic simulation of ultrashort pulse propagation in the spacecraft autonomous navigation system circuit with modal reservation. *International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON)*, 2017, pp. 495–500. DOI: 10.1109/SIBIRCON.2017.8109935.

38. Orlov P.E., Medvedev A.V., Sharafutdinov V.R. Quasistatic Simulation of Ultrashort Pulse Propagation in the Spacecraft Autonomous Navigation System Power Circuit with Modal Reservation. *The 19th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*, 2018, pp. 1–6. DOI: 10.1109/EDM.2018.8435026.

39. Orlov P.E., Buichkin E.N., Belousov A.O., Gazizov T.R. Method of lay-out of a multilayer PCB for circuits with triple reservation. *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, 2017, pp. 1–4. DOI: 10.1109/SIBCON.2017.7998528.

40. Belousov A.O., Chernikova E.B., Samoylichenko M.A., Medvedev A.V., Nosov A.V., Gazizov T.R., Zabolotsky A.M. From Symmetry to Asymmetry: The Use of Additional Pulses to Improve Protection against Ultrashort Pulses Based on Modal Filtration. *Symmetry*, 2020, vol. 12, no. 7, p. 1117. DOI: 10.3390/sym12071117.

41. Orlov P.E., Buichkin E.N. Quasistatic and electromagnetic simulation of interconnects of printed circuit boards with modal reservation. *The 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*, 2017, pp. 54–58. DOI: 10.1109/EDM.2017.7981707.

42. Orlov P.E., Gazizov T.R., Sharafutdinov V.R., Kalimulin I.F. Optimization of stack parameters of multi-layer PCB for circuits with redundancy by genetic algorithm. *International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON)*, 2017, pp. 463–467. DOI: 10.1109/SIBIRCON.2017.8109928.

43. Hasan A.A., Kvasnikov A.A., Gazizov T.R. Approach to Estimation of Radiated Emission from Circuits with Modal Reservation. *The 21st International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*, 2020, pp. 169–173. DOI: 10.1109/EDM.49804.2020.9153498.

44. Hasan A.A., Gazizov T.R. Estimation of the Radiated Emission from a Single and Coupled Wires with Insulation above the Ground Plane. *IEEE 22nd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)*, 2021, pp. 149–152. DOI: 10.1109/EDM52169.2021.9507613.

45. Hasan A.A., Zhechev Y.S., Gazizov T.R. Estimation of radiated emissions from a structure with a single modal reservation. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1862, no. 1, p. 012003. DOI: 10.1088/1742-6596/1862/1/012003.

46. Hasan A.A., Gazizov T.R. Comparing the Estimates of the Radiated Emission from a Structure with Modal Reservation by Two Approaches. *IEEE 22nd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)*, 2021, pp. 145–148. DOI: 10.1109/EDM52169.2021.9507636.

47. 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 tsepej s rezervirovaniem* [Method of routing printed conductors of circuits with redundancy] Patent RF, no. 2603850, 2016 (in Russ).

48. 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 s dopolnitelnym dielektrikom dlya tsepej s rezervirovaniem* [Method of routing printed conductors with additional dielectric for circuits with redundancy]. Patent RF, no. 2603851, 2016 (in Russ).

49. Gazizov T.R., Orlov P.E., Sharafutdinov V.R., Kuznetsova-Tadzhibaeva O.L., Zabolotskij 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).

50. Samoilichenko M., Gazizov T.R. *Sposob trassirovki dvuhstoronnej pechatnoj platy dlya tsepej s modalnym rezervirovaniem* [Method for tracing a double-sided printed board for

circuits with modal redundancy]. Patent RF, no. 2762336, 2021 (in Russ.).

51. Belousov A.O., Chernikova E., Gazizov T.R. *Sposob odnokratnogo modalnogo rezervirovaniya mezhsodinenij* [Method of single modal backup of interconnections]. Patent RF, no. 2732607, 2020 (in Russ.).

52. Medvedev A.V., Gazizov T.R. *Sposob trassirovki pechatnykh provodnikov s dopolnitelnym dielektrikom dlya tsepej s dvukratnym rezervirovaniem* [Method for routing printed conductors with additional dielectric for dual redundancy circuits]. Patent RF, no. 2752232, 2021 (in Russ.).

53. Medvedev A.V., Alhaj Hasan A., Kuznetsova-Tadzhibaeva O.L., Gazizov T.R. *Sposob trassirovki pechatnykh provodnikov na dvuslojnoj pechatnoj plate dlya tsepej s rezervirovaniem* [Method for routing printed conductors on two-layered printed circuit board for circuits with redundancy]. Patent RF, no. 2752233, 2021 (in Russ.).

54. Medvedev A.V., Kuznetsova-Tadzhibaeva O.L., Gazizov T.R. *Sposob trassirovki pechatnykh provodnikov tsepej pitaniya s rezervirovaniem* [Method for routing conductor strips of redundant power circuits]. Patent RF, no. 2779536, 2022 (in Russ.).

55. Gazizov T.R., Orlov P.E., Sharafutdinov V.R., Kuznetsova-Tadzhibaeva O.L., Zabolotskij A.M., Kuksenko S.P., Buichkin E.N. *Sposob komponovki pechatnykh plat dlya tsepej s rezervirovaniem* [Printed circuit boards with reserve circuits arrangement method]. Patent RF, no. 2614156, 2017 (in Russ.).

56. Sharafutdinov V.R., Orlov P.E., Gazizov T.R. *Sposob komponovki neformovannykh radioelektronnykh komponentov na pechatnykh platah dlya tsepej s rezervirovaniem* [Method of assembling non-molded radioelectronic components on printed circuit boards for circuits with redundancy]. Patent RF, no. 2693838, 2019 (in Russ.).

57. Gazizov T.R., Orlov P.E., Sharafutdinov V.R., Kuznetsova-Tadzhibaeva O.L., Zabolotskij A.M., Kuksenko S.P., Buichkin E.N. *Sposob vnutrennej komponovki pechatnykh plat dlya tsepej s rezervirovaniem* [Printed circuit boards with reserve circuits arrangement method]. Patent RF, no. 624637, 2017 (in Russ.).

58. Gazizov T.R., Orlov P.E., Sharafutdinov V.R., Kuznetsova-Tadzhibaeva O.L., Zabolotskij A.M., Kuksenko S.P., Buichkin E.N. *Sposob rezervirovaniya ploskikh kabelej* [Method of flat cables backing up]. Patent RF, no. 2603848, 2016 (in Russ.).

59. Orlov P.E., Gazizov T.R., Buichkin E.N. Evaluation of efficiency of modal filtration in different types of redundant electrical connections. *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, 2016, pp. 1–3. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491786.

60. Orlov P.E., Buichkin E.N., Gazizov T.R. Method of lay-out of multilayer PCBs for circuits with redundancy. *The 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*, 2016, pp. 155–158. DOI: 10.1109/EDM.2016.7538715.

61. Gazizov T.R., Orlov P.E., Sharafutdinov V.R. *Sposob trekhkratnogo rezervirovaniya tsepej v mnogoslojnykh pechatnykh platah* [Method of circuit triple reservation in multilayered printed circuit boards]. Patent RF, no. 2663230, 2018 (in Russ.).

62. Sharafutdinov V.R., Gazizov T.R., Medvedev A.V. *Sposob tryohkratnogo rezervirovaniya mezhsodinenij* [Method of triple backup of interconnections]. Patent RF, no. 2738955, 2020 (in Russ.).

63. Orlov P.E., Medvedev A.V., Sharafutdinov V.R., Gazizov T.R., Ubaichin A.V. Methods for increasing noise immunity of radio electronic systems with redundancy. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1015, no. 5, p. 052022. DOI: 10.1088/1742-6596/1015/5/052022.

64. Zhechev E.S., Belousov A.O., Gazizov T.R., Zabolotskii A.M., Chernikova E.B. *Sposob komponovki pechatnykh provodnikov dlya tsepej s modalnym rezervirovaniem* [Method for arranging printed conductors for circuits with modal redundancy]. Patent RF, no. 2751672, 2021 (in Russ.).
65. Medvedev A.V., Kuznetsova-Tadzhibaeva O.L., Gazizov T.R. *Sposob komponovki mnogoslojnykh pechatnykh plat dlya tsepej s rezervirovaniem* [Method for arranging multi-layer PCB for redundant circuits]. Patent RF, no. 2754078, 2021 (in Russ.).
66. Sharafutdinov V.R., Medvedev A.V. Using Modal Reservation for Ultrashort Pulse Attenuation After Failure. *International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON)*, 2019, pp. 0293–0296. DOI: 10.1109/SIBIRCON48586.2019.8958018.
67. Medvedev A.V., Gazizov T.R., Zhechev Y.S. Evaluating modal reservation efficiency before and after failure. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1488, no. 1, p. 012015. DOI: 10.1088/1742-6596/1488/1/012015.
68. Medvedev A.V., Zhechev Y.S. Analysis of frequency characteristics of a structure with single modal reservation before and after failure. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 862, no. 2, p. 022037. DOI: 10.1088/1757-899x/862/2/022037.
69. 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. DOI: 10.1109/TEMC.2022.3171770.
70. Medvedev A.V. Studying the switching order for a three-wire structure with modal reservation after failures. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 919, no. 5, p. 052022. DOI: 10.1088/1757-899x/919/5/052022.
71. Medvedev A.V., Gazizov T.R. Studying the circuit switching order after failures for a shielded structure with triple modal reservation. *Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT)*, 2021, pp. 0427–0430. DOI: 10.1109/USBREIT51232.2021.9455028.
72. 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, p. 1074. DOI: 10.3390/sym13061074.
73. Medvedev A.V., Gazizov T.R. *Sposob pereklyucheniya tsepej s dvukratnym rezervirovaniem posle otkazov* [Method for switching circuits with double redundancy after failures]. Patent RF, no. 2770516, 2022 (in Russ.).
74. Medvedev A.V., Gazizov T.R., Zabolotskii A.M. *Sposob pereklyucheniya tsepej s trekhkratnym rezervirovaniem posle otkazov* [Method for switching circuits with triple redundancy after failures]. Patent RF, no. 2767190, 2022 (in Russ.).
75. Zhechev Y.S., Zhecheva A.V., Medvedev A.V., Gazizov T.R. Using N-norms for analyzing a device with a single modal reservation. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1611, no. 1, p. 012065. DOI: 10.1088/1742-6596/1862/1/012003.
76. Gazizov R.R., Medvedev A.V., Gazizov T.R. Using Portraits of N-Norms for Large-Scale Investigation of Circuits with Modal Reservation. *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)*, 2021, pp. 1–4. DOI: 10.1109/Dynamics52735.2021.9653464.
77. Zhechev Y.S., Zhecheva A.V., Kvasnikov A.A., Zabolotsky A.M. Using N-norms for analyzing symmetric protective electrical circuits with triple modal reservation. *Symmetry*, 2021, vol. 13, no. 12, p. 2390. DOI: 10.3390/sym13122390.
78. Demakov A.V., Komnatnov M.E. Improved TEM-cell for EMC tests of integrated circuits. *IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON)*, 2017, pp. 399–402. DOI: 10.1109/SIBIRCON.2017.8109915.
79. Gazizov T.R., Demakov A.V., Komnatnov M.E. *TEM-kamera dlya otsenki pomekhoemissii i pomekhoustojchivosti integralnykh skhem* [TEM Test Cell for Estimating Noise Emission and Noise Immunity of Integrated Circuits]. Patent RF, no. 2727075, 2020 (in Russ.).
80. Komnatnov M.E., Gazizov T.R. *TEM-kamera* [TEM Chamber]. Patent RF, no. 2606173, 2017 (in Russ.).
81. Hasan A.A., Gazizov T.R. Frequency Characteristics of PCB with Modal Reservation before and after Failure Using TALGAT. *IEEE 23rd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)*, 2022, pp. 140–146. DOI: 10.1109/EDM55285.2022.9855089.

Adnan Alhaj Hasan

Postgraduate student, Department of Television and Control, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0001-7403-7023
Phone: +7-996-957-97-63
Email: alhaj.hasan.adnan@yandex.ru

Talgat Rashitovich Gazizov

Doctor of Science in Engineering,
Department of Television and Control, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0002-1192-4853
Phone: +7-913-826-07-24
Email: talgat@tu.tusur.ru