

УДК 621.396.41

Анализ способов резервирования на основе модальной фильтрации

Шарафутдинов В. Р., Газизов Т. Р.

Постановка задачи: Недостаточное внимание к надежности и электромагнитной совместимости (ЭМС) радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), как правило, недопустимо для систем управления, связи и безопасности. Общеизвестным путем повышения надежности является холодное резервирование, когда при отказе функционирующей цепи подается питание на другую, не задействованную ранее. При работе одной схемы другая не используется и почти не оказывает влияния на её работу. При отказе одной начинает работать другая. Однако резервные устройства кратко увеличивают массу, размеры и стоимость РЭА, что часто неприемлемо. При этом все более обостряющаяся проблема ЭМС, которая требует дополнительных мер, ещё более ухудшает указанные характеристики. Поэтому, важно разрабатывать новые способы повышения надежности и обеспечения ЭМС РЭА. **Цель работы** – дать системное представление новых способов резервирования, позволяющих обеспечить ЭМС РЭА за счет модальной фильтрации, которые мы кратко называем способами модального резервирования (МР). **Используемые методы:** надежность и ЭМС достигаются не отдельными средствами, а в едином техническом решении. Это происходит за счет электромагнитной связи резервируемых межсоединений в неоднородном диэлектрическом заполнении. Для анализа эволюции способов использована идея линий развития технических систем из теории решения изобретательских задач. **Новизна:** в способах МР впервые осуществляется модальная фильтрация, используя именно резервные межсоединения. Кроме того, способы МР, их особенности, достоинства и недостатки, а также эволюция, были впервые рассмотрены в единой работе. **Результат:** системное представление новых способов резервирования, позволяющих обеспечить ЭМС РЭА за счет модальной фильтрации. **Практическая значимость:** открыта возможность комплексного и эффективного развития МР для повышения надежности и обеспечения ЭМС критичной РЭА; обеспечена основа для успешного выполнения проекта РНФ №19-19-00424.

Ключевые слова: резервирование, электромагнитная совместимость, межсоединения, печатная плата, модальное разложение, сверхкороткий импульс.

Введение

Работа большинства систем управления, связи и безопасности основана на радиоэлектронной аппаратуре (РЭА). Недостаточное внимание к повышению надежности и обеспечению электромагнитной совместимости (ЭМС) РЭА, как правило, недопустимо для таких систем, особенно в транспортной, атомной, военной и космической отраслях. Из них показательна последняя, поскольку необходимо повышение срока активного существования космических аппаратов (КА) до 15–20 лет. Поэтому активно ведутся исследования по резервированию.

Свежим примером отечественных исследований может служить ряд работ, представленных на конференции «НПЦ «Полус», г. Томск. Так, рассмотрено повышение надежности бортовой РЭА космического аппарата (КА) [1].

Библиографическая ссылка на статью:

Шарафутдинов В. Р., Газизов Т. Р. Анализ способов резервирования на основе модальной фильтрации // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 3. С. 117-144. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10307.

Reference for citation:

Sharafutdinov V. R., Gazizov T. R. Analysis of reservation methods based on modal filtration. *Systems of Control, Communication and Security*, 2019, no. 3, pp. 117-144. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10307 (in Russian).

Предложены конструктивные решения, позволяющие защитить высоковольтные узлы бортовой РЭА от возникновения и развития электрической дуги, тем самым открывая перспективы дальнейшего увеличения мощности систем электропитания КА [2]. Для микропроцессорного управления системой электропитания КА используют резервирование на два отказа [3]. Предложено совмещение горячего и холодного резервирований, позволяющее исключить недостатки классических методов: исчезновение (просадка) выходного напряжения при переключении на холодный резерв и увеличение срока службы преобразователя по сравнению с горячим резервом [4].

Активно ведутся исследования по резервированию и зарубежными исследователями. Так, рассмотрена специальная топология кольцевой шины питания КА для максимального повышения её работоспособности за счет многокритериальной оптимизации [5]. Обсуждается оптимальная топологическая структура системы источника питания и распределения электропитания КА [6]. Описана оптимизация характеристик специальных синхронизируемых систем с холодным резервированием [7]. Представлена система-в-корпусе, предназначенная для критически важных приложений, и имеющая аналого-цифровой преобразователь и оперативную память с тройным резервированием, канал RS-232 и интерфейс CAN с двойным резервированием [8]. Рассмотрен программный инструментарий для проектирования конфигураций с резервированием [9]. Рассмотрено моделирование различных схем резервирования на микроспутнике X-Sat, чтобы убедиться в их достаточном количестве для достижения трехлетнего срока службы [10].

Однако вопросы обеспечения ЭМС систем с резервированием освещаются лишь небольшим числом исследователей. Так, например, рассмотрено влияние пространственного разнесения печатных проводников на помехозащищенность резервированных систем [11, 12]. Между тем, есть возможности совместного повышения надежности и обеспечения ЭМС.

Общеизвестным путем повышения надежности является холодное резервирование, когда при отказе функционирующей цепи подается питание на другую, не задействованную ранее. Пример резервируемой и резервирующей схем, расположенных рядом на одной стороне печатной платы (ПП), показан в 3D-виде на рис. 1, а реального блока с их расположением на разных сторонах металлического основания – на фотографиях рис. 2. При работе одной схемы другая не используется и почти не оказывает влияния на её работу. При отказе одной начинает работать другая. Между тем резервные устройства кратно увеличивают массу, размеры и стоимость РЭА, что часто неприемлемо: например, в космических аппаратах, подводных лодках и при массовом производстве, соответственно. При этом все более обостряющаяся проблема ЭМС требует принятия дополнительных мер, ещё более ухудшающих указанные характеристики. Поэтому, надо использовать новые способы повышения надежности и обеспечения ЭМС РЭА.

Недавно предложен новый способ трассировки печатных трасс для цепей с резервированием, позволяющий обеспечить ЭМС РЭА за счет известного принципа модальной фильтрации [13], но используя именно резервные межсо-

единения [14]. На этой основе предложено 8 способов резервирования [15–22], не только повышающих надежность, но и обеспечивающих ЭМС, используя модальное разложение нежелательного сигнала, за счет электромагнитной связи между резервируемым и резервирующими проводниками в неоднородной диэлектрической среде. Сделаны отдельные попытки систематизировать предложенное, кратко называемое модальным резервированием (МР). Так, сравнивалась эффективность модальной фильтрации в некоторых способах однократного МР [23], детально описана логика перехода от однократного МР к трехкратному [22], выполнено полезное для реализации трёхкратного МР качественное сравнение микрополоскового и зеркально-симметричного модальных фильтров [24]. Однако отсутствует системное представление предложенных способов, их особенностей, достоинств и недостатков в единой работе. Между тем оно стало бы весьма полезным: в общем – для эффективного развития и широкого использования этих способов в своих целях любыми заинтересованными, и в частности – для успешного выполнения работ и получения ожидаемых результатов исполнителями реализуемого в ТУСУРе в 2019–2021 гг. проекта «Модальное резервирование электрических цепей критичных радиоэлектронных средств и систем» Российского научного фонда. Цель данной работы – восполнить этот пробел, представив эволюцию МР.

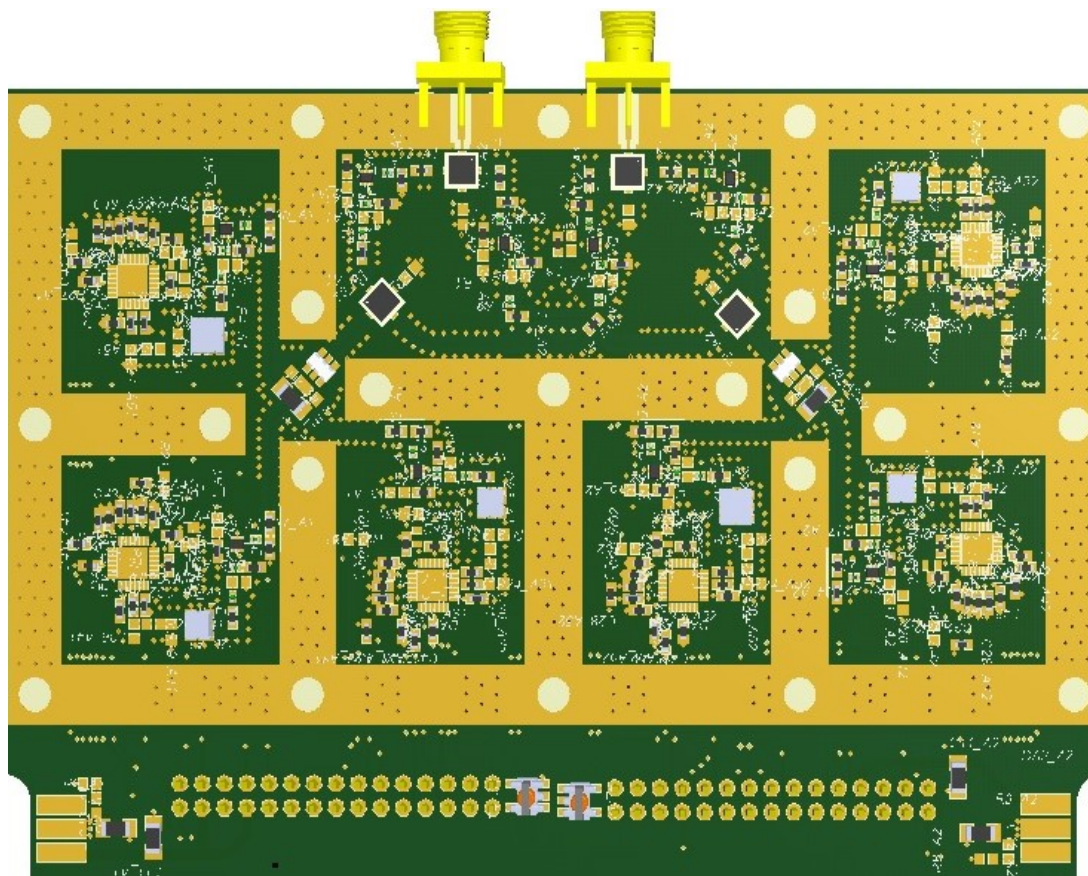
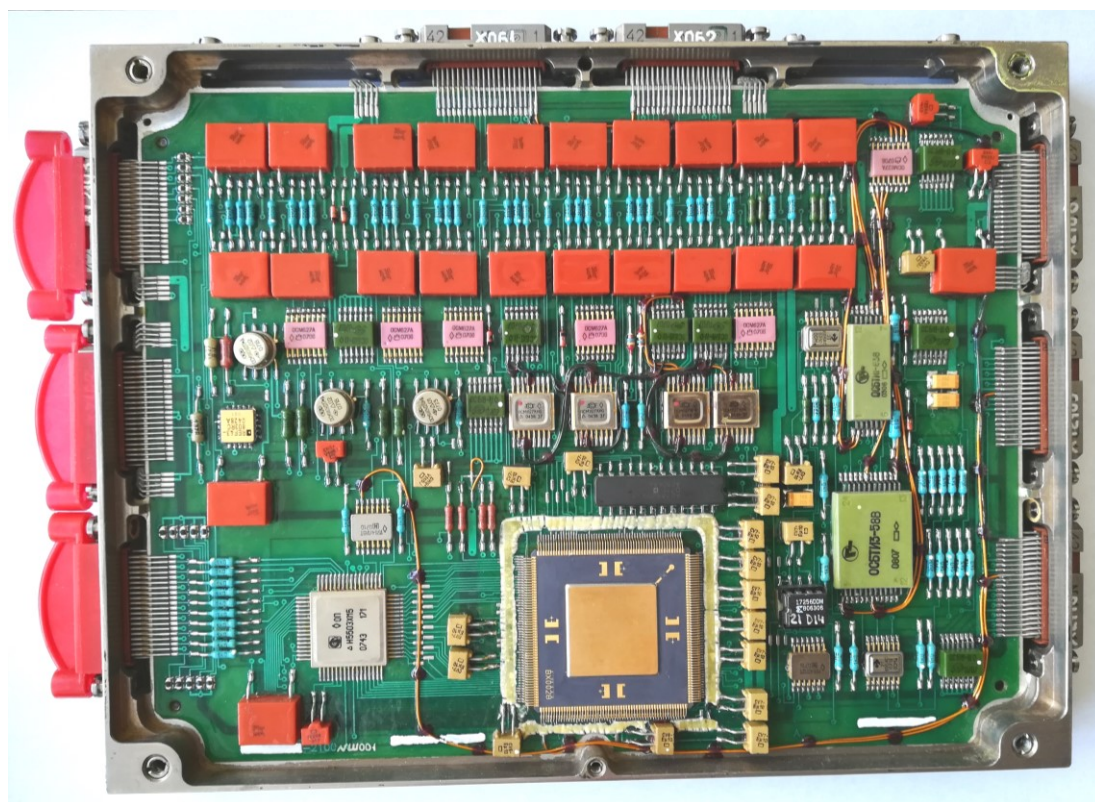
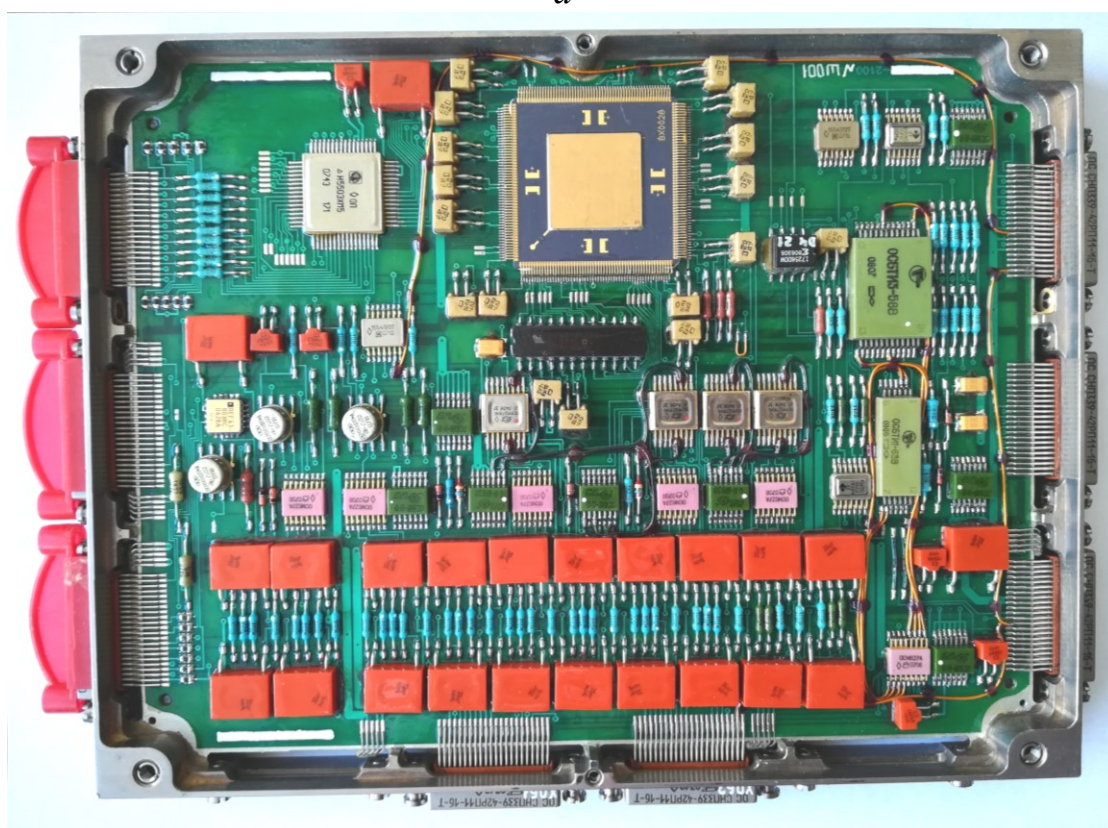


Рис. 1. 3D-вид резервируемой и резервной схем на одной стороне печатной платы



а



б

Рис. 2. Фотографии резервируемой и резервной печатных плат на сторонах А (а) и Б (б) основания

1. Способы однократного модального резервирования

Применяя описанные ниже способы, оригинальность которых подтверждается получением на них патентов на изобретения [15–20], можно добиться уменьшения восприимчивости рассматриваемых цепей к внешним кондуктивным эмиссиям и уменьшения уровня кондуктивных эмиссий от этих цепей. В случае выхода из строя резервируемой цепи, в резервной цепи будет достигаться аналогичный результат. Он достигается за счет того, что помеховый импульс, длительность которого меньше абсолютного значения разности задержек четной и нечетной мод в структуре связанной линии, образованной парой проводников резервируемой и резервной цепей, подвергается модальным искажениям, проявляющимся в разложении на импульсы меньшей амплитуды. При гармонической же помехе её амплитуда на определенных частотах минимизируется за счет того, что её четная и нечетная моды оказываются в противофазе. Естественно, что на этих частотах можно ожидать уменьшения не только кондуктивных, но и излучаемых эмиссий, равно как и уменьшения восприимчивости, не только к кондуктивным, но и излучаемым воздействиям.

Для доказательства реализуемости этих способов далее представлены результаты моделирования (без учета потерь) конкретных структур длиной 1 м, в котором импульсная помеха (в форме трапеции с ЭДС 2 В и длительностями фронта, спада и плоской вершины по 100 пс) подавалась между резервируемой трассой (активным проводником) и опорным проводником, а функцию резервной трассы выполнял пассивный проводник. В них наблюдается обусловленное разностью задержек мод в структуре разложение импульсной помехи на импульсы меньшей амплитуды, позволяющее уменьшить восприимчивость резервируемой цепи к внешним кондуктивным эмиссиям. При гармоническом воздействии с ЭДС 2 В на частотной зависимости выходного напряжения наблюдается ослабление исходного сигнала, вплоть до нуля, на определенных частотах, позволяющее значительно ослабить помеховые сигналы в определенном частотном диапазоне.

1.1. Способ трассировки печатных проводников цепей с резервированием

В работе [15] предложен способ трассировки печатных проводников цепей с резервированием (рис. 3). Он включает трассировку резервируемых и резервных проводников с опорным проводником в виде отдельного слоя. При этом резервируемая и резервная цепи имеют один опорный проводник, а резервируемые и резервные проводники одноименных цепей прокладываются парами, параллельно друг другу, на одном слое, с минимально допустимым зазором между ними. Геометрические параметры проводников структуры: $d=w=300$ мкм, $s=100$ мкм, $t=65$ мкм. Толщина диэлектрической подложки $h=510$ мкм, относительная диэлектрическая проницаемость подложки $\epsilon_r=10$.

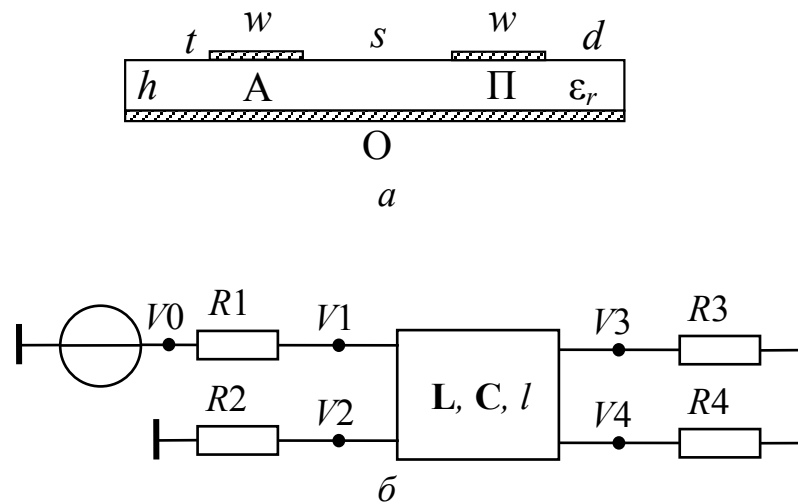


Рис. 3. Поперечное сечение структуры связанных линий, где проводники: А – активный; О – опорный; П – пассивный (а). Принципиальная схема (б)

Результаты квазистатического моделирования временного отклика на ближнем и дальнем концах резервируемой трассы (узлы $V1$ и $V3$ на рис. 3б) показывают 2 импульса разложения с амплитудами 0,5 В (рис. 4), что в 2 раза меньше уровня импульсной помехи (1 В) в начале линии. Номинал резисторов R здесь и далее, если не указано иначе, выбран равным среднему геометрическому волновых сопротивлений четной и нечетной мод. Сравнение частотных откликов предложенной структуры и одиночной микрополосковой линии (МПЛ) показывает возможности ослабления помех на определенных частотах (рис. 5).

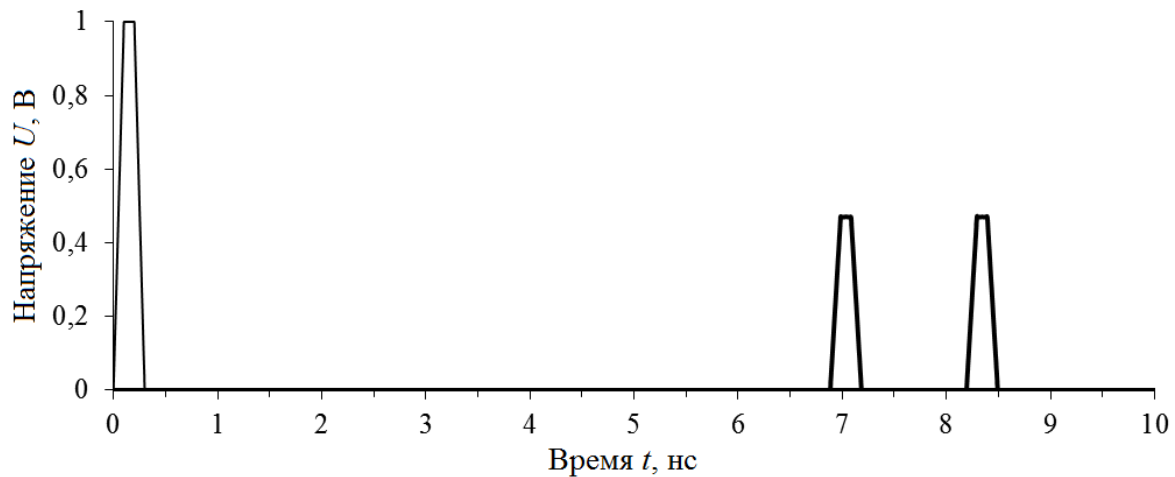


Рис. 4. Формы напряжения в начале (—) и конце (—) активного проводника структур

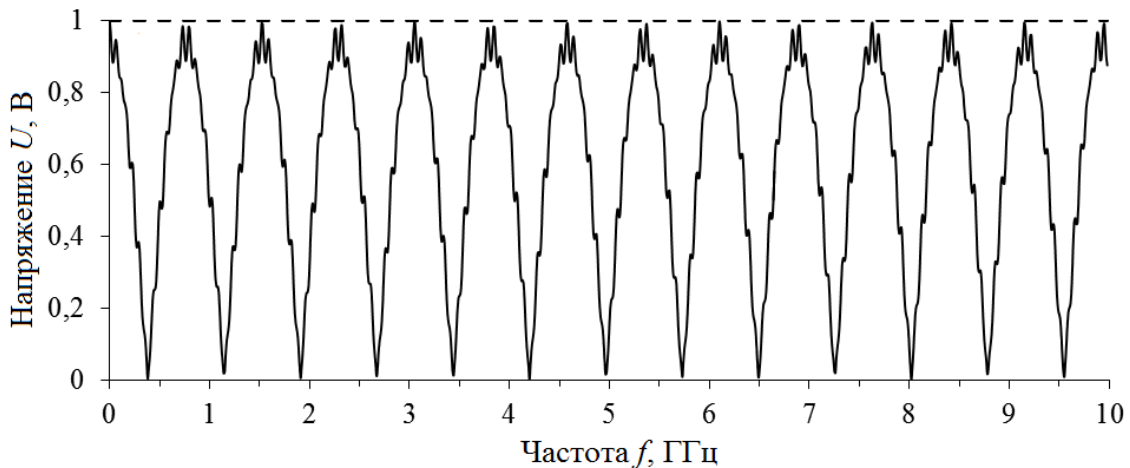


Рис. 5. Частотные отклики на гармоническое воздействие связанной линии (—) и одиночной МПЛ (---)

1.2. Способ трассировки печатных проводников

с дополнительным диэлектриком для цепей с резервированием

В работе [16] предложен другой способ трассировки печатных проводников для цепей с резервированием (рис. 6). Он отличается от предыдущего тем, что зазор между резервируемым и резервным проводниками заполнен диэлектрическим материалом, и его относительная диэлектрическая проницаемость больше, чем у материала подложки печатной платы. Геометрические параметры проводников структуры: $d=w=300$ мкм, $s=100$ мкм, $t=65$ мкм. Толщина диэлектрической подложки $h=510$ мкм, относительная диэлектрическая проницаемость подложки $\epsilon_{r1}=4,2$.

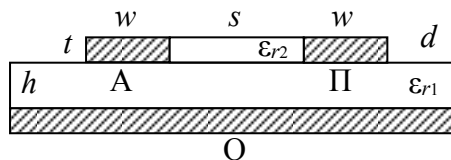


Рис. 6. Поперечное сечение структуры связанных линий, где проводники: А – активный; О – опорный; П – пассивный

Результаты квазистатического моделирования временного отклика на ближнем и дальнем концах резервируемой трассы (узлы $V1$ и $V3$ на рис. 3б) при $\epsilon_{r2}=29$ показывают 2 импульса разложения с амплитудами менее 0,5 В (рис. 7), что в 2 раза меньше уровня импульсной помехи (1 В) в начале линии. Сравнение частотных откликов предложенной структуры и одиночной МПЛ показывает возможности ослабления помех на определенных частотах (рис. 8).

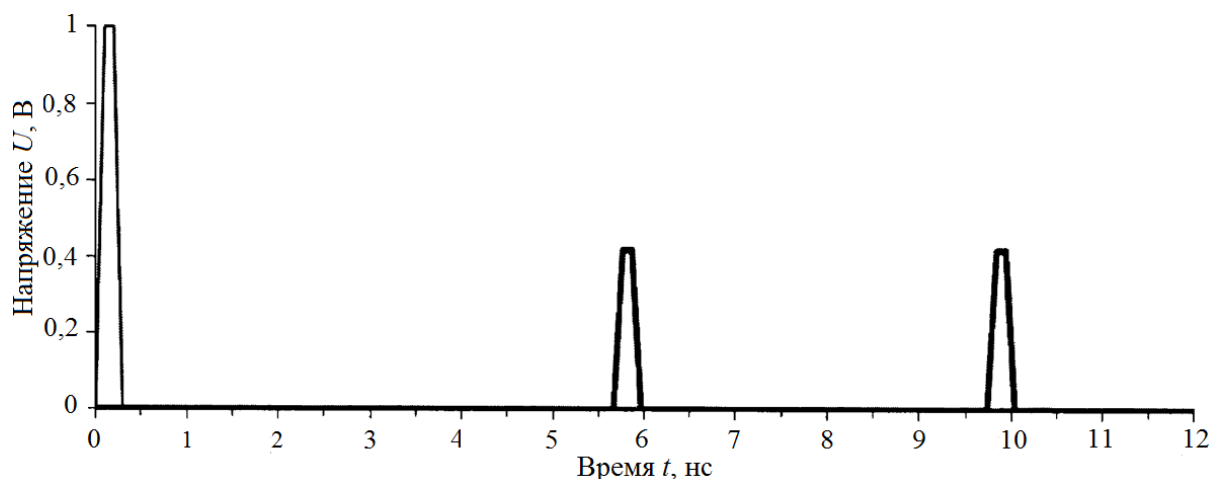


Рис. 7. Формы напряжения в начале (—) и конце (—) активного проводника структуры

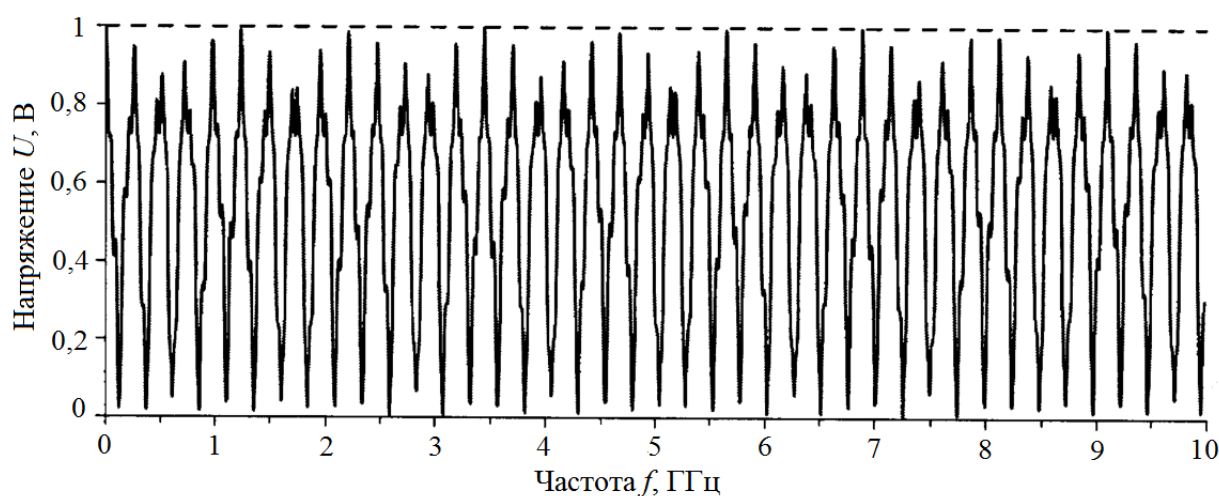


Рис. 8. Частотные отклики на гармоническое воздействие связанной линии (—) и одиночной МПЛ (— —)

Изменение значения относительной диэлектрической проницаемости заполнения зазора между трассами (рис. 9) влияет на разность погонных задержек нечетной и четной мод структуры ($\Delta\tau$), позволяя увеличить её абсолютное значение ($\Delta\tau = -0,8$ нс/м при $\epsilon_{r2}=1$; $\Delta\tau = 4$ нс/м при $\epsilon_{r2}=29$). Это позволяет управлять значением длительности импульса и частоты гармонического воздействия, для которых возможно модальное разложение.



Рис. 9. Зависимость $\Delta\tau$ от ϵ_{r2}

1.3. Способ резервирования для печатных плат

В работе [17] предложен способ резервирования для печатных плат (рис. 10). Здесь компоновка и трассировка резервируемой цепи выполняются на верхнем слое подложки, сигнальные проводники выполняются за счет зазоров в опорной проводящей пластине, а компоновка и трассировка резервной цепи выполняются на нижнем слое подложки зеркально верхнему слою. При этом резервируемые и резервные сигнальные проводники одноименных цепей располагаются друг под другом, а оставшиеся проводники электрически соединяются между собой. Геометрические параметры проводников структуры: $w=300$ мкм, $w_1=600$ мкм, $s=60$ мкм, $t=105$ мкм. Толщина диэлектрической подложки $h=290$ мкм, относительная диэлектрическая проницаемость подложки $\epsilon_r=5$. Номинал резисторов R выбран равным среднему геометрическому волновых сопротивлений четной и нечетной мод эквивалентной двухпроводной линии.

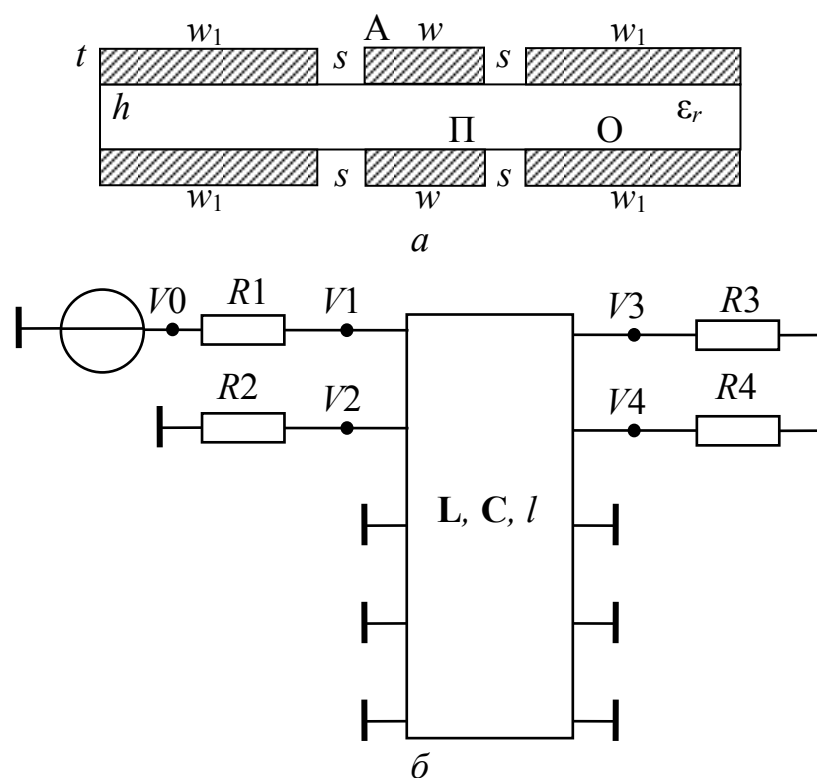


Рис. 10. Поперечное сечение линии, где проводники: А – активный; О – опорный; П – пассивный (а). Принципиальная схема (б)

Результаты квазистатического моделирования временного отклика на ближнем и дальнем концах резервируемой трассы (узлы V_1 и V_3 на рис. 10б) показывают импульсы разложения с амплитудами 0,5 и 0,4 В, что в 2 раза меньше уровня импульсной помехи в начале линии (0,8 В) или половины ЭДС (1 В) (рис. 11). Результаты моделирования частотного отклика (рис. 12) показывают возможности ослабления помеховых сигналов на определенных частотах.

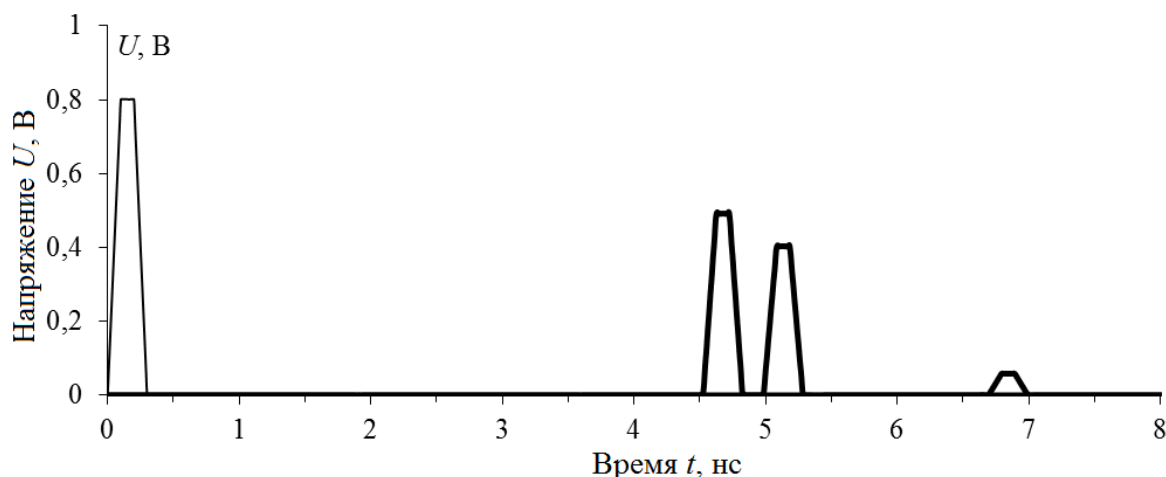


Рис. 11. Формы напряжения в начале (—) и конце (—) активного проводника линии

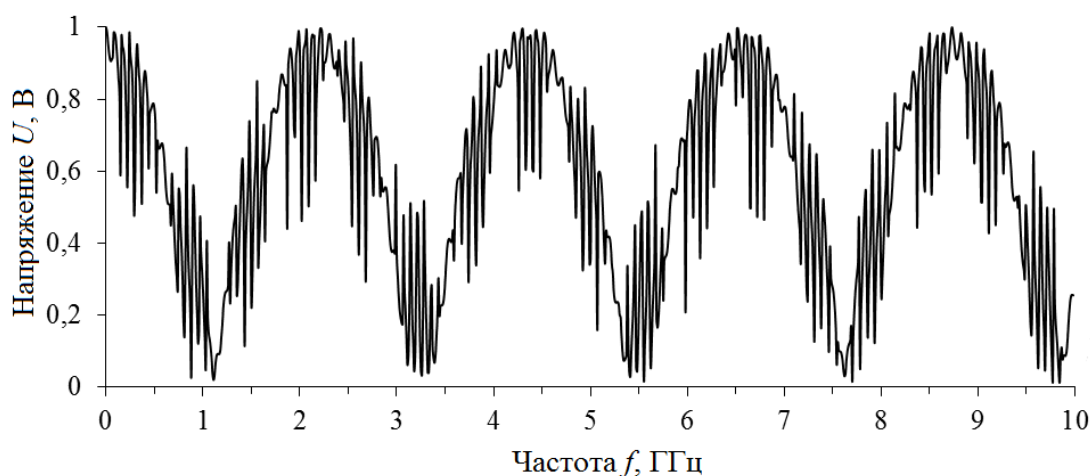


Рис. 12. Частотный отклик на гармоническое воздействие

1.4. Способ компоновки печатных плат для цепей с резервированием

В работе [18] предложен способ компоновки печатных плат (рис. 13), включающий взаимное расположение, компоновку и трассировку резервируемой и резервной плат. Он отличается тем, что опорный проводник выполнен в виде отдельных слоев на резервируемой и резервной платах, которые склеиваются слоем диэлектрика с относительной диэлектрической проницаемостью большей, чем у диэлектрических подложек резервируемой и резервной плат. При этом соответствующие друг другу трассы резервируемой и резервной цепей расположены параллельно и друг под другом в склеивающем слое диэлектрика, а резервируемые и резервные радиоэлектронные компоненты размещаются на противоположных склеиваемым сторонах плат. Геометрические параметры проводников структуры: $w=300$ мкм, $t=65$ мкм. Толщина слоя диэлектрика $h=510$ мкм, толщина подложки $h_1=200$ мкм, относительная диэлектрическая проницаемость слоя диэлектрика $\epsilon_{r2}=29$, а подложки плат $\epsilon_{r1}=5$. Разность значений относительной диэлектрической проницаемости подложек плат и слоя диэлектрика влияет на разность погонных задержек нечетной и четной мод структуры ($\Delta\tau$), которая для данной структуры составляет 6,5 нс/м (рис. 14).

Номинал всех резисторов выбран равным среднему геометрическому волновых сопротивлений четной и нечетной мод эквивалентной связанной линии.

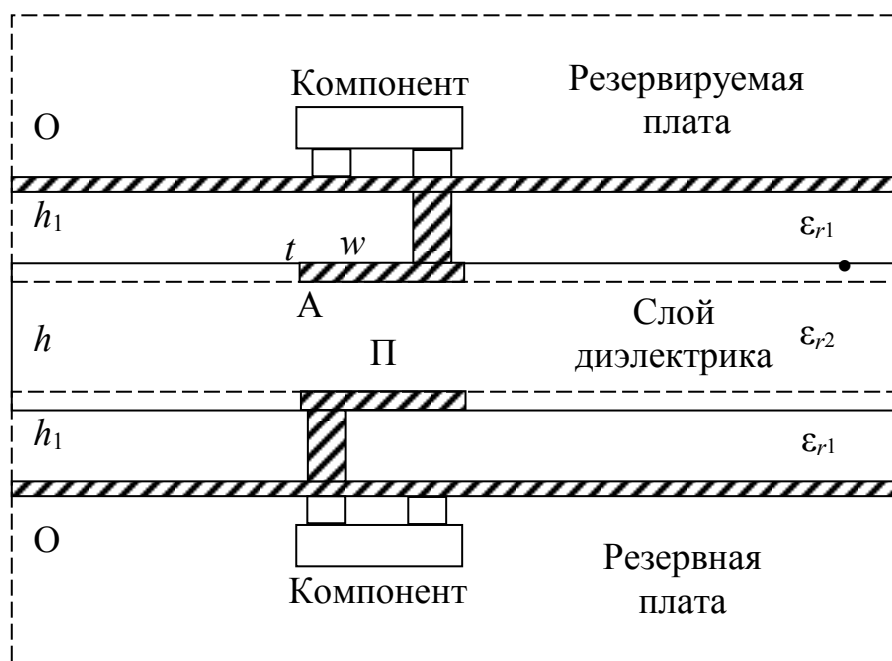


Рис. 13. Поперечное сечение структуры, реализующей способ, где проводники: А – активный; О – опорный; П – пассивный

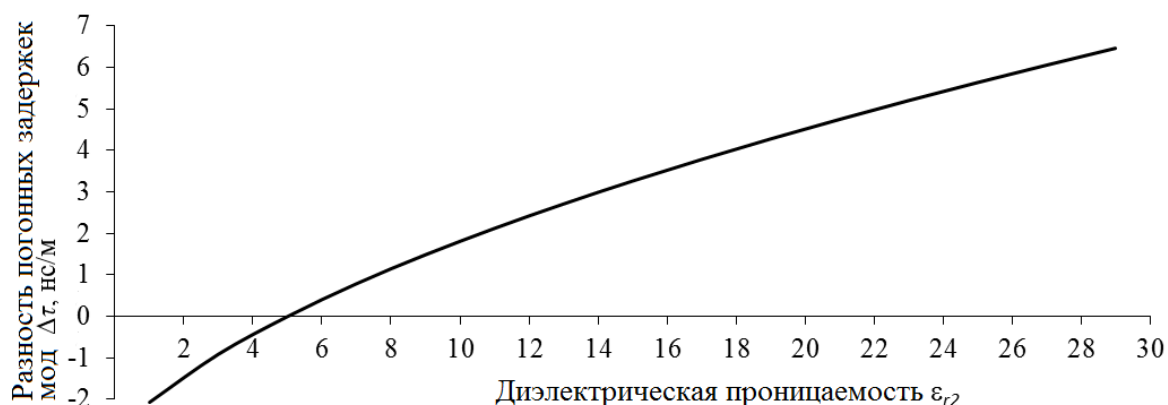


Рис. 14. Зависимость $\Delta\tau$ от ϵ_{r2}

Результаты квазистатического моделирования временного отклика на ближнем и дальнем концах резервируемой трассы (узлы $V1$ и $V3$ на рис. 3б) показывают 2 импульса разложения с амплитудами 0,4 В (рис. 15), что в 2,5 раза меньше уровня импульсной помехи (1 В) в начале линии. Сравнение частотных откликов предложенной структуры и одиночной МПЛ показывает возможности ослабления помех на определенных частотах (рис. 16).

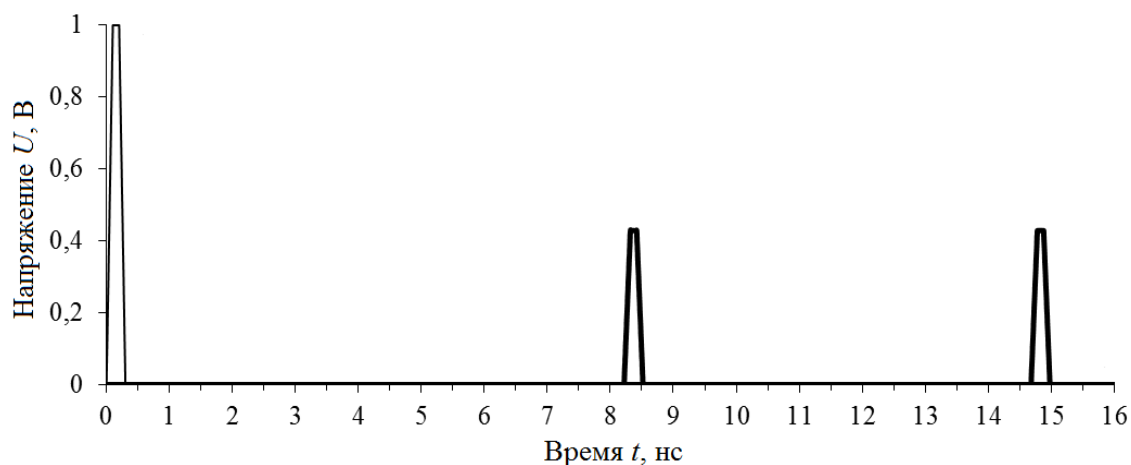


Рис. 15. Формы напряжения в начале (—) и конце (—) активного проводника структуры

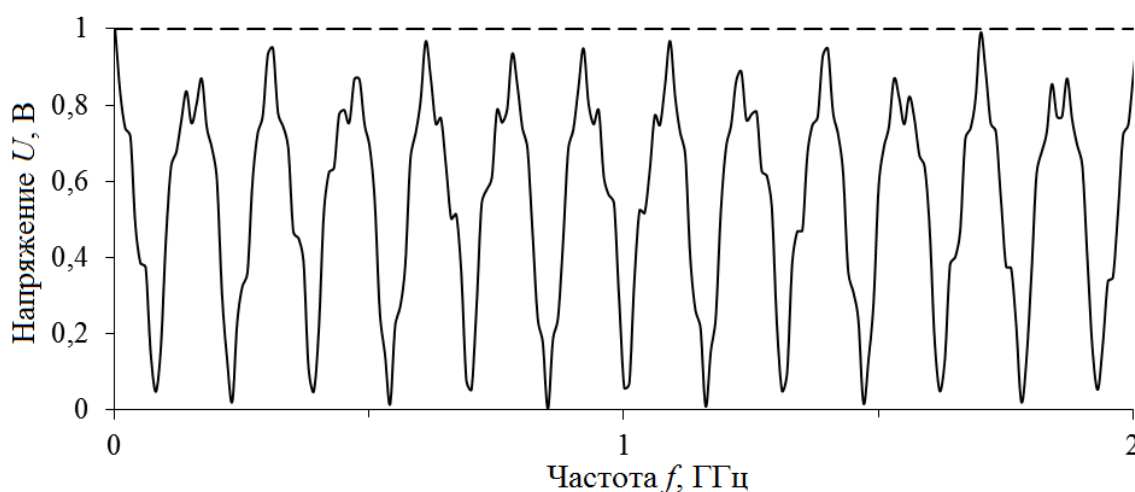


Рис. 16. Частотные отклики на гармоническое воздействие рассматриваемой структуры (—) и одиночной МПП (— —)

1.5. Способ внутренней компоновки печатных плат для цепей с резервированием

В работе [19] предложен другой способ компоновки печатных плат (рис. 17). Он отличается от предыдущего тем, что резервируемые и резервные компоненты размещаются не на внешних, а на внутренних сторонах резервируемой и резервной печатных плат в слое склеивающего диэлектрика. Геометрические параметры проводников структуры: $w=300$ мкм, $t=65$ мкм. Толщина слоя склеивающего диэлектрика $h=510$ мкм, расстояние от подложки до полигона земли $h_1=500$ мкм, относительная диэлектрическая проницаемость слоя склеивающего диэлектрика $\epsilon_{r2}=10$, а подложки плат – $\epsilon_{r1}=5$.

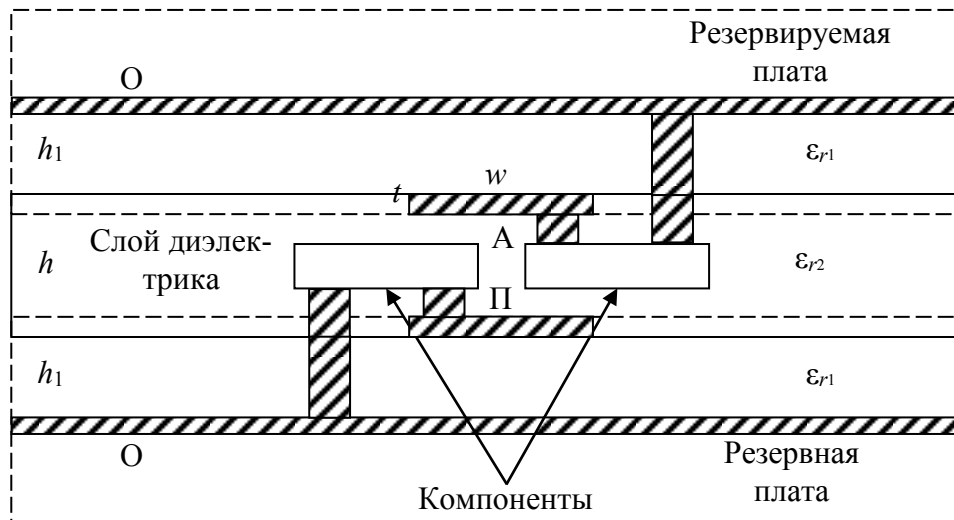


Рис. 17. Поперечное сечение структуры, реализующей способ внутренней компоновки, где проводники: А – активный; О – опорный; П – пассивный

Разность значений относительной диэлектрической проницаемости подложек плат и слоя диэлектрика между ними влияет на разность погонных задержек нечетной и четной мод структуры ($\Delta\tau$), которая для данной структуры составляет 2 нс/м (рис. 18)



Рис. 18. Зависимость $\Delta\tau$ от ϵ_{r2}

Результаты квазистатического моделирования временного отклика на ближнем и дальнем концах резервируемой трассы (узлы $V1$ и $V3$ на рис. 3б) показывают 2 импульса разложения с амплитудами 0,44 В (рис. 19), что в 2,25 раза меньше уровня импульсной помехи (1 В) в начале линии. Сравнение частотных откликов предложенной структуры и одиночной МПЛ показывает возможности ослабления помех на определенных частотах (рис. 20).

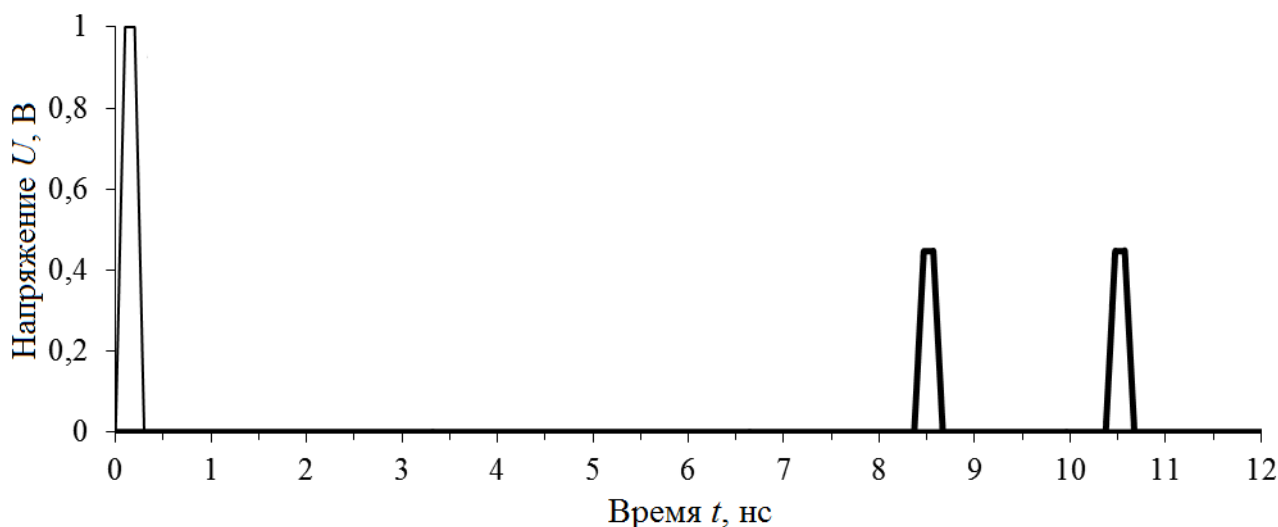


Рис. 19. Формы напряжения в начале (—) и конце (---) активного проводника структуры

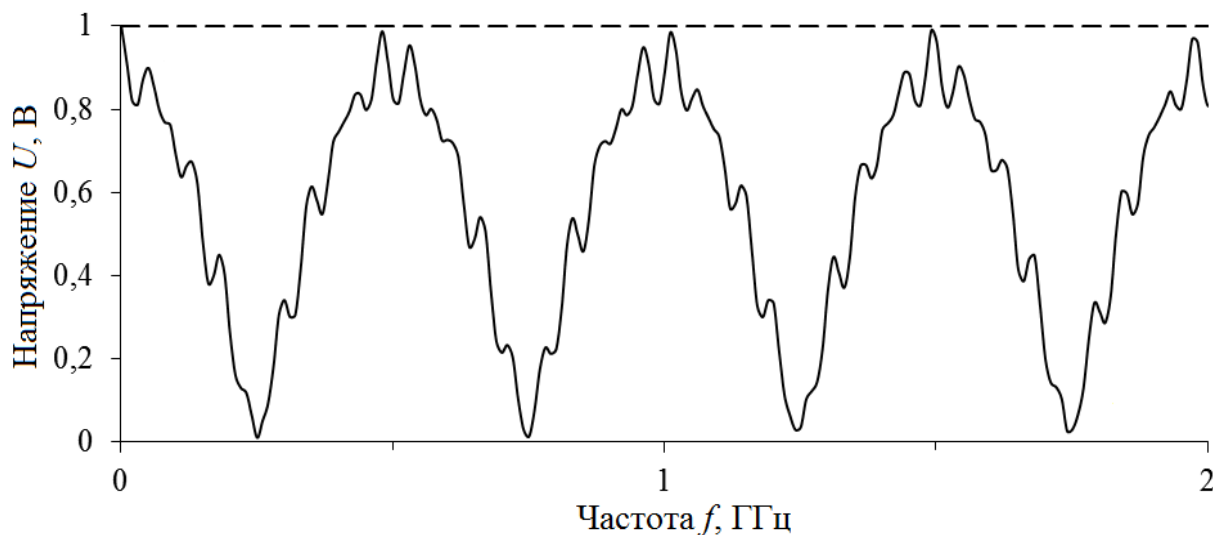


Рис. 20. Частотные отклики на гармоническое воздействие рассматриваемой структуры (—) и одиночной МПЛ (---)

1.6. Способ резервирования плоских кабелей

В работе [20] предложен способ резервирования плоских кабелей (рис. 21). Он отличается тем, что проводники резервируемого кабеля располагаются на одном уровне, а резервного – на другом. При этом одноименные проводники этих кабелей располагаются друг под другом в диэлектрическом слое. Геометрические параметры проводников структуры: $d=500$ мкм, $w=65$ мкм, $s=60$ мкм, $t=5$ мкм. Толщина структуры $H=25$ мкм, толщина слоя между проводниками $h=5$ мкм, относительная диэлектрическая проницаемость слоя $\epsilon_r=4$. Номинал резисторов $R3$ и $R6$, $R7$ и $R8$ выбран равным 50 Ом; $R1$, $R2$, $R4$ и $R5$ – 1000 Ом (холостой ход). Резисторы $R3$ и $R6$, $R7$ и $R8$ представляют собой нагрузку резервируемой и резервной цепей соответственно. Резисторы $R1$, $R2$, $R4$, $R5$ введены в схему для учета гальванической связи резервного кабеля с землей резервируемой цепи.

Импульсная помеха подавалась между активным и опорным проводниками резервируемой цепи, функцию резервного плоского кабеля выполняют пас-

сивные проводники. Результаты квазистатического моделирования временного отклика на ближнем и дальнем концах резервируемой трассы (узлы $V3$ и $V6$ на рис. 21б) показывают 2 импульса разложения с амплитудами 0,22 и 0,32 В (рис. 22), что в 3 – 5 раз меньше уровня импульсной помехи (1 В) в начале линии.

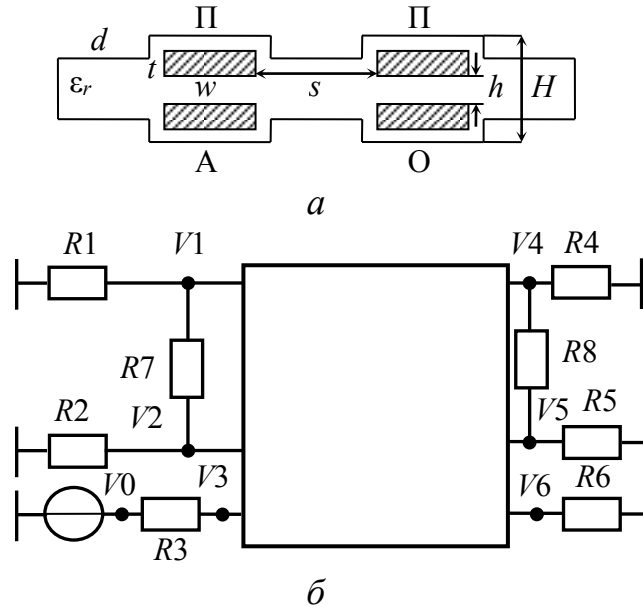


Рис. 21. Поперечное сечение структуры, где проводники: А – активный; О – опорный; П – пассивный (а). Принципиальная схема (б)

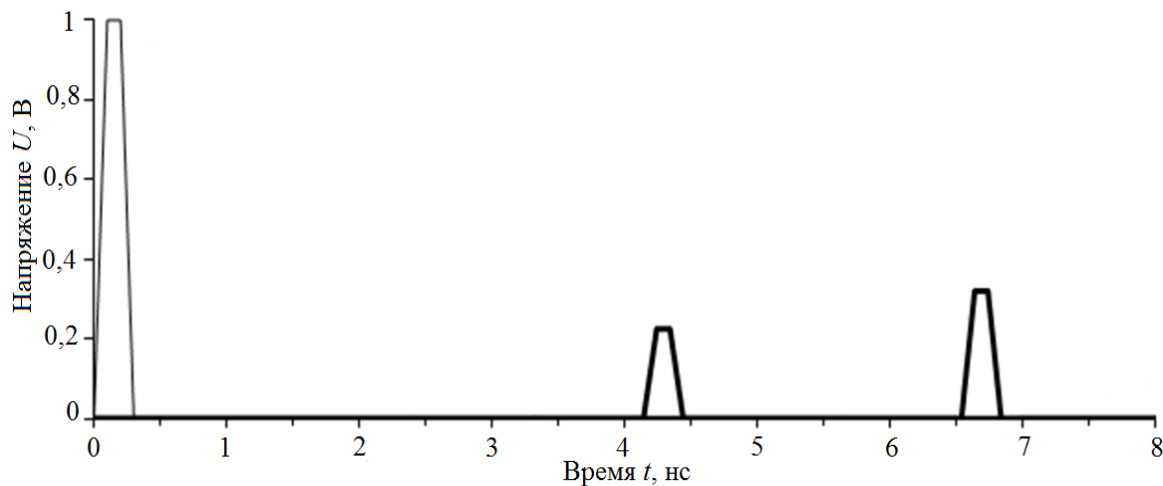


Рис. 22. Формы напряжения в начале (—) и конце (—) активного проводника структуры

2. Способы трехкратного модального резервирования

Ниже описаны два способа трёхкратного резервирования, включающих многое из отмеченного в начале раздела по однократному резервированию, отличие от которого заключается в добавлении двух дополнительных резервных цепей. При этом воздействующий сигнал может разлагаться не на две моды (четную и нечетную), а четыре. При воздействии импульса амплитуды импульсов разложения могут быть меньше.

2.1. Способ трехкратного резервирования цепей в многослойных печатных платах

В работе [21] предложен способ трехкратного резервирования цепей (рис. 23а). Он похож на способ компоновки печатных плат из разд. 1.4, но отличается тем, что дополнительно введены две резервные цепи. При этом соответствующие друг другу фрагменты трасс резервируемой и резервных цепей располагаются параллельно друг другу в склеивающем слое диэлектрика, так что резервируемая и одна резервная цепи располагаются на резервируемой плате, а две другие резервные цепи располагаются на резервной плате. Геометрические параметры проводников структуры: $w=430$ мкм, $t=105$ мкм, $s=50$ мкм. Толщина диэлектрической подложки $h_2=130$ мкм, расстояние от подложки до полигона земли $h_1=1000$ мкм, относительная диэлектрическая проницаемость слоя диэлектрика $\epsilon_{r2}=20$, а подложек плат – $\epsilon_{r1}=4,25$. Номинал резисторов R выбран равным 30 Ом. Погонные задержки мод равны 6,9; 8,3; 11,5; 13,6 нс/м. Они вычислены как корень квадратный из собственных значений произведения матриц погонных коэффициентов электромагнитной и электростатической индукции четырехпроводной полосковой линии передачи, образованной при реализации предлагаемого способа.

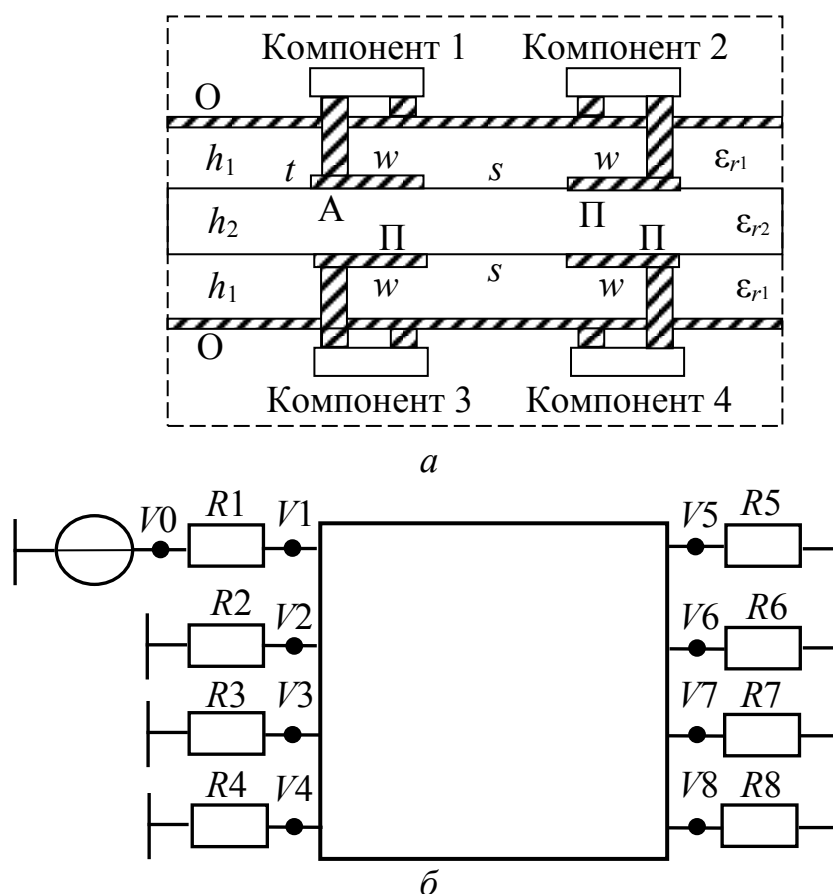


Рис. 23. Поперечное сечение структуры печатной платы, реализующей способ трехкратного резервирования, где проводники А – активный; О – опорный; П – пассивный (а). Принципиальная схема (б)

Импульсная помеха подавалась между резервируемой трассой (активный проводник) и опорным проводником, функцию резервных трасс выполняли

пассивные проводники. Результаты квазистатического моделирования временного отклика на ближнем и дальнем концах резервируемой трассы (узлы $V1$ и $V5$ на рис. 23б) показывают 4 импульса разложения с амплитудами 0,12; 0,24; 0,16 и 0,19 В соответственно (рис. 24), максимальная из которых в 4 раза меньше половины амплитуды воздействующей ЭДС.

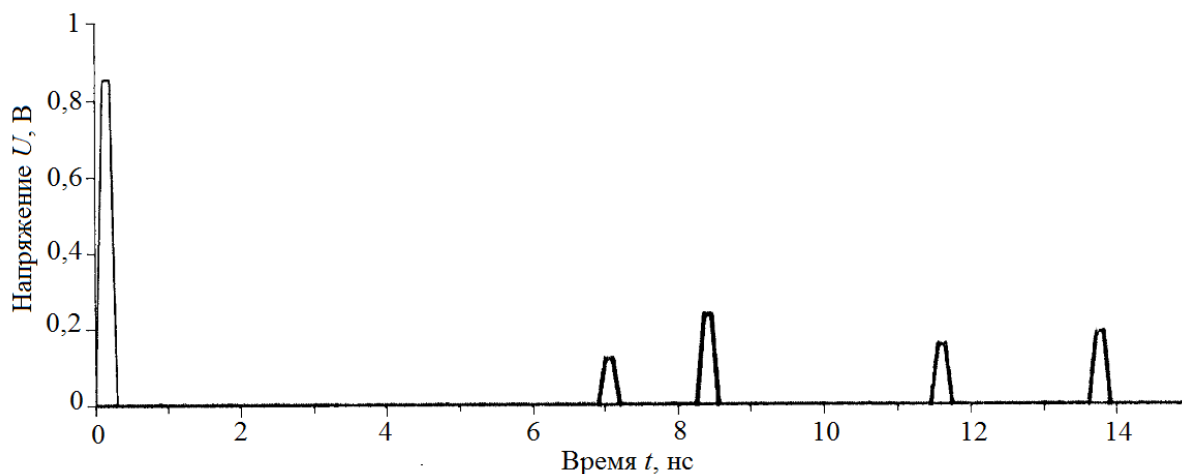


Рис. 24. Формы напряжения в начале (—) и конце (—) активного проводника структуры

2.2. Способ трехкратного резервирования межсоединений

В работе [22] предложен способ трехкратного резервирования межсоединений (рис. 25а). Он похож на способ резервирования для печатных плат из разд. 1.3, но отличается тем, что каждый сигнальный проводник делится посредством зазора на 2 одинаковых проводника. Геометрические параметры проводников: $w=0,185$ мм, $w_1=100$ мм, $s=0,315$ мм, $d=0,630$ мм, $t=0,035$ мм. Толщина диэлектрической подложки $h=0,5$ мм; диэлектрическая проницаемость подложки $\epsilon_r=4,5$.

При моделировании опорным проводником полагался один из крайних, тогда как 3 остальных полагались соединенными с ним на концах. СКИ подавался между резервируемым проводником (А) и одним из опорных (О). Функцию резервных проводников выполняют пассивные (П). Номинал резисторов $R1-R8$ взят равным (132 Ом) диагональным значениям (они одинаковы в силу зеркальной симметрии по двум плоскостям) матрицы импедансов Z . Результаты квазистатического моделирования временного отклика на ближнем и дальнем концах резервируемого проводника (узлы $V1$ и $V5$ на рис. 25б) показывают импульсы разложения с амплитудами около 0,25 В, т.е. ослабление в 4 раза (рис. 26).

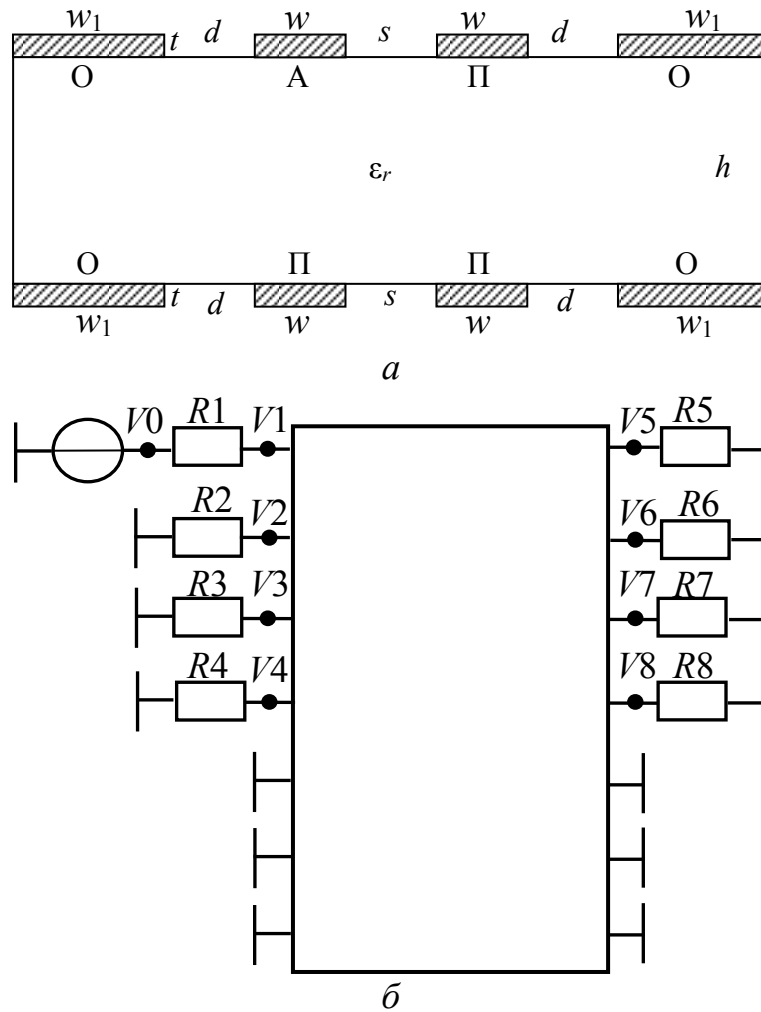


Рис. 25. Поперечное сечение (а) и схема моделирования (б) для способа трехкратного резервирования на основе двусторонней ПП

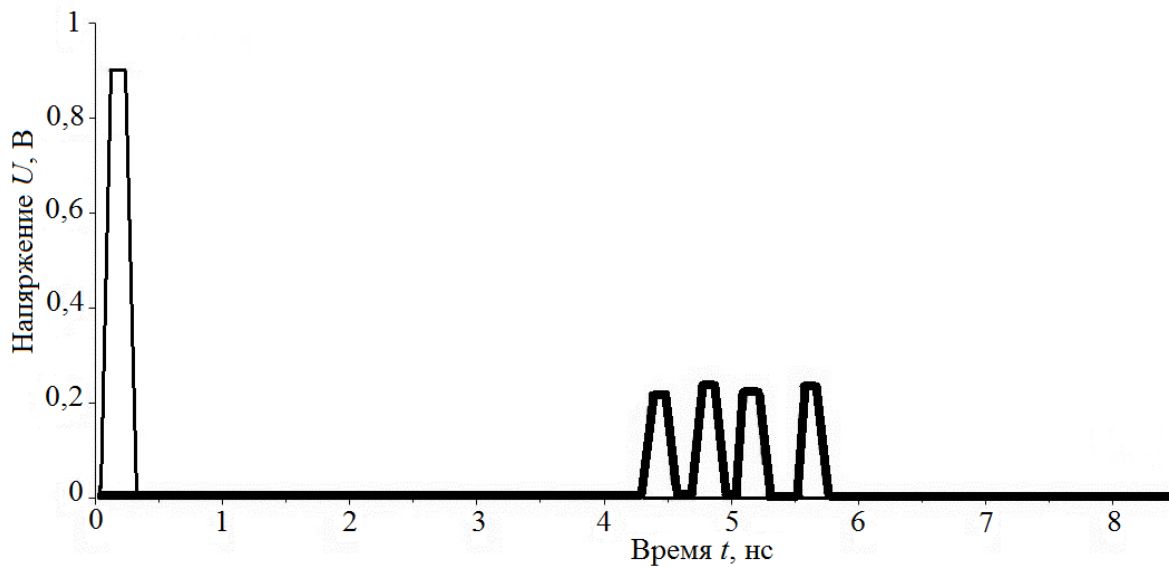


Рис. 26. Формы напряжения в начале (—) и конце (—) активного проводника структуры

3. Специфика, достоинства и недостатки способов модального резервирования

Приведем краткий сравнительный анализ специфики, достоинств и недостатков представленных способов однократного и трехкратного МР.

3.1. Способ трассировки печатных проводников цепей с резервированием

Специфика. Базовый способ реализации. Обеспечивает торцевую связь между резервируемой и резервной трассами.

Достоинство. Реализация не требует сложного технического процесса изготовления печатных плат.

Недостатки. Реализация удобна только с компонентами, где резервная и резервируемая части выполнены в одном корпусе, а выводы – симметрично, либо попарно. Контроль ослабления и разности задержек мод можно осуществлять относительно малым набором и в малом диапазоне параметров поперечного сечения. Из-за торцевой связи, коэффициент ослабления, как правило, не превышает 2, а разность погонных задержек мод – 2 нс/м.

3.2. Способ трассировки печатных проводников с дополнительным диэлектриком для цепей с резервированием

Специфика. Отличается от базового способа реализации наличием дополнительного диэлектрического заполнения между резервируемой и резервной трассами. Для улучшения характеристик модальной фильтрации его относительная диэлектрическая проницаемость должна быть значительно больше, чем у подложки. При этом значение погонной задержки нечетной моды больше, чем четной. Разность погонных задержек может менять знак.

Достоинства. Дополнительным диэлектрическим заполнением можно обеспечить более высокую разность погонных задержек мод и контролировать ее за счет выбора значения относительной диэлектрической проницаемости заполнения. С учетом реальных параметров стека ПП разность погонных задержек мод варьируется в довольно широком диапазоне 0,2...3,5 нс (частота первого нуля в диапазоне 0,14...2,7 ГГц). Несмотря на торцевую связь, коэффициент ослабления может быть более 2.

Недостатки. Реализация удобна только с компонентами, где резервная и резервируемая части выполнены в одном корпусе, а выводы – симметрично, либо попарно. Нанесение дополнительного покрытия для заполнения промежутка между резервируемой и резервной трассами усложняет технологию производства ПП.

3.3. Способ резервирования для печатных плат

Специфика. Проводящие слои ДПП заполнены полигонами, являющимися опорными слоями для резервируемой и резервной трасс. Обеспечивает лицевую связь между резервируемой и резервной трассами.

Достоинства. Лицевая связь обеспечивает высокие значения ослабления и разности погонных задержек. Реализация способа не требует МПП, а возможна даже для ДПП.

Недостатки. Нарушается целостность опорного слоя. Затрудняется реализация плотной трассировки. Проводники опорного слоя могут заужаться.

3.4. Способ компоновки печатных плат для цепей с резервированием

Специфика. Размещение компонентов на противоположных склеиваемым сторонах резервируемой и резервной ПП. Обеспечение лицевой связи между резервируемой и резервной трассами. Опорный проводник выполнен в форме двух полигонов. С учетом реальных параметров стека ПП и длины трасс, разность задержек мод может достигать 6 нс (частота первого нуля больше 0,083 ГГц).

Достоинства. Реализация не требует сложной технологии и сложной перетрассировки, поскольку резервируемые и резервные трассы выполнены на отдельных внутренних слоях МПП. Нет ограничений на элементную базу. Полигоны земли и питания выполняют роль экранов для межсоединений, находящихся на внутренних слоях.

Недостатки. Сложность изготовления, поскольку требуется технология МПП. Реализация требует установки компонентов на обе стороны МПП.

3.5. Способ внутренней компоновки печатных плат для цепей с резервированием

Специфика. Компоновка компонентов внутри ПП. Обеспечение лицевой связи между резервируемой и резервной трассами.

Достоинство. Не только трассы, но и компоненты, экранированы полигонами опорных слоев.

Недостатки. Возможно использование только бескорпусной элементной базы. Габариты компонентов ограничивают снизу толщину диэлектрического слоя между полосками, ухудшая характеристики модальной фильтрации. Сложность реализации и изготовления.

3.6. Способ резервирования плоских кабелей

Специфика. Единственная реализация для плоского кабеля. Обеспечивает лицевую связь между резервируемой и резервной трассами. Опорные проводники выполнены в виде отдельных трасс, так что вдоль структуры распространяется более двух мод.

Достоинства. Обладает самым большим значением разности задержек мод, достигающим (с учетом реальных длин до 10 м) 19 нс (частота первого нуля снижается до 0,026 ГГц). Реализация не требует сложной технологии. При длинном кабеле (до ПП) позволяет значительное дополнительное ослабление помехи. Возможно внедрение в шлейф дополнительных трасс, которые будут выполнять функцию пассивного проводника.

Недостатки. Реализация может потребовать перепроектирования соединителей.

3.7. Способ трехкратного резервирования цепей в многослойных печатных платах

Специфика. По сравнению со способом компоновки печатных плат для цепей с резервированием, симметрично вводятся две дополнительные резервные цепи. Размещение компонентов на противоположных склеиваемых сторонах резервируемой и резервной ПП. Обеспечение лицевой и торцевой связей между резервируемой и резервными трассами. Опорный проводник выполнен в форме двух полигонов.

Достоинства. Трехкратное резервирование. Лицевая связь обеспечивает высокие значения ослабления и разности погонных задержек. Реализация не требует сложной технологии и сложной перетрассировки, поскольку резервируемые и резервные трассы выполнены на отдельных внутренних слоях МПП. Нет ограничений на элементную базу. Полигоны земли и питания выполняют роль экранов для межсоединений, находящихся на внутренних слоях.

Недостатки. Сложность изготовления, поскольку требуется технология МПП. Реализация требует установки компонентов на обе стороны МПП.

3.8. Способ трехкратного резервирования межсоединений

Специфика. По сравнению со способом резервирования для печатных плат, симметрично вводятся две дополнительные резервные цепи. Проводящие слои ДПП заполнены полигонами, являющимися опорными слоями для резервируемой и резервных трасс. Обеспечение лицевой и торцевой связей между резервируемой и резервными трассами.

Достоинства. Трехкратное резервирование. Лицевая связь обеспечивает высокие значения ослабления и разности погонных задержек. Реализация способа не требует МПП, а возможна даже для ДПП.

Недостатки. Нарушается целостность опорного слоя. Затрудняется реализация плотной трассировки. Проводники опорного слоя могут заужаться.

Заключение

Несмотря на относительно малое количество способов МР, важно представить их эволюцию, что позволит быстро увеличить их количество в ближайшем будущем. Для этого можно взять за основу, так называемые, «линии развития», успешно использованные для любых технических систем в теории решения изобретательских задач [25]. Тогда, для рассмотренных и будущих способов МР, а возможно, и для устройств на их основе, можно представить следующие линии развития МР:

1. Создание устройств на основе способа (различные устройства на основе одного способа, различные устройства на основе нескольких способов).
2. Трансформация опорного проводника (две плоскости, одна плоскость, одна плоскость и проводники, только проводники).

3. Использование опорного проводника для защиты компонентов (компоненты вблизи опорной плоскости, компоненты между опорными плоскостями).
4. Использование диэлектриков (существующих, дополнительных).
5. Увеличение кратности резервирования (однократное, многократное).
6. Использование симметрии (асимметрия, центральная симметрия, зеркальная симметрия по одной плоскости, зеркальная симметрия по двум плоскостям).
7. Совершенствование защиты от различных воздействий: по числу проводников (дифференциальное, синфазное и др.); по видам (гармоническое, периодические импульсы, одиночный импульс, электростатический разряд и др.); по параметрам (амплитуда, длительность, период повторения и др.).
8. Использование на разных структурных уровнях: плата, кабель, компонент, совместное.

Таким образом, впервые в единой работе, системно представлены недавно предложенные способы МР, рассмотрены их особенности, достоинства и недостатки, а также сделана попытка показать эволюцию способов МР с помощью линий их развития. Это открывает возможность системного и эффективного развития представленных способов для одновременного, в едином техническом решении, повышения надежности и обеспечения ЭМС критичной РЭА. Важно, что это достигается, не вводя дополнительных затратных аппаратных средств, а лишь за счет электромагнитной связи резервируемых межсоединений в неоднородном диэлектрическом заполнении, приводящей к явлению модального разложения нежелательного сигнала в цепях с МР. Примечательно, что при МР могут улучшаться показатели всех четырех аспектов ЭМС: кондуктивных эмиссий, излучаемых эмиссий, восприимчивости к кондуктивным эмиссиям, восприимчивости к излучаемым эмиссиям. Наилучшие показатели для особо важных (для конкретных приложений) из этих аспектов могут достигаться выбором весовых коэффициентов при многокритериальной оптимизации структур и параметров, обеспечивающих МР.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №19-19-00424) в ТУСУРе.

Литература

1. Бганцева С. М., Ягудина Ю. В. Обеспечение надежности бортовой аппаратуры космического аппарата // Научно-техническая конференция молодых специалистов “Электронные и электромеханические системы и устройства” (Томск, 12-13 апреля 2018 г.). – Томск, 2018. – С. 293–294.
2. Бугай Т. В., Быков В. В., Гильжинский А. М. Рекомендации по проектированию печатных плат для обеспечения защиты космической аппаратуры от возникновения и развития дугового разряда // Научно-техническая конференция молодых специалистов “Электронные и

электромеханические системы и устройства” (Томск, 12-13 апреля 2018 г.). – Томск, 2018. – С. 72–73.

3. Хандорин М. М., Карпов Е. В., Иванов Д. В. Прибор управления системой электропитания с резервированным на два отказа микропроцессорным устройством управления // Научно-техническая конференция молодых специалистов “Электронные и электромеханические системы и устройства” (Томск, 12-13 апреля 2018 г.). – Томск, 2018. – С. 9–12.

4. Чучупало А. М., Дерябин В. В. Метод резервирования силового преобразователя, имеющего в составе не менее трех силовых блоков, и способ контроля их работоспособности // Научно-техническая конференция молодых специалистов “Электронные и электромеханические системы и устройства” (Томск, 12-13 апреля 2018 г.). – Томск, 2018. – С. 52–54.

5. Momoh A. J., Xu K. Maximizing serviceability of a ring-bus power system in a spacecraft by implementing multiple objectives // 2005/2006 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition (Dallas, TX, 21-24 May 2006). – Dallas, 2006. – P. 909–914.

6. Lingjie K., Shanshui Y., Li W. Analysis on power supply and distribution system for spacecraft based on reliability // 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE) (Lille, 2-6 September 2013). – Lille, 2013. – P. 1–9.

7. Yu J., Hu T., Yang J. Redundancy optimization of standby phased-mission systems // 2010 International Conference on Intelligent Computing and Integrated Systems (Guilin, 22-24 October 2010). – Guilin, 2010. – P. 395–398.

8. Jiménez J., Bidarte U., Cuadrado C. SafeSoC: a fault-tolerant-by-redundancy evaluation card for high speed serial communications // Design of Circuits and Integrated Systems (DCIS), Conference on (Granada, 23-25 November 2016). – Granada, 2016. – P. 1–4.

9. Anwer J., Platzner M., Meisner S. FPGA redundancy configurations: an automated design space exploration // Parallel & Distributed Processing Symposium Workshops (IPDPSW), IEEE International (Phoenix, AZ, 19-23 May 2014). – Phoenix, 2014. – P. 275–280.

10. Mok Y. L., Goh C. H., Segaran R.C. Redundancy modeling for the X-sat microsatellite system // Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS) (Orlando, FL, 28-31 January 2013). – Orlando, 2013. – P. 1–6.

11. Degraeve A., Pissoort D. Study of the effectiveness of spatially EM-diverse redundant systems under plane-wave illumination // Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC) (Shenzhen, 17-21 May). – Shenzhen, 2016. – P. 211–213.

12. Degraeve A., Pissoort D. Study of the effectiveness of spatially EM-diverse redundant systems under reverberation room condition // 2016 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC) (Ottawa, ON, 25-29 July 2016). – Ottawa, 2016. – P. 374–378.

13. Заболоцкий А. М., Газизов Т. Р. Модальные фильтры для защиты бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата. Монография –

Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2013. – 151 с.

14. Газизов Т. Р., Орлов П. Е., Заболоцкий А. М., Буичкин Е. Н. Новый способ трассировки печатных проводников цепей с резервированием // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2015. № 3. С. 129-131.

15. Газизов Т. Р., Орлов П. Е., Шарафутдинов В. Р., Кузнецова-Таджибаева О. М., Заболоцкий А. М., Куксенко С. П., Буичкин Е. Н. Способ трассировки печатных проводников цепей с резервированием // Патент на изобретение № 2603850, опубл. 10.12.2016, бюл. № 34.

16. Газизов Т. Р., Орлов П. Е., Шарафутдинов В. Р., Кузнецова-Таджибаева О. М., Заболоцкий А. М., Куксенко С. П., Буичкин Е. Н. Способ трассировки печатных проводников с дополнительным диэлектриком для цепей с резервированием // Патент на изобретение № 2603851 РФ, МПК H04B 15/00, опубл. 10.12.2016, бюл. № 34.

17. Газизов Т. Р., Орлов П. Е., Шарафутдинов В. Р., Кузнецова-Таджибаева О. М., Заболоцкий А. М., Куксенко С. П., Буичкин Е. Н. Способ резервирования для печатных плат // Патент на изобретение № 2015137547/07, опубл. 10.12.2016, бюл. № 34.

18. Газизов Т. Р., Орлов П. Е., Шарафутдинов В. Р., Кузнецова-Таджибаева О. М., Заболоцкий А. М., Куксенко С. П., Буичкин Е. Н. Способ компоновки печатных плат для цепей с резервированием // Патент на изобретение № 2015137532/07, опубл. 23.03.2017, бюл. № 9.

19. Газизов Т. Р., Орлов П. Е., Шарафутдинов В. Р., Кузнецова-Таджибаева О. М., Заболоцкий А. М., Куксенко С. П., Буичкин Е. Н. Способ внутренней компоновки печатных плат для цепей с резервированием // Патент на изобретение МПК H04B 15/02, № 2015137548/07, опубл. 05.07.2017, бюл. № 19.

20. Газизов Т. Р., Орлов П. Е., Шарафутдинов В. Р., Кузнецова-Таджибаева О. М., Заболоцкий А. М., Куксенко С. П., Буичкин Е. Н. Способ резервирования плоских кабелей // Патент на изобретение МПК H04B 15/00, № 2015156667/07, опубл. 10.12.2016, бюл. № 34.

21. Газизов Т. Р., Орлов П. Е., Шарафутдинов В. Р. Способ трехкратного резервирования цепей в многослойных печатных платах // Патент на изобретение МПК H 04B 15/02, № 2017113045/07, опубл. 02.08.2018, бюл. № 22.

22. Шарафутдинов В. Р., Газизов Т. Р. Новый способ трёхкратного резервирования межсоединений // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2019. № 2 (22). С. 26-30.

23. Orlov P., Gazizov T, Buichkin E. Evaluation of efficiency of modal filtration in different types of redundant electrical connections // Proceedings of the IX International Siberian Conference on Control and Communications (Moscow, 12-14 may 2016). – Moscow, 2016. – P. 1-3.

24. Chernikova E., Belousov A., Zabolotsky A. Comparative analysis of microstrip and reflection symmetric four-conductor modal filters // Proceedings of the

XII International Siberian Conference on Control and Communications (Tomsk, 18-20 April 2019). – Tomsk, 2019. – P. 1-4.

25. Альтшуллер Г. С., Злотин Б. Л., Зусман А. В., Филатов В. И. Поиск новых идей: от озарения к технологии // Теория и практика решения изобретательских задач. – Кишинёв: Картя Молдовенска, 1989. – 381 с.

References

1. Bgantseva S. M., Yagudina Yu. V. Obespecheniye nadezhnosti bortovoy apparatury kosmicheskogo apparata [Ensuring the reliability of spacecraft onboard equipment]. *Nauchno-tehnicheskaya konferentsiya molodykh spetsialistov “Elektronnyye i elektromekhanicheskiye sistemy i ustroystva* [Scientific and Technical Conference of Young Specialists “Electronic and Electromechanical Systems and Devices”]. Tomsk, 2018, pp. 293-294 (in Russian).

2. Bugai T. V., Bykov V. V., Gilzhinsky A. M. Rekomendatsii po proyektirovaniyu pechatnykh plat dlya obespecheniya zashchity kosmicheskoy apparatury ot vozniknoveniya i razvitiya dugovogo razryada [Recommendations on the design of printed circuit boards to protect space equipment from the occurrence and development of an arc discharge]. *Nauchno-tehnicheskaya konferentsiya molodykh spetsialistov “Elektronnyye i elektromekhanicheskiye sistemy i ustroystva* [Scientific and Technical Conference of Young Specialists “Electronic and Electromechanical Systems and Devices”]. Tomsk, 2018, pp. 72-73 (in Russian).

3. Handorin M. M., Karpov E. V., Ivanov D. V. Pribor upravleniya sistemoy elektropitaniya s rezervirovannym na dva otkaza mikroprotsessornym ustroystvom upravleniya [Power supply control device with a microprocessor control device redundant for two failures]. *Nauchno-tehnicheskaya konferentsiya molodykh spetsialistov “Elektronnyye i elektromekhanicheskiye sistemy i ustroystva* [Scientific and Technical Conference of Young Specialists “Electronic and Electromechanical Systems and Devices”]. Tomsk, 2018, pp. 9-12 (in Russian).

4. Chuchupalo A. M., Deryabin V. V. Metod rezervirovaniya silovogo preobrazovatelya, imeyushchego v sostave ne menee trekh silovykh blokov, i sposob kontrolya ikh rabotosposobnosti [The method of backup power converter having at least three power blocks, and a method for monitoring their performance]. *Nauchno-tehnicheskaya konferentsiya molodykh spetsialistov “Elektronnyye i elektromekhanicheskiye sistemy i ustroystva* [Scientific and Technical Conference of Young Specialists “Electronic and Electromechanical Systems and Devices”]. Tomsk, 2018, pp. 52-54 (in Russian).

5. Momoh A. J., Xu K. Maximizing serviceability of a ring-bus power system in a spacecraft by implementing multiple objectives. *2005/2006 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibitio*. Dallas, 2006, pp. 909–914.

6. Lingjie K., Shanshui Y., Li W. Analysis on power supply and distribution system for spacecraft based on reliability. *15th European Conference on Power Electronics and Applications*. Lille, 2013, pp. 1–9.

7. Yu J., Hu T., Yang J. Redundancy optimization of standby phased-mission systems. *Intelligent Computing and Integrated Systems, International Conference on*. Guilin, 2010, pp. 395–398.

8. Jiménez J., Bidarte U., Cuadrado C. SafeSoC: a fault-tolerant-by-redundancy evaluation card for high speed serial communications. *Design of Circuits and Integrated Systems, Conference on*. Granada, 2016, pp. 1–4.

9. Anwer J., Platzner M., Meisner S. FPGA redundancy configurations: an automated design space exploration. *Parallel and Distributed Processing Symposium Workshops, IEEE International*. Phoenix, 2014, pp. 275–280.

10. Mok Y. L., Goh C. H., Segaran R.C. Redundancy modeling for the X-sat microsatellite system. *Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium*. Orlando, 2013, pp. 1–6.

11. Degraeve A., Pissoort D. Study of the effectiveness of spatially EM-diverse redundant systems under plane-wave illumination. *Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Shenzhen, 2016, pp. 211–213.

12. Degraeve A., Pissoort D. Study of the effectiveness of spatially EM-diverse redundant systems under reverberation room condition. *2016 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Ottawa, 2016, pp. 374–378.

13. Zabolotsky A. M., Gazizov T. R. *Modal'nyye fil'try dlya zashchity bortovoy radioelektronnoy apparatury kosmicheskogo apparata. Monografija* [Modal filters for the protection of the onboard electronic equipment of the spacecraft. Monography]. Tomsk, State University of Control Systems and Radioelectronics Publ., 2013. 151 p. (in Russian).

14. Gazizov T. R., Orlov P. E., Zabolotsky A. M., Buichkin E. N. New method of routing of the printed conductors of redundant circuits. *Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*, 2015, no 3, pp. 129–131 (in Russian).

15. Gazizov T. R., Orlov P. E., Sharafutdinov V. R., Kuznetsova-Tadzhibaeva O. M., Zabolotsky A. M., Kuksenko S. P., Buichkin E. N. *Sposob trassirovki peshatnih provodnikov chepei s rezervirovaniem* [Method of routing printed conductors of circuits with redundancy]. Patent Russia, no. 2603850. 2016.

16. Gazizov T. R., Orlov P. E., Sharafutdinov V. R., Kuznetsova-Tadzhibaeva O. M., Zabolotsky A. M., Kuksenko S. P., Buichkin E. N. *Sposob trassirovki peshatnih provodnikov s dopolnitelnim dielektrikom dlya cepei s rezervirovaniem* [Method of routing printed conductors with additional dielectric for circuits with redundancy]. Patent Russia, no. 2603851. 2016.

17. Gazizov T. R., Orlov P. E., Sharafutdinov V. R., Kuznetsova-Tadzhibaeva O. M., Zabolotsky A. M., Kuksenko S. P., Buichkin E. N. *Sposob rezervirovaniia dlya peshatnih plat* [Reservation method for printed circuit boards]. Patent Russia, no. 2603843. 2016.

18. Gazizov T. R., Orlov P. E., Sharafutdinov V. R., Kuznetsova-Tadzhibaeva O. M., Zabolotsky A. M., Kuksenko S. P., Buichkin E. N. *Sposob kompanovki peshatnih plat dlya cepei s rezervirovaniem* [Printed circuit boards with reserve circuits arrangement method]. Patent Russia, no. 2614156. 2017.

19. Gazizov T. R., Orlov P. E., Sharafutdinov V. R., Kuznetsova-Tadzhibaeva O. M., Zabolotsky A. M., Kuksenko S. P., Buichkin E. N. *Sposob vnutrennei kompanovki peshatnih plat dlya cepei s rezervirovaniem* [Printed circuit boards with reserve circuits arrangement method]. Patent Russia, no. 2624637. 2017.

20. Gazizov T. R., Orlov P. E., Sharafutdinov V. R., Kuznetsova-Tadzhibaeva O. M., Zabolotsky A. M., Kuksenko S. P., Buichkin E. N. *Sposob rezervirovaniia ploskih cablei* [Method of flat cables backing up]. Patent Russia, no. 2603848. 2016.

21. Gazizov T. R., Orlov P. E., Sharafutdinov V. R. *Sposob trehkratnogo rezervirovaniia cepei v mnogosloinnykh peshatnykh platakh* [Method of circuit triple reservation in multilayered printed circuit boards]. Patent Russia, no. 2663230. 2018.

22. Sharafutdinov V. R. and Gazizov T. R. New method for triple reservation of interconnects. *Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*, 2019, no. 2, pp. 26–30 (in Russian).

23. Orlov P., Gazizov T., Buichkin E. Evaluation of efficiency of modal filtration in different types of redundant electrical connections. *Proceedings of the 9th International Siberian Conference on Control and Communications*. Moscow, 2016, pp. 1–3.

24. Chernikova E., Belousov A., Zabolotsky A. Comparative analysis of microstrip and reflection symmetric four-conductor modal filters. *Proceedings of the 12th International Siberian Conference on Control and Communications*. Tomsk, 2019, pp. 1–4.

25. Altshuller G. S., Zlotin B. L., Zusman A. V., Filatov V. I. *Poisk novykh idey: ot ozareniya k tekhnologii. Teoriya i praktika resheniya izobretatel'skikh zadach* [The Search for New Ideas: From Illumination to Technology. Theory and practice of solving inventive problems]. Kishinev, Map of Moldovenskiy Publ., 1989. 381 p. (in Russian).

Статья поступила 29 августа 2019 г.

Информация об авторах

Шарафутдинов Виталий Расимович – аспирант кафедры телевидения и управления. Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: конструирование, электромагнитная совместимость. E-mail: dovod@bk.ru

Газизов Тальгат Рашитович – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой телевидения и управления. Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: электромагнитная совместимость; численные методы. E-mail: talgat@tu.tusur.ru
Адрес: 634050, г. Томск, пр. Ленина 40.

Analysis of the reservation methods with modal filtration base

V. R. Sharafutdinov, T. R. Gazizov

Problem statement. *Insufficient attention to reliability and electromagnetic compatibility (EMC) of radio electronic equipment (REE) for systems of control, communication and security is, usually, impermissible. To improve REE reliability a known way, called «cold backup» is used. It means that when functioning circuit fails, the power is supplied to another one, which do not used earlier. When the first circuit is func-*

tioning, another one do not used, and, practically, do not influenced on the first one's working process. When the first circuit fails, another one takes over the functioning. But, backup devices greatly increase REE characteristics, such as weight, size and cost, which is often unacceptable. Heavily growing EMC issue, which requires additional measures, worsens the indicated characteristics. Therefore, it is important to develop new methods, which would increase the REE reliability and REE EMC ensuring. **The purpose of the work** is to provide a systematic view of new backup methods, known as modal reservation (MR) ways, which allow to ensure REE EMC by applying modal filtration. **Methods used.** Reliability and EMC are achieved in a single technical solution, rather than by using separate means. Electromagnetic coupling effect which appears in the reserved and reserving interconnects of a nonhomogeneous dielectric filling allows to reach REE reliability and REE EMC. To analyze the methods evolution, a technical systems evolution lines idea from the Theory of Inventive Problem Solving is used. **Novelty.** A modal filtration using reservation interconnects is realized in MR methods for the first time. Moreover, it is the first time when peculiarities, benefits, drawbacks and evolution of the MR methods are considered in a single work. The systematic view of new approaches to MR which allows to provide REE EMC using modal filtration is the **result of the work**. **Practical relevance:** Widely and effectively ways of the developing of MR approach to increase reliability and EMC ensuring of critical REE are discovered. Also the basis for successful completion of RSF project 19-19-00424 is received.

Key words: reservation, electromagnetic compatibility, interconnects, printed circuit board, modal decomposition, ultrashort pulse.

Information about Authors

Vitaly Rasimovich Sharafutdinov – graduate student of the Department of Television and Control. Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. Field of research: designing; electromagnetic compatibility. E-mail: dovod@bk.ru

Talgat Rashitovich Gazizov – Dr. habil. of Engineering Sciences, Assistant Professor, head of the Department of Television and Control. Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. Field of research: electromagnetic compatibility; numerical methods. E-mail: talgat@tu.tusur.ru

Address: Russia, 634035, Tomsk, Lenina prospect, 40.