

УДК 621.396.41

В.Р. Шарафутдинов, Т.Р. Газизов

Новый способ трёхкратного резервирования межсоединений

Решается задача повышения надежности и помехозащищенности радиоэлектронной аппаратуры. Рассматривается возможность использования резервирования её межсоединений для повышения не только надежности, но и помехозащищенности за счет явления модального разложения. Для реализации этого предлагается новый способ 3-кратного резервирования, отличающийся использованием электромагнитной связи между резервируемым и резервными межсоединениями, зеркальной симметрии поперечного сечения результирующей структуры и лишь 2-слойной конструкции. Приведено поперечное сечение варианта печатной платы, реализующей предлагаемый способ. Выполнено моделирование распространения сверхкороткого импульса по межсоединению платы. Показано уменьшение его амплитуды в 4 раза за счет модального разложения.

Ключевые слова: резервирование, межсоединения, печатная плата, модальное разложение, сверхкороткий импульс, зеркальная симметрия.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-26-30

Радиоэлектронная аппаратура (РЭА) всё больше проникает в жизнь общества. При недостаточном внимании к повышению надежности и помехозащищенности РЭА общество становится все более зависимым от неё. Это создает неудобства и проблемы для обычной РЭА и совершенно недопустимо для РЭА, например в транспортной, атомной и военной отраслях.

Широко известным и распространенным путем повышения надежности является холодное резервирование, когда при выходе из строя функционирующей цепи подается питание на другую, и функционирует уже она. Пример резервируемой и резервной схем, расположенных зеркально относительно вертикали на одной стороне печатной платы, показан на рис. 1, а реального блока, с их расположением на разных сторонах металлического основания – на рис. 2. Для 3-кратного резервирования могут совмещаться оба показанных варианта. Однако, в любом случае при работе одной схемы другие не используются и почти не оказывают влияния на её работу. При выходе из строя начинает работать одна из резервных.

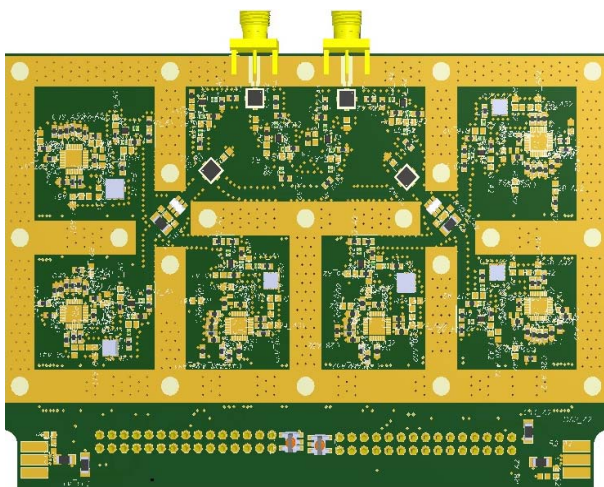
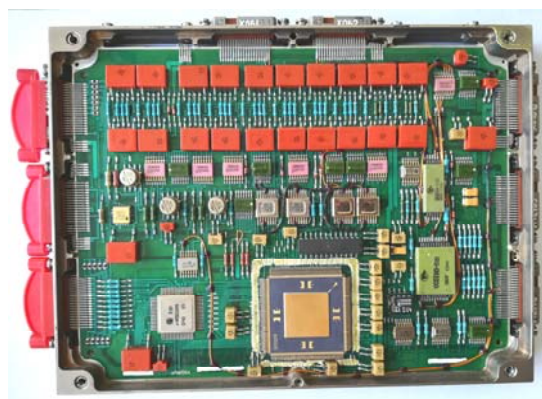
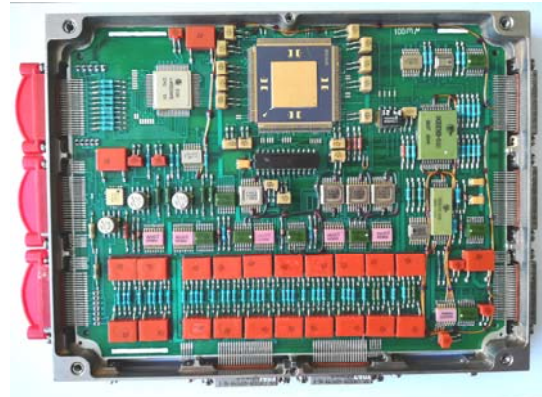


Рис. 1. 3D-вид резервируемой и резервной схем, расположенных зеркально относительно вертикали на одной стороне печатной платы



а



б

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

При штатной работе РЭА резервные устройства не используются, нократно увеличивают массу, размеры и стоимость РЭА. Защита от кондуктивных воздействий обычно достигается за счет включения помехозащитных устройств, а от излучаемых – за счет экранирования, что также увеличивает массу, размеры и стоимость РЭА, но часто неприемлемо: например, в космических аппаратах, подводных лодках и при массовом производстве соответственно. Таким образом, актуально повышение надежности и помехозащищенности РЭА за счет поиска новых способов для этого. В частности, актуальна за-

щита от воздействия мощного сверхкороткого импульса (СКИ).

В этой связи показательна работа [1], в которой впервые предложено объединить резервирование и модальную фильтрацию в единое целое, на основе чего предложен и обоснован новый способ трассировки печатных трасс для цепей с резервированием, позволяющий повысить помехозащищенность РЭА. На основе этой работы запатентовано 6 способов резервирования [2–7], обеспечивающих повышение не только надежности, но и помехозащищенности, используя явление модального разложения за счет электромагнитной связи между резервируемыми проводниками в неоднородной диэлектрической среде. Эти способы предназначены для 1-кратного резервирования межсоединений (резервируемое и резервирующее), а между тем в критичных приложениях может требоваться более высокая надежность. Для этого предложен способ 3-кратного резервирования межсоединений (резервируемое и три резервирующих) [8]. Он предназначен для многослойных печатных плат (МПП) и нереализуем на двусторонних печатных платах (ДПП). Между тем удорожание из-за 3-кратного резервирования актуально компенсировать, если не полностью, то хотя бы, частично, и это привлекательно сделать за счет простоты конструкции и дешевизны изготовления ДПП.

Цель работы – представить новый способ 3-кратного резервирования, отличающийся использованием электромагнитной связи между резервируемым и резервными межсоединениями, зеркальной симметрии поперечного сечения результирующей структуры и лишь 2-слойной конструкции. Для этого кратко рассмотрены два наиболее близких аналога предлагаемого способа, приведено поперечное сечение варианта ДПП, реализующего этот способ, выполнено моделирование распространения СКИ по межсоединению ДПП и показано уменьшение его амплитуды в 4 раза за счет модального разложения.

Аналоги нового способа

Как известно из патентного регламента, способ является более широким понятием, чем устройство. Одним из следствий этого является тот факт, что на основе одного способа можно предложить много различных устройств. Между тем суть нового способа и его отличия от наиболее близких аналогов проще пояснить на примере конкретных устройств.

Упомянутый способ 3-кратного резервирования [8] представлен на конкретном примере МПП, имеющей четыре слоя проводников (рис. 3, а). Верхний и нижний слои представляют опорный проводник (О) в виде двух сплошных проводящих плоских поверхностей (полигонов), которые могут выполнять функции схемной земли и питания. На двух промежуточных слоях расположены сигнальные проводники, по два на каждом слое. Резервируемая (активная) цепь представлена полоской (А) и электронным компонентом, например резистором (компонент 1), соединенным с ней и верхним слоем, а три резервирующих (пассивных) цепи представле-

ны соответствующими полосками (П) и компонентами 2–4. Впрочем, благодаря зеркальной симметрии по вертикальной и горизонтальной осям все четыре полоски и компонента одинаковы и понятие «резервируемый» применимо к любому из них, а «резервирующий» – к трем остальным. Моделирование распространения СКИ с амплитудой ЭДС 2 В показало (рис. 3, в) амплитуду напряжения на выходе около 0,25 В за счет модального разложения СКИ на четыре импульса меньшей амплитуды [8]. Таким образом, ослабление (здесь и далее к половине амплитуды ЭДС) составило 4 раза, но, как упоминалось, недостаток способа состоит в дороговизне МПП.

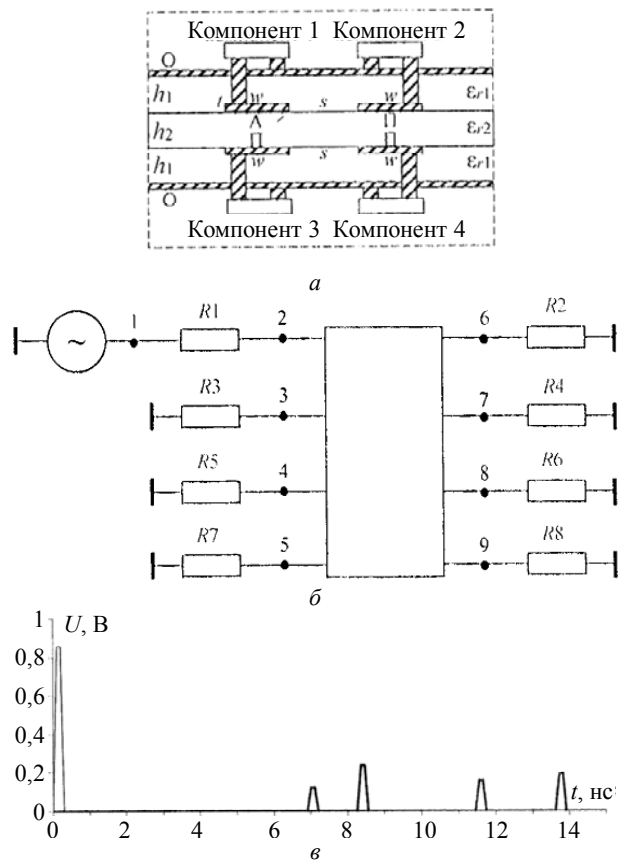


Рис. 3. Поперечное сечение (а), схема моделирования (б) и вычисленные напряжения в начале (тонкий) и конце (жирный) активного проводника при воздействии СКИ с амплитудой ЭДС 2 В (в) для аналога (3-кратное резервирование на основе МПП) предлагаемого способа [8]

Первый из 6 упоминавшихся способов [2] позволяет реализацию на основе обычной ДПП (рис. 4, а). Это достигается за счет выполнения сигнальных полосок в вырезках двух сплошных проводящих слоев. Моделирование распространения СКИ с амплитудой ЭДС 2 В показало (рис. 4, в) амплитуду напряжения на выходе около 0,5 В за счет модального разложения СКИ на два импульса меньшей амплитуды [2]. Таким образом, реализация способа возможна на основе обычной ДПП, но его недостатки состоят в том, что ослабление СКИ составляет не 4, а 2 раза, и возможно не 3-кратное, а лишь 1-кратное резервирование.

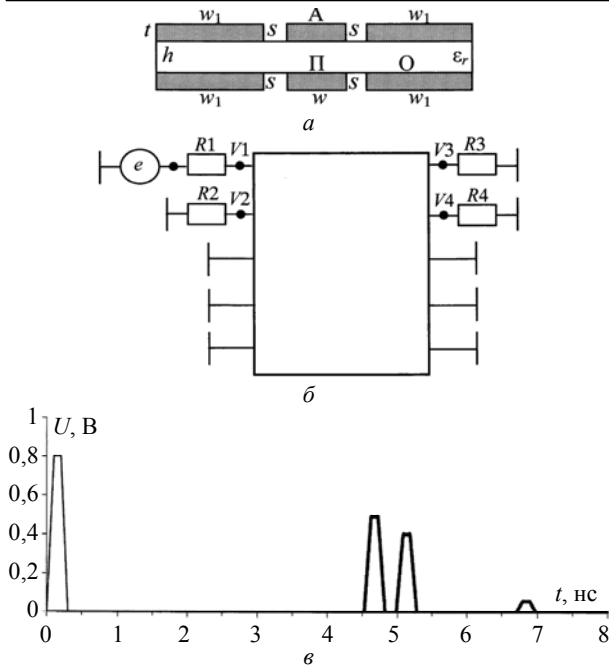


Рис. 4. Поперечное сечение (а), схема моделирования (б) и вычисленные напряжения в начале (тонкий) и конце (жирный) активного проводника при воздействии СКИ с амплитудой ЭДС 2 В (в) для аналога (1-кратное резервирование на основе ДПП) предлагаемого способа [2]

Описание нового способа

После пояснения работы, достоинств и недостатков двух рассмотренных аналогов очевидна возможность создания нового способа (рис. 5, а). Действительно, можно предложить способ резервирования цепей, включающий компоновку и трассировку резервируемой и резервной цепей такую, что для резервируемой цепи они выполняются на верхнем слое подложки, сигнальные проводники выполняются за счет зазоров в опорной проводящей пластине, а для резервной цепи выполняются на нижнем слое подложки зеркально верхнему слою, резервируемые и резервные сигнальные проводники одноименных цепей располагаются друг под другом, а оставшиеся проводники электрически соединяются друг с другом, отличающийся тем, что каждый сигнальный проводник делится посредством зазора на два одинаковых сигнальных проводника. Таким образом, четыре одноименные цепи прокладываются парами параллельно друг другу на верхнем и нижнем слоях, причем они расположены зеркально относительно уже двух плоскостей, так что в качестве резервируемого проводника может выступать любой из четырех проводников, а другие три проводника будут для него резервными. Очевидно, что этот способ реализуем на обычной ДПП.

Моделирование для аналогов описано выше очень кратко (поскольку детали доступны в описаниях патентов), а для нового способа оно описывается подробнее. Моделировалось распространение СКИ с амплитудой ЭДС 2 В с длительностями фронта, спада и плоской вершины по 100 пс в структуре длиной 1 м (рис. 5, б). 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 $\epsilon_r = 4,5$. Номинал резисторов $R1-R8$ взят равным (132 Ом) диагональным значениям (они одинаковы в силу зеркальной симметрии по двум плоскостям) матрицы импедансов Z . При моделировании опорным проводником полагался один из 4 крайних проводников, 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). Результаты квазистатического моделирования в системе TALGAT [9] временного отклика на ближнем и дальнем концах резервируемого проводника (точки $V1$ и $V5$ на рис. 5, б) показывают импульсы разложения с амплитудами около 0,25 В, т.е. ослабление 4 раза (рис. 5, в).

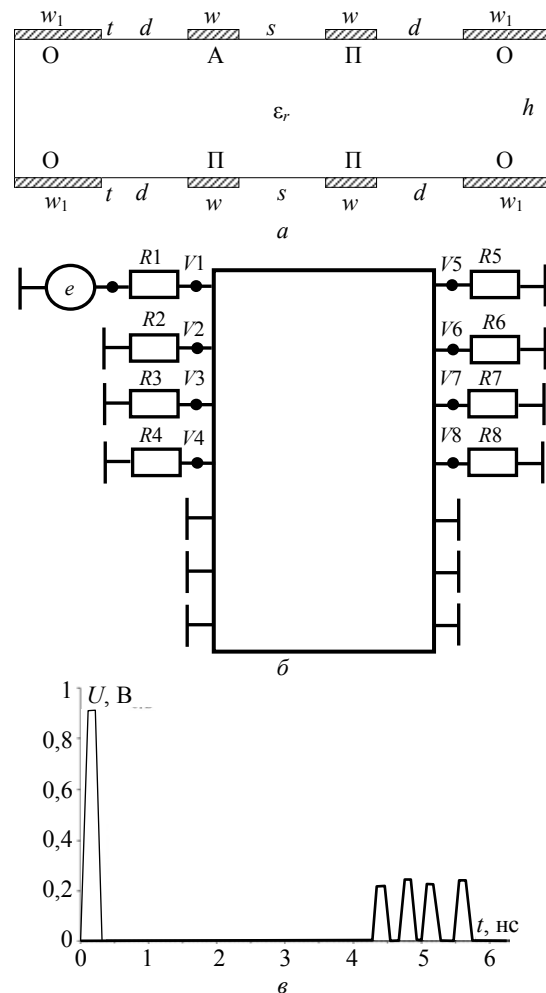


Рис. 5. Поперечное сечение (а), схема моделирования (б) и вычисленные напряжения в начале (тонкий) и конце (жирный) активного проводника при воздействии СКИ с амплитудой ЭДС 2 В (в) для предлагаемого способа (3-кратное резервирование на основе ДПП)

Заключение

Для повышения надежности и помехозащищенности РЭА предложен новый способ 3-кратного ре-

резервирования, отличающийся использованием электромагнитной связи между резервируемым и резервными межсоединениями, зеркальной симметрии поперечного сечения результирующей структуры и лишь 2-слойной конструкции. Приведено поперечное сечение варианта ДПП, реализующей предлагаемый способ. Выполнено моделирование распространения СКИ по межсоединению ДПП, показавшее ослабление 4 раза за счет модального разложения. Таким образом, при реализации предлагаемого способа каждое межсоединение любой из четырёх схем становится защитным устройством, ослабляющим СКИ. При выходе из строя межсоединения или компонента одной из схем питание подается на другую, но в силу зеркальности по двум осям поперечного сечения структуры для каждого межсоединения, ситуация не меняется, работа продолжается.

В перспективе предполагается запатентовать этот способ. Кроме того, целесообразно выполнить более точное и детальное моделирование и структурно-параметрическую оптимизацию ряда конкретных устройств на его основе. Это можно выполнить, используя подход из работы [10]. Учитывая упоминавшуюся зеркальность предлагаемой структуры по двум осям, весьма полезной может оказаться и обстоятельная работа по использованию зеркальной симметрии для совершенствования защиты от сверхкоротких импульсов [11]. Если считать основной причиной для резервирования выход из строя именно компонентов на концах межсоединений, то полезно исследование влияния граничных условий на модальное разложение, подобно выполненному в работе [12]. Если же понадобится оценить влияние на модальную фильтрацию разрыва самого межсоединения, то это можно сделать, используя результаты работы [13]. Наконец, для реализации модального резервирования на практике полезны результаты основных исследований по модальной фильтрации, собранные в монографии [14], и самых свежих – в учебном пособии [15].

При создании новых способов защиты критичной РЭА важно как можно быстрее и шире представить результаты, которые помогут уменьшить вероятность её отказа, поскольку это жизненно важно для общества. Чтобы в короткие сроки исследовать предложенный способ и получить предварительные результаты, применено компьютерное моделирование, позволившее без больших материальных и временных затрат выполнить первые оценки и показать достижимость технического результата без проведения натурного эксперимента, подготовка которого материально затратна и занимает много времени. Между тем в перспективе, естественно, предполагается изготовить макет оптимизированного устройства и выполнить экспериментальное подтверждение характеристик, полученных при моделировании.

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

Авторы благодарны рецензенту за ряд ценных замечаний, способствовавших улучшению статьи.

Литература

1. Новый способ трассировки печатных проводников цепей с резервированием / Т.Р. Газизов, П.Е. Орлов, А.М. Заболоцкий, Е.Н. Буичкин // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 3 – С. 129–131.
2. Пат. 2603843 РФ, МПК H04B 15/00. Способ резервирования для печатных плат / Т.Р. Газизов, П.Е. Орлов, В.Р. Шарафутдинов, О.М. Кузнецова-Таджибаева, А.М. Заболоцкий, С.П. Куксенко, Е.Н. Буичкин. – № 2015137547/07; заявл. 02.09.15, опубл. 10.12.16. Бюл. № 34. – 3 с.
3. Пат. 2603848 РФ, МПК H04B 15/00. Способ резервирования плоских кабелей / Т.Р. Газизов, П.Е. Орлов, В.Р. Шарафутдинов, О.М. Кузнецова-Таджибаева, А.М. Заболоцкий, С.П. Куксенко, Е.Н. Буичкин. – № 2015156667/07; заявл. 28.12.15, опубл. 10.12.16. Бюл. № 34. – 3 с.
4. Пат. 2603850 РФ, МПК H04B 15/02. Способ трассировки печатных проводников цепей с резервированием / Т.Р. Газизов, П.Е. Орлов, В.Р. Шарафутдинов, О.М. Кузнецова-Таджибаева, А.М. Заболоцкий, С.П. Куксенко, Е.Н. Буичкин. – № 2015129253/07; заявл. 16.07.15, опубл. 10.12.16. Бюл. № 34. – 3 с.
5. Пат. 2603851 РФ, МПК H04B 15/00. Способ трассировки печатных проводников с дополнительным диэлектриком для цепей с резервированием / Т.Р. Газизов, П.Е. Орлов, В.Р. Шарафутдинов, О.М. Кузнецова-Таджибаева, А.М. Заболоцкий, С.П. Куксенко, Е.Н. Буичкин. – № 2015129263/07; заявл. 16.07.15, опубл. 10.12.16. Бюл. № 34. – 3 с.
6. Пат. 2614156 РФ, МПК H04B 15/00, H03N 3/00, H05K 3/36. Способ компоновки печатных плат для цепей с резервированием / Т.Р. Газизов, П.Е. Орлов, В.Р. Шарафутдинов, О.М. Кузнецова-Таджибаева, А.М. Заболоцкий, С.П. Куксенко, Е.Н. Буичкин. – № 2015137532/07; заявл. 02.09.15, опубл. 23.03.17. Бюл. № 9. – 3 с.
7. Пат. 2624637 РФ МПК H04B 15/02. Способ внутренней компоновки печатных плат для цепей с резервированием / Т.Р. Газизов, П.Е. Орлов, В.Р. Шарафутдинов, О.М. Кузнецова-Таджибаева, А.М. Заболоцкий, С.П. Куксенко, Е.Н. Буичкин. – № 2015137548/07; заявл. 02.09.15, опубл. 05.07.17. Бюл. № 19. – 3 с.
8. Пат. 2663230 РФ МПК H 04B 15/02. Способ трёхкратного резервирования цепей в многослойных печатных платах / Т.Р. Газизов, П.Е. Орлов, В.Р. Шарафутдинов. – № 2017113045/07; заявл. 14.04.2017, опубл. 02.08.2018. Бюл. № 22. – 3 с.
9. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT / С.П. Куксенко, А.М. Заболоцкий, А.О. Мелкозеров, Т.Р. Газизов // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 2 (36). – С. 45–50.
10. Gazizov T.R. Solving the complexity problem in the electronics production process by reducing the sensitivity of transmission line characteristics to their parameter variations / T.R. Gazizov, I.Ye. Sagiyeva, S.P. Kuksenko // Complexity – 2019. – P. 11. <https://doi.org/10.1155/2019/6301326>.
11. Using reflection symmetry to improve the protection of radio-electronic equipment from ultrashort pulses / E.B. Chernikova, A.O. Belousov, T.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky // Symmetry. MDPI AG. – 2019. – Vol. 11, № 7. – P. 883. <https://doi.org/10.3390/sym11070883>.
12. Gazizov T.R. UWB pulse decomposition in asymmetrical modal filter with different boundary conditions / T.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky // 2015 Int. Sib. Conf. Control Commun. – 2015. – 3 p. <https://doi.org/10.1109/SIBCON.2015.7147024>.
13. Orlov P.E. Contactless modal phenomena based approach to detecting, identifying, and diagnosing of electrical -

connections / P.E. Orlov, T.R. Gazizov // Complexity. – 2018. – 12 p. <https://doi.org/10.1155/2018/5081684>.

14. Заболоцкий А.М. Модальные фильтры для защиты бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов. – Томск: ТУСУР, 2013. – 151 с.

15. Заболоцкий А.М. Электромагнитная совместимость: модальные технологии: учеб. пособие / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов. – Томск: ТУСУР, 2018. – 132 с.

Шарафутдинов Виталий Расимович

Аспирант каф. телевидения и управления (ТУ) ТУСУРа
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-913-878-89-68
Эл. почта: dovod@bk.ru

Газизов Тальгат Рашитович

Зав. каф. ТУ ТУСУРа
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-913-826-07-24
Эл. почта: talgat@tu.tusur.ru

Sharafutdinov V.R., Gazizov T.R.

New method for triple reservation of interconnects

The problem of increasing the reliability and noise protection of radioelectronic equipment is solved. The possibility of using the reservation the equipment interconnects for increasing not only the reliability, but also the noise protection at the expense of modal decomposition phenomenon is considered. To implement it, the new method of triple reservation is proposed. That method distinguishes by using the electromagnetic coupling between reserved and reserving interconnects, the reflection symmetry of resulting structure cross section and only two-layer construction. A cross section of printed circuit board option, implementing the proposed method, is presented. An ultrashort pulse propagation along the board interconnect is simulated. Decreasing the pulse amplitude by factor 4 caused by modal decomposition is shown.

Keywords: reservation, interconnects, printed circuit boards, modal decomposition, ultrashort pulse, reflection symmetry.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-26-30

References

1. 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 TUSUR University*, 2015, № 3, pp. 129–131 (in Russ.).

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

3. 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 RF, no. 2603848, 2016).

4. 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 RF, no. 2603850, 2016).

5. 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 dlia chepei s rezervirovaniem* [Method of routing printed conductors with additional dielectric for circuits with redundancy]. Patent RF, no. 2603851, 2016).

6. 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 dlia chepei s rezervirovaniem* [Printed circuit boards with reserve circuits arrangement method]. Patent RF, no. 2614156, 2017).

7. 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 dlia chepei s rezervirovaniem* [Printed circuit boards with reserve circuits arrangement method]. Patent RF, no. 2624637, 2017).

8. Gazizov T.R., Orlov P.E., SHarafutdinov V.R. *Sposob trehkratnogo rezervirovaniia chepei v mnogosloinnykh peshatnykh platah* [Method of circuit triple reservation in multilayered printed circuit boards]. Patent RF, no. 2663230, 2017).

9. Kuksenko S.P., Zabolotsky A.M., Melkozerov A.M., Gazizov T.R., New features of electromagnetic compatibility in TALGAT simulation software, *Doklady TUSUR*, 2015, № 2, pp. 45–50 (in Russ.).

10. Gazizov T.R., Sagiyeva I.Ye., Kuksenko S.P. Solving the complexity problem in the electronics production process by reducing the sensitivity of transmission line characteristics to their parameter variations, *Complexity*, 2019, 11 p. <https://doi.org/10.1155/2019/6301326>.

11. Chernikova E.B., Belousov A.O., Gazizov T.R., Zabolotsky A.M. Using reflection symmetry to improve the protection of radio-electronic equipment from ultrashort pulses, *Symmetry*. MDPI AG, 2019, Vol. 11, № 7, 883 p. <https://doi.org/10.3390/sym11070883>.

12. Gazizov T.R., Zabolotsky A.M. UWB pulse decomposition in asymmetrical modal filter with different boundary conditions, 2015 Int. Sib. Conf. Control Commun, 2015, 3 p. <https://doi.org/10.1109/SIBCON.2015.7147024>.

13. Orlov P.E., Gazizov T.R. Contactless modal phenomena based approach to detecting, identifying, and diagnosing of electrical connections, *Complexity*, 2018, 12 p. <https://doi.org/10.1155/2018/5081684>.

14. Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. Modal filters for protection of spaceborne radioelectronic equipment, Tomsk: Tomsk state university of control systems and radioelectronics, 2013, 151 p. (in Russ.).

15. Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. *Electromagnetic compatibility: modal technologies: workbook*, Tomsk: Tomsk state university of control systems and radioelectronics, 2018, 132 p. (in Russ.).

Vitaly R. Sharafutdinov

Postgraduate student, Department of Television and Control, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-913-878-89-68
Email: dovod@bk.ru

Talgat R. Gazizov

Chief of Department of Television and Control, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-913-826-07-24
Email: talgat@tu.tusur.ru