

вием того, что в высокочастотной области сердечник перенасыщается. При последовательном включении обмоток катушек синфазно-дифференциального дросселя индуктивность не равна нулю из-за перенасыщения сердечника [4].

По результатам измерений получены значения, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

**Измеренные индуктивности макета**

| Вариант включения         | Значение индуктивности, мкГн |
|---------------------------|------------------------------|
| $L_{13}, L_{24}$          | 1064                         |
| $L_{13} + L_{24}$         | 4042                         |
| $L_{13} \parallel L_{24}$ | 951                          |
| $L_{13} + L_{42}$         | 416                          |

Используя выражения (6)–(9), вычислим измеренное значение индуктивностей синфазной и дифференциальной части гибридного дросселя:

$$L_{13}, L_{24} = 2L_C = 416 \rightarrow L_C = \frac{416}{2} = 208 \text{ мкГн}, \quad (13)$$

$$L_{13} \parallel L_{24} = L_D + \frac{L_C}{2} = 1064 \rightarrow L_D + \frac{208}{2} = 1064 \rightarrow L_D + 104 = 1064 \rightarrow L_D = 1064 - 104 = 960 \text{ мкГн}. \quad (14)$$

**Расчет, реализация и измерение**

По результатам моделирования и измерения синфазно-дифференциального дросселя были получены следующие значения индуктивностей, представленные в табл. 2.

Таблица 2

**Значения индуктивности макета, мкГн**

| Источник данных | Синфазная | Дифференциальная |
|-----------------|-----------|------------------|
| Расчет          | 162,8     | 819,2            |
| Измерение       | 208       | 960              |

Анализируя полученные значения, стоит отметить превышение измеренного значения индуктивности синфазной обмотки на 17% относительно значения при моделировании и превышение измеренного значения дифференциальной обмотки индуктивности на 27% относительно значения при моделировании. Подобная разница может обуславливаться многими факторами, а именно: погрешностью из-

мерительного прибора, геометрической несоосностью катушек, отклонением заявленных характеристик магнитных сердечников, а также дополнительными индуктивными связями между катушками.

**Заключение**

В результате исследования были получены экспериментальные данные для дальнейшего усовершенствования методики изготовления гибридного защитного дросселя, а также реализован рабочий прототип.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по проекту RFMEFI57417X0172.

**Литература**

1. Nan L. A common mode and differential mode integrated EMI filter / L. Nan, Y. Yugang // 2006 CES/IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference. – Shanghai, China, 2006. – 5 p.
2. Richard L.O. EMI-filter design / L.O. Richard, M.P. Timothy // CRC Press. – 2012.
3. Дьяконов В.П. Справочник по расчетам на микросхемных устройствах. – 2-е изд., испр. – М.: Наука, 1986. – 226 с.
4. Shiraki Y. Inductance Analysis for Compact Dual-Mode Choke Considering Magnetic Saturation / Y. Shiraki, S. Yoneda, K. Omae, T. Nagao // International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2018). – Amsterdam, The Netherlands, 2018.

**Лакоза Александр Михайлович**

Магистрант каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: alexandrakoza@mail.ru

**Костелецкий Валерий Павлович**

Аспирант каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: kosteletskiy@tu.tusur.ru

**Жечев Евгений Сергеевич**

Аспирант каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: zhechev75@gmail.com

**Заболоцкий Александр Михайлович**

Д-р техн. наук, профессор каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: zabolotsky\_am@tu

УДК 621.391.825

**А.В. Медведев**

## Ослабление сверхкороткого импульса после отказа при модальном резервировании

Отмечена актуальность исследований по рациональному использованию избыточности резервирования, используя способы модального резервирования (МР), для повышения устойчивости к сверхкоротким импульсам (СКИ). Выполнено квазистатическое моделирование распространения СКИ в структурах с однократным МР на макете печатной платы на основе тракта 50 Ом. Рассмотрены отказы двух типов: короткое замыкание и обрыв / холостой ход. Показано, что для однократного МР амплитуда выходного напряжения увеличивается на 38%, так что ослабление СКИ уменьшается с 2,3 до 1,7 раза.

**Ключевые слова:** электромагнитная совместимость, надежность, холодное резервирование, модальное резервирование, печатная плата, отказ, сверхкороткий импульс.

При создании необслуживаемой или частично обслуживаемой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), например, для космической или авиационной техники, большое внимание уделяется надежности и электромагнитной совместимости (ЭМС). Кондуктивные и излучаемые эмиссии могут приводить к нарушению работы бортовой РЭА. Поэтому необходимо учитывать ЭМС на ранних этапах проектирования [1]. В частности, особенно опасно воздействие мощных сверхкоротких импульсов (СКИ), потому что существующие сетевые фильтры не защищают от них [2]. Есть промышленные устройства, защищающие от СКИ, но они имеют большие габариты и высокую стоимость, так что нет недорогой и эффективной защиты от СКИ. Однако растущая роль электроники делает такую защиту всё более актуальной.

Одним из методов повышения надежности бортовой РЭА является холодное резервирование [3]. Оно позволяет создавать высоконадёжные системы из типовых изделий широкого применения, используя бездействующую часть электронного оборудования в случае неисправности в функционирующей части. Необходимость надлежащей защиты от СКИ, а также наличие избыточности за счет холодного резервирования значительно усложняют все части и, как следствие, окончательную конструкцию аппаратуры. Между тем наличие избыточности может быть рационально использовано.

Так, предложена идея модального резервирования (МР), позволяющая, на основе модальной фильтрации улучшить помехозащиту РЭА [4]. Она использует бездействующие электрические межсоединения для повышения помехоустойчивости и защиты электронных систем от электромагнитных помех. МР основано на использовании электромагнитных связей между резервируемым и резервным проводниками резервируемой и резервной цепей.

Описана реализация МР в многослойных печатных платах (ПП) [5, 6]. Рассмотрена эффективность МР в различных типах межсоединений [7]. Однако отказ электронных компонентов не рассматривался. Между тем он может влиять на ослабление помех при МР.

Цель работы – исследовать МР при отказе электронных компонентов. В работе выполнено квазистатическое моделирование распространения СКИ в структуре с однократным МР на макете ПП на основе тракта 50 Ом. Рассмотрены отказы двух типов: короткое замыкание (КЗ) и обрыв/холостой ход (ХХ).

#### Суть модального резервирования

Реализация модального резервирования в многослойных ПП показана на рис. 1. Резервируемая цепь расположена на ПП 1, а резервная цепь – на ПП 2. Опорный проводник на платах выполнен в виде отдельных слоев. Между ПП 1 и 2 проложен слой диэлектрика. Соответствующие друг другу трассы резервируемой и резервной цепей расположены параллельно и друг под другом в слое диэлектрика, резервируемые и резервные радиоэлектронные компоненты размещаются на противоположных

склеиваемым сторонах резервируемой и резервной ПП. Результатом является уменьшение восприимчивости резервируемой цепи к внешним кондуктивным эмиссиям и уменьшение уровня кондуктивных эмиссий от резервируемой цепи. Он достигается за счет того, что импульс помехи, меньше определенной длительности, подвергается разложению на импульсы меньшей амплитуды, а помеха на заданной частоте может значительно ослабляться.

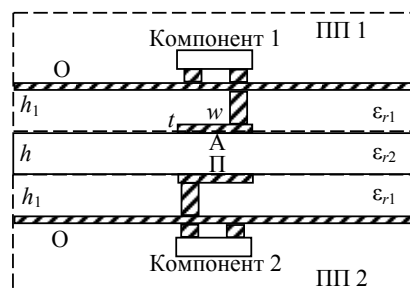


Рис. 1. Способ компоновки многослойной ПП для цепей с резервированием, где проводники А – активный, П – пассивный, О – опорный

#### Подход к моделированию

Моделирование проводилось в системе TALGAT [8] без учета потерь в проводниках и диэлектриках. Оно основано на методе моментов и позволяет выполнить квазистатический анализ структур произвольной сложности. Алгоритм, реализованный в системе, позволяет вычислять матрицы (L и C) погонных параметров многопроводной линии передачи. Используя модифицированный метод узловых потенциалов в частотной области и быстрое преобразование Фурье, можно рассчитать временной отклик на воздействие произвольной формы.

Квазистатический анализ основан на допущении, что в структуре распространяется только поперечная электромагнитная волна, в отличие от электродинамического анализа, где учитываются все типы волн. Однако сравнение результатов квазистатического и электродинамического моделирования для различных поперечных сечений фрагментов ПП с МР показывает, что результаты согласуются, а временные затраты на квазистатическое моделирование на 2–3 порядка меньше, чем на электродинамическое [9].

#### Исследуемая структура

В качестве исследуемой структуры выбран макет ПП с МР на основе тракта 50 Ом [10] (рис. 2).

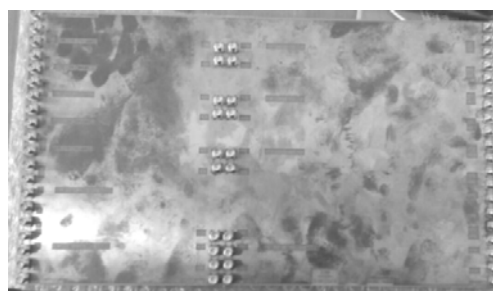


Рис. 2. Фотография макета ПП с МР

Он включает в себя наборы (по количеству и длине линий) электрических соединений с однократным и трехкратным МР. Стек ПП со значениями параметров приведен на рис. 3. Для диэлектрика Rogers RO3010 полагалось, что  $\epsilon_{r,2} = 10,2$ , для препрега FR-4  $\epsilon_{r,1} = 4$ . Данный макет взят для анализа, так как он реализован с учетом параметров ПП, используемых при проектировании реальной РЭА.

| Материал          | Толщина          |
|-------------------|------------------|
| Медная фольга     | 0,035 мм         |
| Препрег FR-4 1080 | 0,6 мм ( $h_1$ ) |
| Медная фольга     | 0,035 мм ( $t$ ) |
| Rogers RO3010     | 0,13 мм ( $h$ )  |
| Медная фольга     | 0,035 мм ( $t$ ) |
| Препрег FR-4 1080 | 0,6 мм ( $h_1$ ) |
| Медная фольга     | 0,035 мм         |

Рис. 3. Стек ПП

Поперечное сечение для моделирования структуры длиной 0,324 м с однократным МР представлено на рис. 4, а. Для моделирования использованы значения из рис. 3. Значения остальных параметров: ширина проводника  $w = 185$  мкм, расстояние от торца проводника до торца диэлектрика  $d = 555$  мкм, расстояние от торца проводника до боковой стенки  $d_1 = 740$  мкм.

Принципиальная схема для моделирования структуры с однократным МР приведена на рис. 4, б. При отказе резервируемой цепи (КЗ или ХХ) полагается, что резервная цепь берет на себя функции резервируемой цепи. При моделировании номиналы резисторов  $R1$  и  $R2$  для активного проводника выбраны равными 50 Ом. Номиналы резисторов  $R3$  и  $R4$  для пассивного проводника задавались 50 Ом, 1 МОм (ХХ), 1 мкОм (КЗ) для различных вариантов отказа.

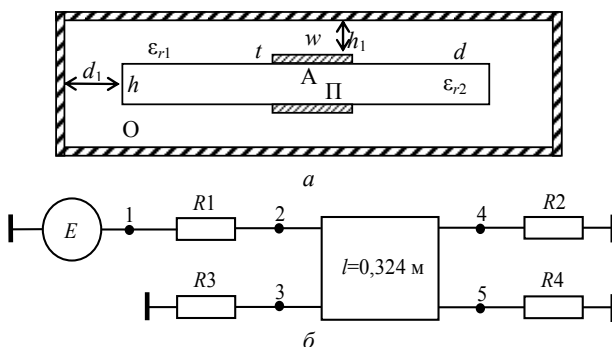


Рис. 4. Поперечное сечение (а) и принципиальная схема (б) структуры с однократным МР в системе TALGAT

### Результаты моделирования

Чтобы разложение воздействующего импульса было как можно более полным, его общая длительность должна быть разности задержек мод исследуемой структуры. Для этого получены задержки

мод для рис. 4, а (2,37 и 3,08 нс) как произведение рассчитанных в системе TALGAT значений погонных задержек на 0,324 м. На рис. 5 представлена форма ЭДС амплитудой 2 В общей длительностью 600 пс, использованная для воздействия на исследуемую структуру.

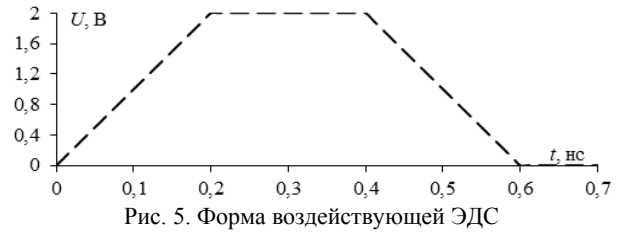


Рис. 5. Форма воздействующей ЭДС

На рис. 6 приведены формы напряжения на ближнем (узел 2 на рис. 4, б) и дальнем (узел 4 на рис. 4, б) концах активного проводника в структуре с МР при различных граничных условиях на одном из концов пассивного проводника, которые могут возникнуть при отказе компонента.

В рабочем состоянии при резисторах на концах пассивного проводника 50 Ом амплитуда напряжения на ближнем конце активного равна 1 В. При ХХ или КЗ на дальнем конце пассивного проводника максимальные амплитуды напряжения на ближнем конце активного проводника равны 1 В. А при ХХ или КЗ на ближнем конце пассивного проводника амплитуды напряжения на ближнем конце активного проводника равны 1,14 и 0,86 В соответственно. При этом формы напряжения на дальнем конце активного проводника для отказа одного типа совпадают.

На рис. 7 для ясности приведены отдельно формы напряжения двух первых импульсов на дальнем конце активного проводника в структуре с МР. Амплитуды импульсов меняются по-разному в зависимости от типа отказа. Задержки мод по отклику соответствуют рассчитанным из параметров.

В рабочем состоянии при резисторах на концах пассивного проводника 50 Ом напряжения каждого из импульсов на дальнем конце резервируемого проводника 0,42 В. При отказе компонента (КЗ или ХХ) на одном из концов пассивного проводника формы напряжений на дальнем конце активного проводника изменяются (рис. 7). Это обусловлено влиянием, которое оказывает изменение граничных условий пассивных проводников на согласование активного проводника. Для ХХ на одном из концов пассивного проводника, первый импульс больше по амплитуде на 0,16 В, а второй меньше на 0,16 В, чем в рабочем состоянии ( $\pm 38\%$ ). Максимальная амплитуда импульсов 0,58 В. Для КЗ на одном из концов пассивного проводника, наоборот, первый импульс разложения на 0,16 В меньше, а второй на 0,16 В больше, чем в рабочем состоянии. Отношение половины ЭДС к максимальному напряжению на дальнем конце резервируемой цепи при отказе компонента равно 1,7, а для цепи в рабочем состоянии – 2,3 раза.

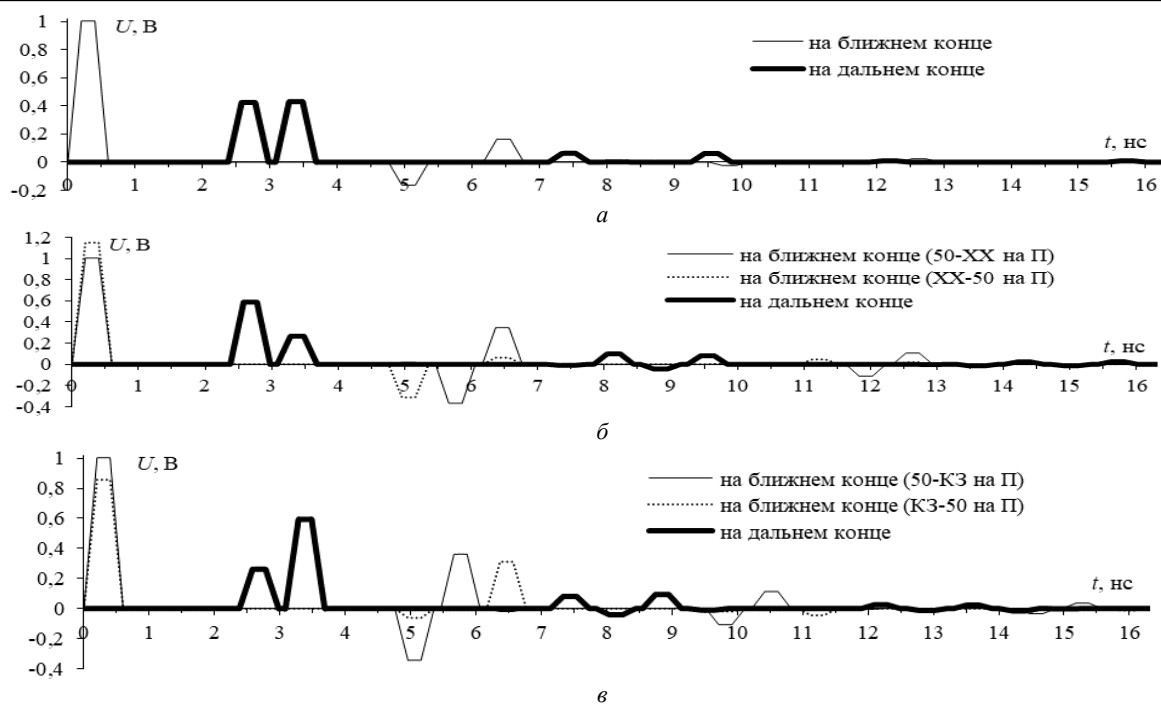


Рис. 6. Формы напряжения на ближнем и дальнем концах активного проводника в структуре с МР при различных граничных условиях на одном из концов пассивного проводника (П): 50 Ом (а), XX (б), КЗ (в)

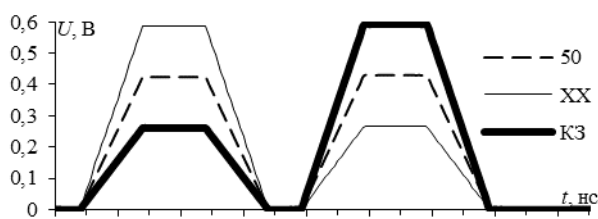


Рис. 7. Формы напряжения двух первых импульсов на дальнем конце активного проводника в структуре с МР при различных граничных условиях на одном из концов пассивного проводника

**Заключение**

Рассмотрен отказ компонентов системы с МР на основе тракта 50 Ом. Полагалось, что цепь в рабочем состоянии, если граничные условия на концах проводников примерно соответствуют 50 Ом, а при отказе одного компонента системы на одном из концов цепи образуется КЗ или XX. Показано, что при отказе помехоустойчивость может значительно изменяться. Для однократного МР амплитуда отклоняется на 38%, так что ослабление уменьшается с 2,3 до 1,7 раза.

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

*Литература*

1. Paul C.R. Introduction to Electromagnetic Compatibility – Wiley Interscience. 2006. – 1013 p.
2. Gizatullin Z.M. Investigation of the immunity of computer equipment to the power-line electromagnetic interference / Z.M. Gizatullin, R.M. Gizatullin // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2016. – No. 5. – P. 546–550.
3. Patel M.R. Spacecraft Power Systems – CRC Press, 2005. – 691 p.

4. New concept of critical infrastructure strengthening / T.R. Gazizov, P.E. Orlov, A.M. Zabolotsky, S.P. Kuksenko // Proc. of the 13th Int. Conf. of Numerical Analysis and Applied Mathematics. Sept. – 2015. – P. 1–3.

5. Orlov P.E. Method of assembling multi-layer printed circuit boards for circuits with reservation / P.E. Orlov, E. Buichkin, T.R. Gazizov // Proc. of the EDM 2016 Erlagol. – 2016. – P. 155–158.

6. Method for assembling a multilayer circuit board for triple-reserved circuits / P.E. Orlov, E. Buichkin, A. Belousov, T.R. Gazizov // Proc. of the XIII Int. Siberian Conf. on Control and Communications, Astana, Kazakhstan, June 29–30. – 2017. – P. 1–4.

7. Orlov P.E. Evaluation of efficiency of modal filtration in different types of redundant electrical connections / P.E. Orlov, T.R. Gazizov, E. Buichkin // Proc. of the XII Int. Siberian Conf. on Control and Communications, Moscow, Russia, May 12–14. – 2016. – P. 1–3.

8. New developments for improved simulation of interconnects based on method of moments / S.P. Kuksenko, T.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky, R.R. Ahunov, R.S. Surovtsev, V.K. Salov, Eg.V. Lezhnin // Advances in Intelligent Systems Research (ISSN 1951-6851), proc. of the 2015 Int. Conf. on Mo-delling, Simulation and Applied Mathematics (MSAM2015), Phuket, Thailand, August 23–24. – 2015. – P. 293–301.

9. Orlov P.E. Quasistatic and electromagnetic simulation of interconnects of printed circuit boards with modal reservation / P.E. Orlov, E. Buichkin // 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. – 2017. – P. 5.

10. Orlov P.E. Optimization of stack parameters of a multi-layer printed circuit board for circuits with redundancy by genetic algorithm / P.E. Orlov, T.R. Gazizov, V.R. Sharafutdinov // Proc. 2017 IEEE 2017 Int. multi-conf. on eng., comp. and inform. sciences. – 2017. – P. 495–500.

**Медведев Артём Викторович**  
Инженер НИЛ «БЭМС РЭС»  
Эл. почта: medart20@rambler.ru