

УДК 629.7.01

Т.Р. Газизов, П.Е. Орлов, А.М. Заболоцкий, Е.Н. Буичкин

## Новый способ трассировки печатных проводников цепей с резервированием

Рассмотрен новый способ трассировки печатных проводников цепей с резервированием. В нем предложено для повышения помехозащищенности применять модальную фильтрацию сигнала с использованием элементов резервной цепи. Проанализирована двухпроводная структура, в которой сверхкороткий входной импульс помехи разлагается на 2 импульса, более чем в 2 раза меньшей амплитуды. Полученные результаты показывают, что предложенный способ позволяет повысить помехозащищенность цепей с резервированием практически без дополнительных затрат.

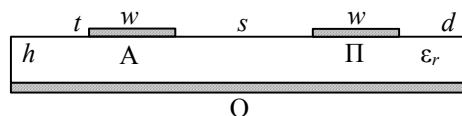
**Ключевые слова:** связанная линия, модальная фильтрация, погонная задержка, резервирование.

При создании критичной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) необходимо обеспечение высокой надежности, важными аспектами которой являются резервирование и электромагнитная совместимость. Последняя особенно актуальна, поскольку растут уровни и частоты полезных и помеховых сигналов. Известно, что одним из способов обеспечения высокой надежности РЭА является холодное резервирование. Наличие заложенной в него избыточности позволяет искать пути её рационального использования [1] даже в период штатной работы резервируемой цепи. Между тем существуют технические решения, реализация которых требует наличия одного или нескольких элементов, подобных основному. Примером является модальная фильтрация, требующая наличия рядом с активным проводником одного или нескольких пассивных [2]. Это позволяет не только передавать сигналы по проводникам, но и повысить помехозащищенность.

В данной работе впервые предложено объединить резервирование и модальную фильтрацию в единое целое: предложен и обоснован новый способ трассировки печатных трасс для цепей с резервированием, позволяющий повысить помехозащищенность РЭА.

Способ заключается в том, что резервируемая и резервирующая цепи выполняются так, что каждый проводник резервируемой цепи является активным, а соответствующий проводник резервирующей цепи – пассивным, в смысле модальной фильтрации сигналов. Цепи имеют общий опорный проводник. Соответствующие проводники резервируемой и резервной цепей располагаются парами в одном слое параллельно друг другу с минимальными технологически допустимыми зазорами между собой. Пример для одного проводника показан на рис. 1.

Рис. 1. Поперечное сечение структуры, где проводники:  
А – активный, П – пассивный, О – опорный



При создании новых способов защиты критичной РЭА важно как можно быстрее представить результаты исследований, которые помогут уменьшить вероятность её отказа. Проведение натурного эксперимента материально затратно и занимает много времени. Чтобы в короткие сроки исследовать предложенный способ и получить предварительные результаты, применяется компьютерное моделирование. Оно позволяет без больших материальных и временных затрат выполнить первые оценки.

Вычисление параметров и форм сигнала выполнялось в программном продукте TALGAT [3] при допущении, что в рассматриваемых структурах распространяются только квази-Т волны. Потери в проводниках и диэлектриках не учитывались.

В общем случае структура рассматривается как связанная линия передачи с неоднородным диэлектрическим заполнением в поперечном сечении. Следовательно, в данной структуре распространяются две моды с соответствующими им характеристиками. Для выполнения анализа вычислены матрицы погонных коэффициентов электростатической и электромагнитной индукций при  $s = 100$  мкм,  $w = 300$  мкм,  $t = 65$  мкм,  $h = 510$  мкм,  $\epsilon_r = 10$ :

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 161 & -62,5 \\ -62,5 & 161 \end{bmatrix} \text{ пФ/м}, \quad \mathbf{L} = \begin{bmatrix} 449 & 236,1 \\ 236,1 & 449 \end{bmatrix} \text{ нГн/м}. \quad (1)$$

Затем из (1) вычислены вектор погонных задержек мод  $\tau = [8,2; 6,9]$  нс/м и их разность  $\Delta\tau = 1,3$  нс/м.

При вычислении форм сигнала в структуре длиной 1 м использовалась схема рис. 2. Она содержит четыре резистора с сопротивлением, равным среднему геометрическому волновых сопротивлений четной и нечетной мод, и источник сигналов, который подключался между резервируемой трассой (активный проводник) и опорным проводником. Импульсная помеха с ЭДС 2 В подавалась между резервируемой трассой и опорным проводником (длительности фронта, спада и плоской вершины выбраны равными по 0,1 нс, так что  $t_{\Sigma} = 0,3$  нс). Функцию резервной трассы выполняет пассивный проводник. Формы сигналов в начале (V1) и конце (V3) резервируемого (активного) проводника представлены на рис. 2, из которого видно, что к концу линии приходят два импульса амплитудой 0,47 В. Это разложение (и, как следствие, уменьшение восприимчивости резервируемой цепи к внешним кондуктивным эмиссиям) обусловлено разностью задержек четной и нечетной мод в структуре связанных линий.

На рис. 3 приведен пример амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) одиночной и связанных микрополосковых линий для конкретного случая. Эта характеристика позволяет судить о том, что спектр полезного сигнала должен располагаться в той области частот, где он получит наименьшие искажения. Иначе говоря, при проектировании цепей для рассматриваемого случая их параметры, например длину проводников, следует выбирать, соотносясь с частотным диапазоном полезного сигнала.

Таким образом, результаты моделирования показывают, что предложенный способ трассировки печатных проводников цепей с резервированием позволяет уменьшить восприимчивость резервируемой цепи к внешним кондуктивным эмиссиям и уменьшить уровень генерируемых кондуктивных эмиссий резервируемой цепью. Примечательно, что реализация способа не требует материальных затрат и, в случае выхода из строя резервируемой цепи в резервной цепи будет достигаться аналогичный технический результат. На основе полученных результатов подана заявка на изобретение.

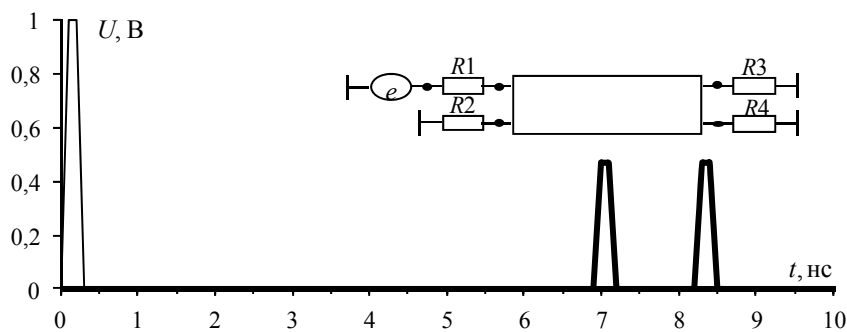


Рис. 2. Форма сигнала в начале (—) и конце (—) активного проводника

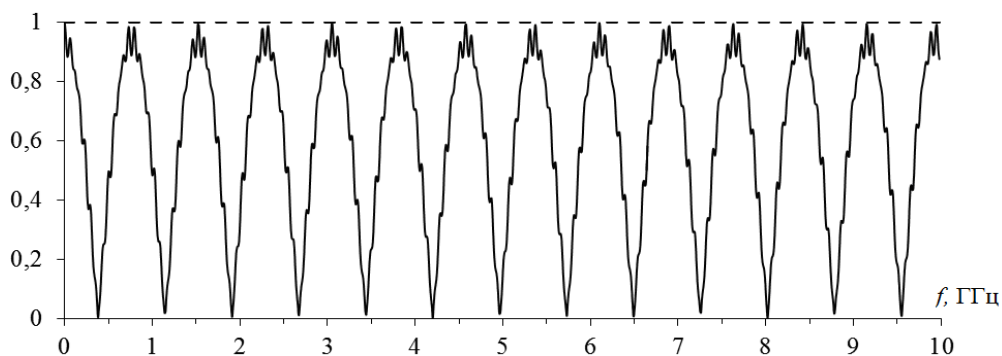


Рис. 3. Частотный отклик одиночной линии (---) и линии связанной (—) на гармоническое воздействие

Способ разработан за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-01232) в ТУ-СУРе, программное обеспечение создано в рамках выполнения проектной части государственного задания № 8.1802.2014/К Министерства образования РФ, моделирование выполнено при поддержке гранта РФФИ 14-29-09254.

*Литература*

1. Орлов П.Е. Уменьшение электромагнитного поля цепей с резервированием трасс / П.Е. Орлов, Т.Р. Газизов // Авиакосмическое приборостроение. – 2011. – № 11. – С. 3–6.
2. Improved design of modal filter for electronics protection / T.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky, A.O. Melkozerov, E.S. Dolganov, P.E. Orlov // Proc. of 31-st Int. conf. on lightning protection, Sept. 2–7 2012. Vienna, Austria.
3. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT / С.П. Куксенко, А.М. Заболоцкий, А.О. Мелкозеров, Т.Р. Газизов // Докл. Том. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. – 2015. – № 2 (36). – С. 45–50.

---

**Газизов Тальгат Рашитович**

Д-р техн. наук, ст. науч. сотрудник, зав. каф. телевидения и управления (ТУ) ТУСУРа  
Тел.: 8 (382-2) 41-34-39  
Эл. почта: talgat@tu.tusur.ru

**Орлов Павел Евгеньевич**

Канд. техн. наук, мл. науч. сотрудник каф. ТУ  
Тел.: 8 (382-2) 41-34-39  
Эл. почта: praetorian281@gmail.com

**Заболоцкий Александр Михайлович**

Канд. техн. наук, доцент каф. ТУ  
Тел.: 8 (382-2) 41-34-39  
Эл. почта: zabolotsky\_am@mail.ru

**Буичкин Евгений Николаевич**

Магистрант каф. ТУ  
Тел.: 8-923-431-72-71  
Эл. почта: byichkin-evgenii@mail.ru

Gazizov T.R., Orlov P.E., Zabolotsky A.M., Buichkin E.N.

**New method of routing of the printed conductors of redundant circuits**

A new method for routing the printed conductors of redundant circuits is proposed. A modal filtration is used to increase the interference immunity. A structure with two conductors is considered; in this structure the initial interference pulse is decomposed into two pulses with twice lower amplitudes. The attenuation of spectral components of the initial signal and the presence of resonant frequencies are shown. The obtained results prove that the proposed method allows to increase interference immunity of the redundant circuits without additional costs.

**Keywords:** associated line, modal filtering, per unit length delay.