

УДК 621.391.825

**Двукратное модальное резервирование с переключением  
окончаний отказавших каналов**

С.Р. Морозов

Научный руководитель: профессор, д.т.н. Т.Р. Газизов  
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,  
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 40, 634050  
E-mail: [pred11072@yandex.ru](mailto:pred11072@yandex.ru)

**Double modal reservation with switching of the ends of failed channels**

S.R. Morozov

Scientific Supervisor: Prof., PhD. T.R. Gazizov  
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Russia, Tomsk,  
Lenin str. 40, 634050  
E-mail: [pred11072@yandex.ru](mailto:pred11072@yandex.ru)

**Abstract.** *The results of an analysis of the possibilities for improving the characteristics of a structure with double modal reservation are presented. The results show that the use of arbitrary boundary conditions can provide an additional reduction in the interference by an amount from 2 to 3,5 %.*

**Key words.** *Electromagnetic compatibility, modal filtering, modal reservation.*

**Введение.** При создании печатных плат (ПП) радиоэлектронной аппаратуры, должно уделяться большое внимание электромагнитной совместимости (ЭМС) и функциональной безопасности электронных схем [1]. Существует ряд способов повышения функциональной безопасности, одним из которых является резервирование. Однако, от воздействия систематических электромагнитных помех (ЭМП) резервирование не защищает, так как при отказе резервируемой системы откажет и резервная система.

Большую опасность для РЭА представляют сверхкороткие импульсы (СКИ), несущие большую энергию при малой длительности. Для предотвращения их влияния используется модальная фильтрация [2]. Разработан и используется подход к компоновке и трассировке резервируемых проводников системы с холодным резервированием, называемый модальным резервированием (МР). Его особенностью является реализация модальной фильтрации за счет использования сильной электромагнитной связи между проводниками [3].

Исследования структур с МР показали, что с последовательными отказами компонентов на концах резервируемых проводников имеет значение порядок переключения на резервные каналы [4]. Так, в случае отказа, моделируемого коротким замыканием (КЗ) или обрывом (ХХ) на одном из концов резервируемой цепи, после переключения на резервную цепь максимальное напряжение импульсов разложения на выходе изменяется как в большую, так и в меньшую стороны. Тогда, дополнительного ослабления помехи возможно достичь за счет переключения окончаний пассивных линий в состояние КЗ или ХХ, что ранее не исследовалось.

Цель работы – рассмотреть возможность переключения окончаний в структуре с двукратным МР для дополнительного ослабления помехового импульса.

**Материалы и методы исследования**

На рис. 1а представлена выбранная модель поперечного сечения из [5]. Моделирование выполняется в системе TALGAT [6] без учета потерь в проводниках и диэлектриках. Параметры поперечного сечения: ширина сигнального проводника  $w_1 = w_3 = 200$  мкм,  $w_2 = 440$  мкм, расстояние между проводниками  $s_1 = s_2 = 230$  мкм, толщина проводника

$t = 105$  мкм, толщина диэлектрика  $h = 290$  мкм, диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_r = 4$ , длина структуры  $l = 1$  м.

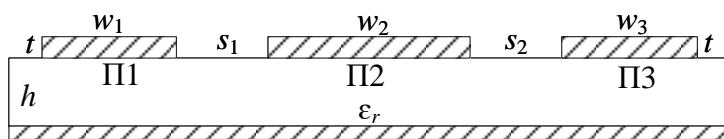


Рис. 1. Поперечное сечение выбранной структуры с двукратным МР

На рис. 2 представлена эквивалентная схема структуры с двукратным МР с устройством переключения (УП) окончаний на ближнем и дальнем концах структуры и источника сигнала до и после отказа. УП представляют собой 2 блока по 3 однополюсных трёхпозиционных переключателя на ближнем и дальнем концах структуры, соответственно. Они позволяют переключать окончания на ближнем и дальнем концах пассивных проводников. УП источника сигнала состоит из 3 многопортовых переключателя Т типа. За счет трех рабочих состояний (50 Ом, ХХ и КЗ), переключатели позволяют подключить источник сигнала к нужному проводнику. Устройство управления резервированием позволит управлять УП. Так после отказа время переключения занимает от долей до единиц секунд. Параметры источника воздействия имели следующие характеристики: форма импульса – трапецевидная; время нарастания, спада и плоской вершины – 10 пс; амплитуда ЭДС – 2 В. Значения нагрузок  $R1-R6$  взяты равными 50 Ом. КЗ задавалось значением нагрузки  $10^{-6}$  Ом, а ХХ –  $10^6$  Ом.

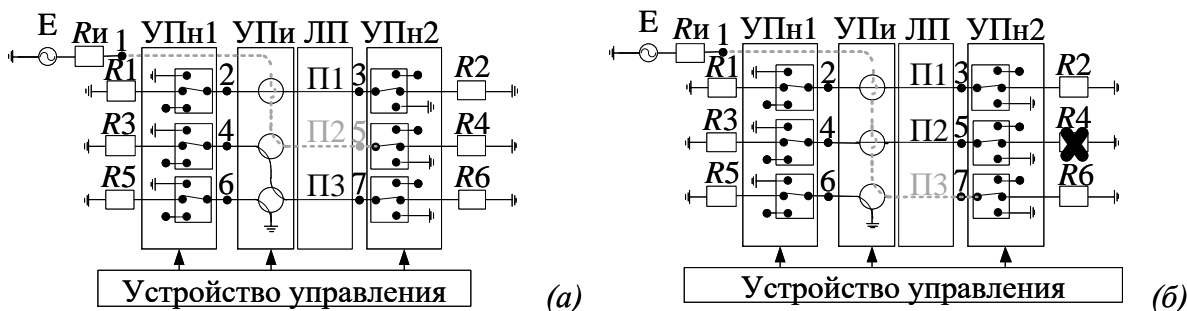


Рис. 2. Эквивалентная схема структуры с двукратным МР с УП нагрузок на ближнем и дальнем концах (УПН1 и УПН2) и источника сигнала (УПи) до (а) и после отказа (б)

### Результаты

На рис. 3 представлены зависимости  $U_{\max}$  от номера отказа в вариантах схем без и с переключаемой нагрузкой. Видно, что до отказов переключение нагрузки не целесообразно, так как при всех возможных вариантах переключения,  $U_{\max}$  больше, чем без него. Однако после отказов, появляются варианты, обладающие меньшим  $U_{\max}$ . В табл. 1 представлены варианты измененных нагрузок, при которых удастся достичь наименьших значений амплитуд.

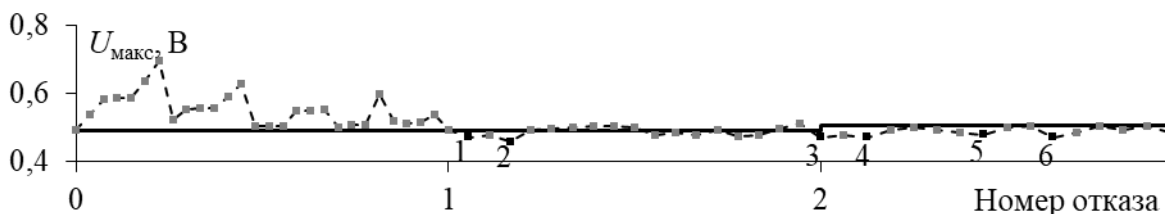


Рис. 3. Зависимости  $U_{\max}$  от номера отказа при стандартном переключении (—) и при переключении с изменяемой нагрузкой пассивных линий (---)

Варианты переключенных нагрузок, обладающих наименьшей амплитудой

После отказа 1			После отказа 2				
№	1	2	№	3	4	5	6
П2	50-XX	50-XX	П1	50-XX	50-XX	50-XX	50-XX
П3	50-XX	XX-XX	П2	50-XX	XX-XX	К3-50	К3-XX
$U, B$	0,471	0,457	$U, B$	0,471	0,471	0,479	0,471

$U_{\max}$  для структуры без изменяемой нагрузки до, после отказов 1 и 2 равны 0,491, 0,49 и 0,504 В соответственно. Всего рассмотрен 61 возможный вариант граничных условий (27 до, 18 после отказа 1 и 16 после отказа 2). После отказа 1 наблюдается 2 варианта граничных условий, амплитуда которых на 2 и 3,5 % меньше соответственно, чем в схеме без изменяемой нагрузки. После отказа 2 есть 4 варианта граничных условий, амплитуда которых на 3,38, 3,38, 2,54 и 3,38 % меньше соответственно, чем без изменяемой нагрузки.

### Заключение

Выполнен анализ возможностей улучшения характеристик структуры за счет изменения граничных условий. Рассмотрены значения  $U_{\max}$  при всех вариантах граничных условий. Обнаружено, что при 2 вариантах после отказа 1 и при 4 вариантах после отказа 2, возможно уменьшить максимальное значение помехового импульса на 2–3,5 %. Это означает, что в ПП с двукратным МР, где требуется максимальное ослабление помехи, возможно использовать структуру с переключаемой нагрузкой.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда №20-19-00446-П, (<https://rscf.ru/project/20-19-00446/>) в ТУСУРе.*

### Список литературы

- ГОСТ Р МЭК 61508-1—2012. Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Общие требования. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 58 с.
- Gazizov A.T., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. UWB pulse decomposition in simple printed structures // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2016. – Vol. 58, № 4. – P. 1136–1142.
- Шарафутдинов В.Р., Газизов Т.Р. Анализ способов резервирования на основе модальной фильтрации // Системы управления, связи и безопасности. – 2019. – № 3. – С.117–144.
- Belousov A. O., Medvedev A. V., Chernikova E. B., Gazizov T. R., Zabolotsky A. M. Switching order after failures in symmetric protective electrical circuits with triple modal reservation // Symmetry. – 2021. – Vol. 13, № 6. – Iss. 1074. – P. 1–22.
- Morozov S. R., Medvedev A. V. Simulating an Asymmetric Structure with Double Modal Reservation // 2023 IEEE XVI International Scientific and Technical Conference Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE) – Novosibirsk : IEEE: 2023. – P. 610–613.
- Kuksenko S.P. Preliminary results of TUSUR University project for design of spacecraft power distribution network: EMC simulation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 560. – P. 1–7.