

Алгоритм анализа структур с трехкратным модальным резервированием после отказов

А.В. Медведев, Т.Р. Газизов

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск,
medart20@rambler.ru

Аннотация — Рассматривается одновременное обеспечение функциональной безопасности и электромагнитной совместимости за счёт модального резервирования (МР). Представлен алгоритм для анализа структур с трехкратным МР после различных видов отказа. Он позволяет проводить моделирование, оценку и выбор оптимального порядка переключения таких цепей. Используя алгоритм, выполнено квазистатическое моделирование конкретной структуры с трехкратным МР. Определен оптимальный порядок переключения, обеспечивающий минимальное напряжение помехи. Разработанный алгоритм может быть использован для аналогичного анализа любых подобных структур с МР.

Ключевые слова — электромагнитная совместимость, надежность, функциональная безопасность, холодное резервирование, модальное резервирование, печатная плата, отказ, сверхкороткий импульс.

I. ВВЕДЕНИЕ

При создании радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) в космической и авиационной промышленности большое внимание уделяется надежности, от которой современные летательные аппараты (ЛА) полностью зависят. Обеспечение надежности РЭА, связанной с безопасностью ЛА – проблема функциональной безопасности, гарантирующей, что неожиданные условия, ошибки, сбои или отказы не вызовут потери ЛА [1].

Разработчикам давно известно о проблемах функциональной безопасности, связанных с ЭМС [2]–[3]. К сожалению, РЭА склонна к нарушениям функционирования, ошибкам в работе и даже повреждениям, когда она подвергается электромагнитным помехам, например, от радаров аэродромов, широкополосных радиопередатчиков, прямого удара молнии. Военные ЛА дополнительно подвергаются мощным воздействиям средств радиоэлектронной борьбы и соответствующих контрмер. Для космической РЭА мощным деструктивным фактором является электростатический разряд на кабельные системы и бортовую аппаратуру [4]. Особенно опасны для РЭА сверхкороткие импульсы (СКИ) из-за высокой проникающей способности, обусловленной малой длительностью воздействия, большой мощностью и широким спектром [5].

Классические экранирование, заземление, фильтрация от электромагнитных помех, сами по себе, не гарантируют экономическую целесообразность, из-за их затратности, и безопасность, из-за множества возможных вариаций электромагнитных помех, которые могут возникнуть за срок службы РЭА.

Резервирование, в частности холодное [6] – один из методов повышения надежности и функциональной безопасности. Его цель – обеспечение успешной работы РЭА даже при отказе одной или нескольких его частей. Это может быть наиболее рентабельным или, возможно, единственным решением, если требования к надежности выходят за рамки современного уровня техники. Однако за резервирование приходится расплачиваться увеличением сложности, стоимости, габаритов и массы РЭА, а также усложнением проверки аппаратуры и её обслуживания. Между тем, электромагнитные помехи могут быть систематическими или влиять на все резервированные элементы РЭА одновременно, тогда преимущества резервирования будут потеряны [7], [8].

В настоящее время важно разрабатывать надежные системы, изначально устойчивые к электромагнитным помехам [9]. В РЭС с резервированием, как надежность, так и обеспечение ЭМС, в части восприимчивости к электромагнитным излучениям, зависят от расположения резервируемых проводников относительно друг друга [10], [11]. Кроме этого, требуется защита РЭС от кондуктивных воздействий, что обычно достигается за счет включения помехозащитных устройств, увеличивающих массу, размеры и стоимость РЭС, но часто неприемлемо: например, в космических аппаратах, подводных лодках и при массовом производстве, соответственно. Однако, используя совместно модальную фильтрацию [12] и избыточность холодного резервирования, можно осуществить модальное резервирование (МР) для защиты от СКИ [13]. Это достигается за счет такого выполнения холодного резервирования, при котором резервируемая и резервные цепи используют эффект модальной фильтрации. При этом могут уменьшиться габариты резервируемых и резервных систем. Используя МР, можно добиться уменьшения восприимчивости рассматриваемых цепей к внешним кондуктивным воздействиям и уровня кондуктивных эмиссий от этих цепей.

Предварительные исследования структур с МР показали, что в случае выхода из строя резервируемой цепи, моделируемого либо коротким замыканием (КЗ), либо обрывом/холостым ходом (ХХ) на одном из концов, меняется максимальное напряжение на выходе цепи после переключения на резервную [14], [15]. Показано [16], что в структуре с трехкратным МР после последовательных отказов компонентов важен порядок переключения цепей, поскольку его выбором можно уменьшить напряжение помехи.

Однако, не рассматривался вопрос анализ структур с трехкратным МР после различных типов отказа на концах и вдоль проводника в произвольном месте. Между тем, возможность такого анализа сдерживается его сложностью, требующей соответствующих алгоритмов. Цель данной работы – привести алгоритм, позволяющий проводить моделирование, оценку и выбор оптимального порядка переключения цепей с трехкратным МР после различных отказов.

II. ПОДГОТОВКА К МОДЕЛИРОВАНИЮ

A. Подход к моделированию

Моделирование проводилось в системе TALGAT [17] 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 [18].

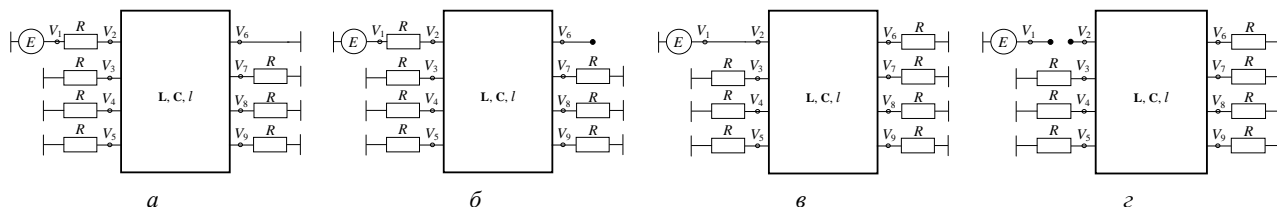


Рис. 2. Схемные модели: короткое замыкание на выходе (а), обрыв на выходе (б), короткое замыкание на входе (в), обрыв на входе (г) проводника

B. Исследуемая структура

Поперечное сечение для моделирования, на примере структуры с 3-кратным МР с опорным проводником в виде боковых полигонов, представлено на рис 1а. Значения параметров взяты из [16]: толщина подложки $h = 300$ мкм, относительная диэлектрическая проницаемость подложки $\epsilon_{r1} = 4,5$, а среды $\epsilon_{r2} = 1$, толщина проводников $t = 18$ мкм, ширина сигнального проводника $w_1 = 500$ мкм, ширина опорного проводника $w_2 = 1600$ мкм, расстояние между торцами проводника $d = 1600$ мкм, расстояние между сигнальными проводниками $s = 220$ мкм. На рис. 1б представлена принципиальная схема структуры с трехкратным МР в системе TALGAT. Номинал резисторов R (до отказов) 105 Ом.

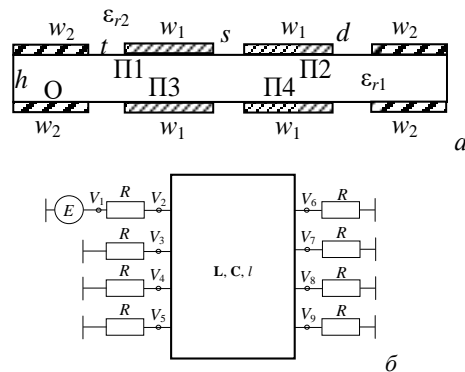


Рис. 1. Поперечное сечение (а) и принципиальная схема (б) структуры с трехкратным МР в системе TALGAT

C. Схемные модели отказов

Здесь представлены схемные модели, имитирующие реальные отказы вдоль проводников линии передачи с трехкратным МР. Полагалось, что цепь без отказов, если граничные условия на концах проводников примерно соответствуют 105 Ом, а при отказе одного компонента системы на одном из концов цепи образуется КЗ или ХХ. Схемные модели, имитирующие отказы (КЗ, ХХ и их вариации) в начале и конце проводников, представлены на рис. 2. При отказе вдоль проводника в произвольном месте структура длиной l делится на два участка с длинами l_1 и l_2 . Схемные модели, имитирующие отказы вдоль проводника в произвольном месте, представлены на рис. 3.

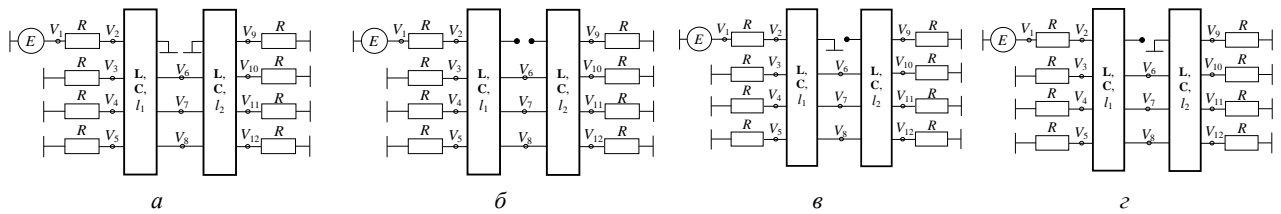


Рис. 3. Схемные модели с обрывом проводника: с замыканием концов на землю (а), без замыкания (б), с замыканием левого конца на землю (с), с замыканием правого конца на землю (д) на выходе первого и входе второго участков линии передачи

D. Варианты выбора активного проводника после отказов

На рис. 4 показаны варианты выбора активного проводника после последовательных отказов на одном из концов структуры с 3-кратным МР. На рис. 5 представлена эквивалентная схема, имитирующая последовательные отказы на одном из концов активного проводника для симметричных структур с 3-кратным МР. После отказа 1 возможно переключение на любой из трех свободных проводников, при этом, вариант переключения определяет поведение выходных характеристик. Так, после отказа 1 появляются 3 варианта переключения. После отказа 2, для каждого из трех вариантов остаются 2 варианта переключения, а после отказа 3 можно переключиться лишь на последний оставшийся проводник (рис. 4). Рассмотрим, для примера, вариант 1 после отказов (рис. 4., крайний «путь» слева): после отказа 1 на одном из концов активного проводника П1 происходит переключение на проводник П2 и выходные

характеристики изменяются; после отказа 2 можно переключиться либо на П3 (вариант 1.1) либо на П4 (вариант 1.2). Однако из рис. 1а следует, что характеристики для этих вариантов будут одинаковы (поскольку 2 оставшихся проводника расположены на одном проводящем слое структуры). После отказа 3 для вариантов 1.1 и 1.2 можно переключиться либо на П4 либо на П3, соответственно, но выходные характеристики в данном случае также будут одинаковы. Таким образом, существуют три варианта переключения после отказов, а отказ 3 не влияет на порядок переключения (рис. 5) в случае симметричных структур. На рис. 5 показано, что активным проводником в каждом случае (до и после отказов) является П1, а каждый отказавший проводник был активным проводником до отказа, что также справедливо для всех симметричных структур. Таким образом, эквивалентная схема, представленная на рис. 5, справедлива для всех симметричных структур с 3-кратным МР.

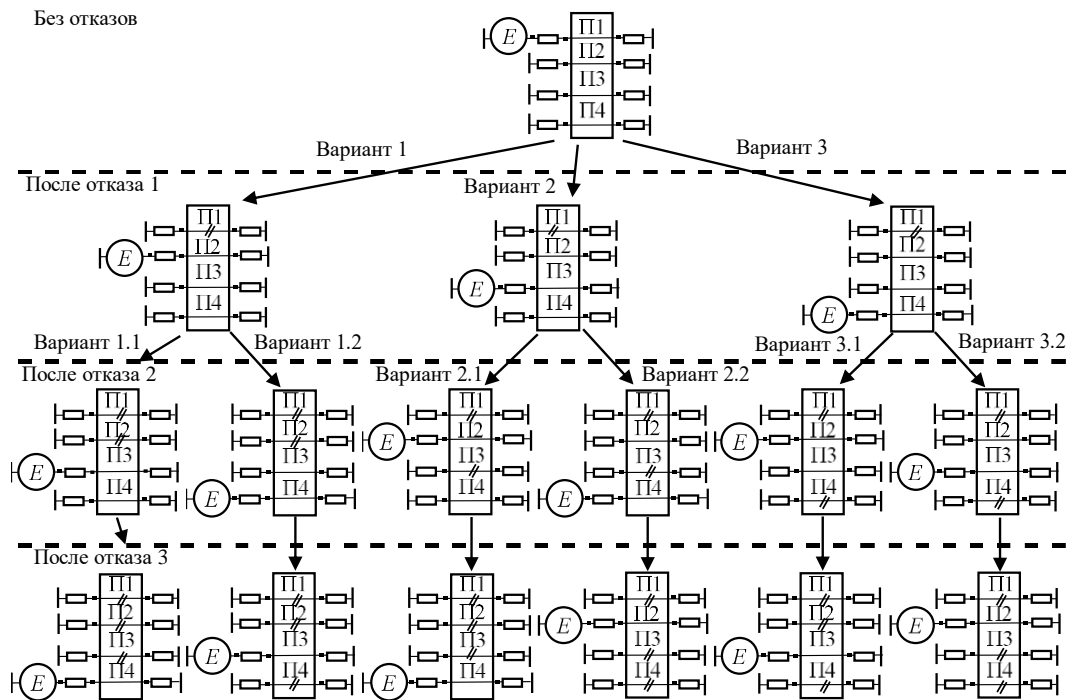


Рис. 4. Варианты выбора активного проводника после отказов на одном из концов структуры с МР

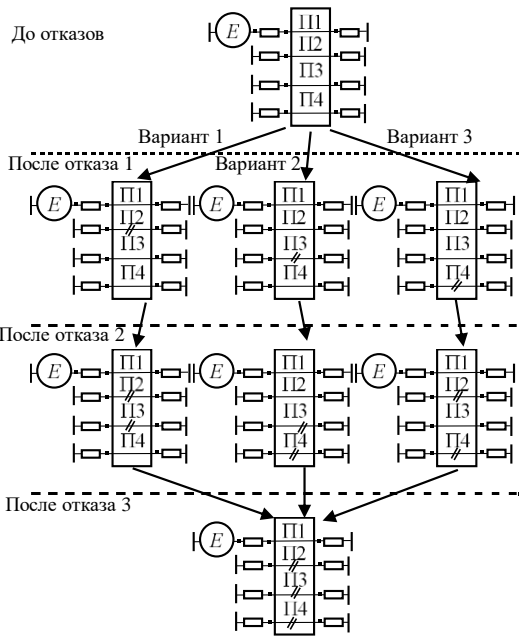


Рис. 5. Эквивалентная схема, имитирующая последовательные отказы на одном из концов активного проводника для симметричных структур с 3-кратным МР (каждый отказавший проводник – активный проводник до отказа)

III. ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА

Здесь представлен алгоритм, который позволяет проводить моделирование, оценку и выбор оптимального порядка переключения цепей с трехкратным МР после отказов. Он построен по принципу оценки максимального напряжения (U_{max}) на выходе резервируемого проводника и обрабатывает различные типы отказов и их вариации на конце и вдоль проводника в произвольном месте.

1. Определить U_{max} на дальнем конце резервируемого проводника до отказов при $t_{\Sigma} < l \cdot \min|\Delta\tau_i|$, где t_{Σ} – общая длительность воздействующего импульса.
2. Рассчитать U_{max} в конце активного проводника после отказов 1, 2, 3 на концах проводников для вариантов переключения 1, 2, 3.
3. Построить зависимости значений U_{max} от номера отказа на концах проводников для вариантов переключения 1, 2, 3.
4. Представить структуру в виде N отрезков длиной l/N , где l длина всей структуры.
5. Найти U_{max} для вариантов переключения после отказов 1, 2, 3 (выбранные схемные модели) вдоль проводников для вариантов переключения 1, 2, 3.
6. Построить зависимости значений U_{max} от номера отказа вдоль проводников для вариантов переключения 1, 2, 3.
7. Проанализировать полученные результаты.

IV. АПРОБАЦИЯ АЛГОРИТМА

A. Определение U_{max} на дальнем конце резервируемого проводника до отказов

На вход структуры длиной 1 м с трехкратным МР (рис. 1б) до отказов, поочередно подавались импульсы с ЭДС 2 В и t_{Σ} 30 пс и 600 пс. Из вычисленных откликов на выходе (рис. 6) видно, что воздействующий импульс полностью раскладывается на 4 импульса с близкими амплитудами и с задержками 4,62, 5,12, 5,62 и 6,22 нс. U_{max} при разложении импульсов 30 и 600 пс равны по 0,238 В.

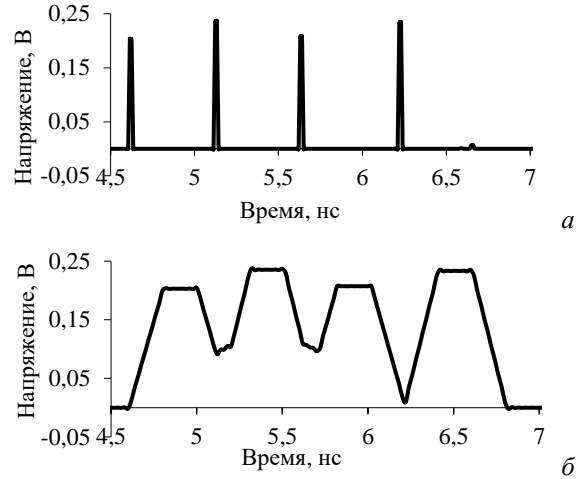


Рис. 6. Формы напряжений на дальнем конце резервируемого проводника при t_{Σ} входного импульса 30 (а) и 600 (б) пс

B. Зависимости значений U_{max} от номера отказа на концах проводников для вариантов переключения 1, 2, 3

Значения U_{max} для структур после отказов 1, 2 и 3 на концах проводников для вариантов переключения 1, 2, 3 рассмотрены в [16]. На рис. 7 для вариантов переключения 1, 2 и 3 представлены зависимости значений U_{max} от номера отказа для данной структуры.



Рис. 7. Зависимости U_{max} для вариантов 1, 2, 3 от номера отказа

Из рис. 7 видно, что при вариантах переключения 1, 2, 3 после отказа 1 наблюдается изменение значения U_{max} от 0,238 до 0,293, 0,291 и 0,272 В, соответственно, после отказа 2 – до 0,35, 0,334 и 0,337 В, а после отказа 3 – до 0,393 В. Оптимальн (по критерию минимального напряжения) вариант переключения 3, так как значение U_{max} после отказа 1 составляет 0,272 В, а после отказа 2 – 0,337 В

(отличаясь от варианта переключения 2 после отказа 2 лишь на 0,003 В).

С. Представление структуры в виде N отрезков

При отказе вдоль проводника, один из видов отказов может быть в любом месте проводника, а после переключения U_{max} на конце резервируемого проводника может отличаться, в зависимости от места отказа. Таким образом, чем большим числом отрезков будет представлена структура, тем точнее будет анализ структуры с МР после отказов. Однако, это увеличивает количество рассматриваемых вариантов. Для предварительного моделирования, при анализе структуры после отказов 1 и 2 представим их в виде 10 и 4 отрезков, соответственно. Отказ 3 – не рассматривается, так как он не влияет на порядок переключения [16].

Д. Поиск значений U_{max} после отказов для вариантов переключения 1, 2, 3

На рис. 8 и 9 (для $t_{\Sigma} = 30$ пс и $t_{\Sigma} = 600$ пс, соответственно) представлены зависимости U_{max} от различной длины участка l_1 при отказе типов: XX–XX, XX–КЗ (КЗ – XX – взаимный вариант отказа), КЗ – КЗ в сравнении с U_{max} при отказе на одном из концов проводника для вариантов переключения 1, 2, 3.

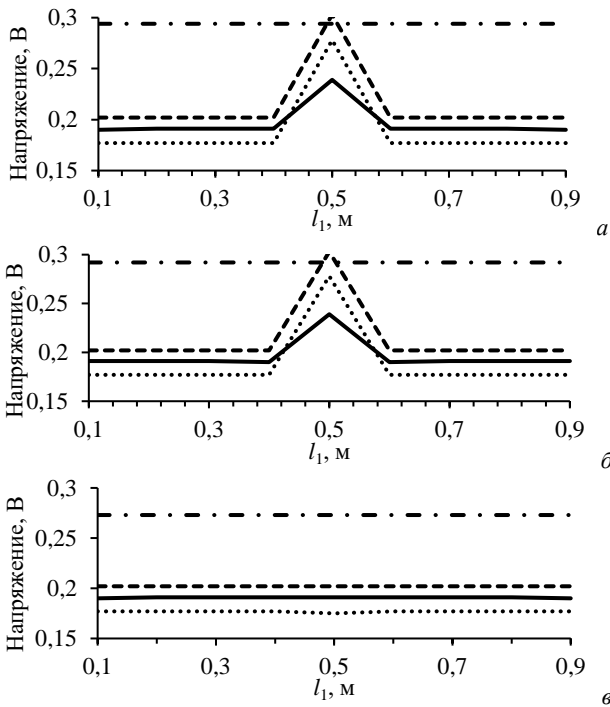


Рис. 8. Зависимости U_{max} от l_1 при отказе типов XX–XX (---), XX–КЗ (КЗ – XX) (—), КЗ – КЗ (····) в сравнении с U_{max} после отказа 1 на одном из концов проводника (- · - ·) для вариантов переключения 1 (а), 2 (б), 3 (в) для $t_{\Sigma} = 30$ пс

Из рис. 8 видно, что при вариантах переключения 1, 2, 3 после отказа 1 наблюдается изменение значения U_{max} до 0,303, 0,303 и 0,202 В, соответственно. Таким образом, все три U_{max} либо примерно равны, либо меньше, чем U_{max} при отказе на одном из концов проводника для вариантов

переключения 1, 2 и 3. Из рис. 9 видно, что при вариантах переключения 1, 2, 3 после отказа 1 наблюдается изменение значения U_{max} до 0,394, 0,437 и 0,325 В, соответственно. Таким образом, все три U_{max} на много больше, чем U_{max} при отказе на одном из концов проводника для вариантов переключения 1, 2 и 3. После отказа 1 оптимален вариант переключения 3, так как значение U_{max} при $t_{\Sigma} = 30$ пс составляет 0,202 В, а $t_{\Sigma} = 600$ пс – 0,325 В.

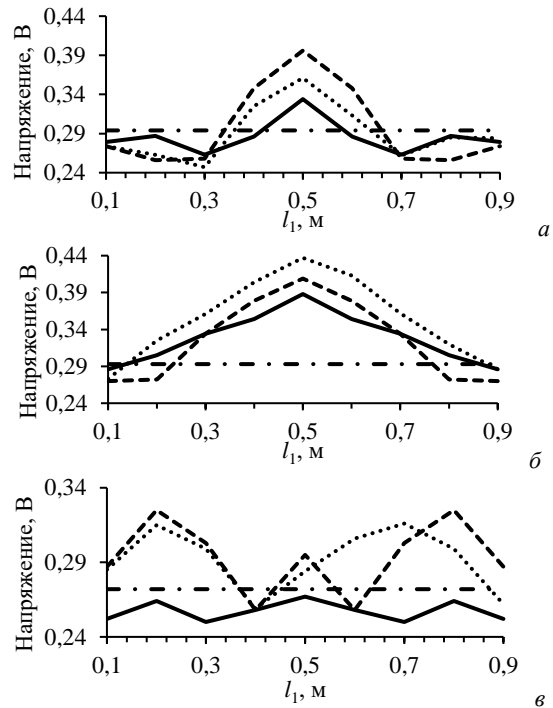


Рис. 9. Зависимости U_{max} от l_1 при отказе типов XX–XX (---), XX–КЗ (КЗ – XX) (—), КЗ – КЗ (····) в сравнении с U_{max} после отказа 1 на одном из концов проводника (- · - ·) для вариантов переключения 1 (а), 2 (б), 3 (в) для $t_{\Sigma} = 600$ пс

На рис. 10 представлена зависимость U_{max} на дальнем конце резервируемого проводника после отказа 1 от t_{Σ} . Таким образом, при изменении t_{Σ} , U_{max} на дальнем конце резервированного проводника после переключения изменяется при отказе вдоль проводника. При дальнейшем исследовании использовался импульс с $t_{\Sigma} = 600$ пс.

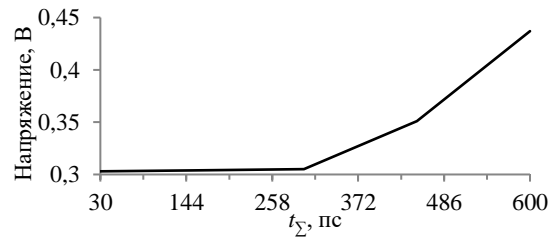


Рис. 10. Зависимость U_{max} на дальнем конце резервируемого проводника после отказа 1 от t_{Σ} для варианта переключения 1

С целью анализа после отказа 2, выполнено 459 измерений, по 153 измерения на вариант переключения (рис. 11). С 1 по 35 вычисления: отказ 1 на одном из

концов проводника, а отказ 2 вдоль проводника. С 36 по 71 вычисления: отказ 1 вдоль проводника, а отказ 2 на одном из концов проводника. С 72 по 126 вычисления: отказ 1 и 2 вдоль проводника на одном расстоянии от начала линии. С 127 по 153 вычисления: отказ 1 и 2 вдоль проводника на разных расстояниях от начала линии.

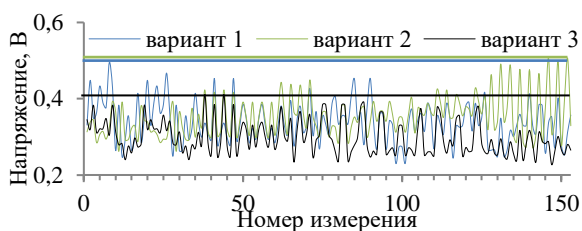


Рис. 11. Зависимость U_{\max} на дальнем конце резервируемого проводника после отказа 2 от номера измерения

Из рис. 11 видно, что при вариантах переключения 1, 2, 3 после отказа 2 наблюдается изменение значения U_{\max} до 0,495, 0,506 и 0,411 В. После отказа 2 оптимален вариант переключения 3.

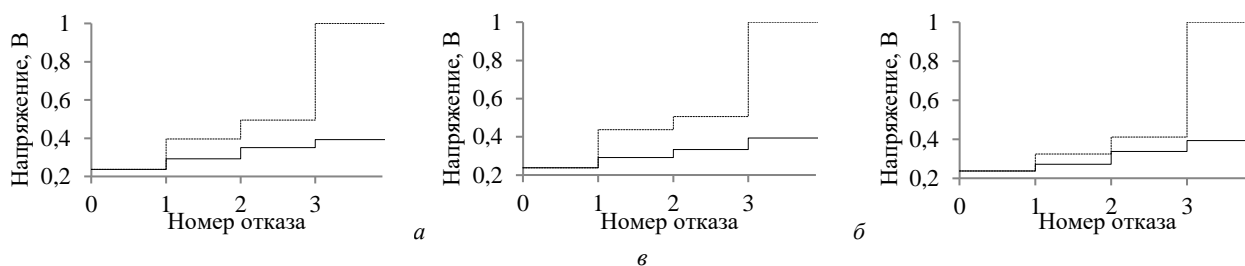


Рис. 13. Зависимости U_{\max} для вариантов 1 (а), 2 (б), 3 (в) от отказов на конце (—) и вдоль проводников (---)

V. Выводы

В работе предложен алгоритм для моделирования структур с трехкратным МР. Он позволяет проводить моделирование, оценку и выбор оптимального порядка переключения таких цепей. Используя алгоритм, выполнено квазистатическое моделирование конкретной структуры с трехкратным МР. Определен оптимальный порядок переключения, дающий максимальное ослабление помехи. Разработанный алгоритм открывает возможности аналогичного анализа любых других структур с МР.

ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансовой поддержке российского научного фонда (проект №20-19-00446) в ТУСУРе.

Е. Зависимости значений U_{\max} от номера отказа вдоль проводников для вариантов переключения 1, 2, 3

На рис. 12 представлены зависимости U_{\max} для вариантов переключения 1, 2, 3 от отказов.

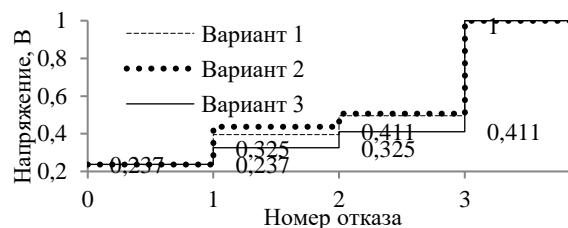


Рис. 12. Зависимости U_{\max} для вариантов 1, 2, 3 от номера отказа

Из рис. 12 видно, что оптимален вариант переключения 3, так как в вариантах 1 и 2 после отказа 1 наблюдается изменение U_{\max} от 0,238 до 0,325 и 0,272 В, после отказа 2 – до 0,411 В, а после отказа 3 – предположительно до 1 В, соответственно.

Ф. Анализ полученных результатов

На рис. 13 представлены зависимости U_{\max} для вариантов 1, 2, 3 от отказов на конце и вдоль проводников. Видно, что изменение максимального напряжения для оптимального варианта переключения (вариант 3) меньше, чем для остальных вариантов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] IEC 61508 “Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-Related Systems,” Parts 1-7.
- [2] IEE Guidance Document on EMC and functional Safety. – IEE. – 2008. –P.177.
- [3] Armstrong K. EMC-Related Functional Safety of Electronically Controlled Equipment / Compliance Engineering. 2001. P. 24–32.
- [4] Abrameshin A.E., Kechiev L.N. Functional safety of onboard systems of space craft at ESD / Moscow Institute of Electronics and Mathematics, Higher School of Economics (MIEM HSE). 2012. P. 1–11.
- [5] Gizatullin Z.M., Gizatullin R.M. Investigation of the immunity of computer equipment to the power-line electromagnetic interference / Journal of Communications Technology and Electronics. no. 5. 2016. P. 546–550.
- [6] Öner K.B., Scheller-Wolf A., Geert-Jan van Houtum. Redundancy Optimization for Critical Components in High-Availability Technical Systems / Operations Research. 2013.
- [7] Jin T. Reliability Engineering and Services / Wiley Intierence, 2019.

- [8] Ismail E.; Utelieva N.; Balmaganbetova A.; Tursynbayeva S. The choice of measures reliability of the software for space applications / 2020 International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering (ICECCE). 2020. P. 1–5.
- [9] Pissoort D., Lannoo J., Van Waes J., Degraeve A., Boydens J. Techniques and Measures to Achieve EMI Resilience in Mission- or Safety-Critical Systems / IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine. 2017. P. 107–114.
- [10] Degraeve A. Study of the effectiveness of spatially EM-diverse redundant systems under plane-wave illumination / Asia Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC). 2016. P. 211–213.
- [11] Degraeve A. Study of the effectiveness of spatially EM-diverse redundant systems under reverberation room condition / IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC). 2016. P. 374–378.
- [12] Gazizov A.T., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. UWB Pulse Decomposition in Simple Printed Structures / IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 58, no. 2016. P. 1136–1142.
- [13] Sharafutdinov V.R., Gazizov T.R. Analysis of reservation methods based on modal filtration / Systems of Control, Communication and Security. 2019. P. 117–144.
- [14] Medvedev A.V., Sharafutdinov V.R. Using modal reservation for ultrashort pulse attenuation after failure / Proc. of IEEE 2019 International multi-conference on engineering, computer and information sciences (SIBIRCON). 2019. P. 1–6.
- [15] Medvedev A.V., Gazizov T.R., Zhechev Y.S. Evaluating modal reservation efficiency before and after failure / IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. P. 1–6.
- [16] 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. P. 1–36.
- [17] Kuksenko S.P. Preliminary results of TUSUR University project for design of spacecraft power distribution network: EMC simulation / IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. P. 1–7.
- [18] 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.

Algorithm for Analysis of Structures with Triple Modal Reservation after Failures

A.V. Medvedev, T.R. Gazizov

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, medart20@rambler.ru

Abstract — This paper investigates the case of providing functional safety simultaneously with electromagnetic compatibility of radio electronic equipment by employing modal reservation (MR) technology. The proposed algorithm analyzes structures with triple MR after various types of failure. This algorithm allows for simulation, evaluation and selection of the optimal switching order for such circuits. It is built on the principle of evaluating the maximum voltage (U_{max}) at the output of the reserved conductor, and handles various types of faults and their variations at the end and along the conductor at an arbitrary location. Using this algorithm, we performed quasi-static simulation of a specific structure with triple MR and determined the optimal switching order that provided the minimum interference. For this structure, switching option 3 was optimal, since for options 1 and 2 after failure 1 there was a change in U_{max} from 0.238 to 0.325 and 0.272 V, after failure 2 - up to 0.411 V, and after failure 3 - presumably up to 1 V. The developed algorithm can be used for similar analysis of any similar structures with MR.

Keywords — electromagnetic compatibility, reliability, functional safety, cold redundancy, modal reservation, printed circuit board, failure, ultra-short pulse.

REFERENCES

- [1] IEC 61508 “Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-Related Systems,” Parts 1-7.
- [2] IEE Guidance Document on EMC and functional Safety. – IEE. – 2008. –P.177.
- [3] Armstrong K. EMC-Related Functional Safety of Electronically Controlled Equipment / Compliance Engineering. 2001. P. 24–32.
- [4] Abrameshin A.E., Kechiev L.N. Functional safety of onboard systems of space craft at ESD / Moscow Institute of Electronics and Mathematics, Higher School of Economics (MIEM HSE). 2012. P. 1–11.
- [5] Gizatullin Z.M., Gizatullin R.M. Investigation of the immunity of computer equipment to the power-line electromagnetic interference / Journal of Communications Technology and Electronics. no. 5. 2016. P. 546–550.
- [6] Öner K.B., Scheller-Wolf A., Geert-Jan van Houtum. Redundancy Optimization for Critical Components in High-Availability Technical Systems / Operations Research. 2013.
- [7] Jin T. Reliability Engineering and Services / Wiley Interience, 2019.
- [8] Ismail E.; Utelieva N.; Balmaganbetova A.; Tursynbayeva S. The choice of measures reliability of the software for space applications / 2020 International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering (ICECCE). 2020. P. 1–5.
- [9] Pissoort D., Lannoo J., Van Waes J., Degraeve A., Boydens J. Techniques and Measures to Achieve EMI

- Resilience in Mission- or Safety-Critical Systems / IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine. 2017. P. 107–114.
- [10] Degraeve A. Study of the effectiveness of spatially EM-diverse redundant systems under plane-wave illumination / Asia Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC). 2016. P. 211–213.
- [11] Degraeve A. Study of the effectiveness of spatially EM-diverse redundant systems under reverberation room condition / IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC). 2016. P. 374–378.
- [12] Gazizov A.T., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. UWB Pulse Decomposition in Simple Printed Structures / IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 58, no. 2016. P. 1136–1142.
- [13] Sharafutdinov V.R., Gazizov T.R. Analysis of reservation methods based on modal filtration / Systems of Control, Communication and Security. 2019. P. 117–144.
- [14] Medvedev A.V., Sharafutdinov V.R. Using modal reservation for ultrashort pulse attenuation after failure / Proc. of IEEE 2019 International multi-conference on engineering, computer and information sciences (SIBIRCON). 2019. P. 1–6.
- [15] Medvedev A.V., Gazizov T.R., Zhechev Y.S. Evaluating modal reservation efficiency before and after failure / IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. P. 1–6.
- [16] 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. P. 1–36.
- [17] Kuksenko S.P. Preliminary results of TUSUR University project for design of spacecraft power distribution network: EMC simulation / IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. P. 1–7.
- [18] 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.