

Анализ асимметричных структур с трехкратным модальным резервированием

С. Р. Морозов[✉], Т. Р. Газизов

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

[✉] pred11072@yandex.ru

Аннотация

Введение. Для повышения надежности и функциональной безопасности радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) разработан новый подход к резервированию электрических цепей, называемый модальным резервированием (МР). Его особенностью является использование сильной электромагнитной связи между проводниками, за счет чего удастся повысить надежность и обеспечить электромагнитную совместимость разрабатываемого устройства. Общепринятым способом построения печатных плат (ПП) с МР является использование структуры, выполненной с сохранением зеркальной симметрии по вертикальной, а в некоторых случаях – и по горизонтальной оси. Между тем асимметричные варианты компоновок ПП с МР ранее не рассматривались.

Цель работы. Сравнение ПП с трехкратным МР, построенных при симметричных и асимметричных вариантах компоновки для выявления полезных эффектов во временной области.

Материалы и методы. Моделирование выполнялось в системе TUSUR.EMC без учета потерь в проводниках и диэлектриках. В качестве исходной структуры с трехкратным МР выбрана зеркально-симметричная четырехпроводная линия передачи с боковой и лицевой связями.

Результаты. По результатам работы не было обнаружено асимметричных наборов параметров, ослабляющих помеховый импульс более симметричных наборов (1 и 2) при всех возможных вариантах отказа. Однако обнаружены наборы (8, 9 и 12), при которых удастся достичь в 2.38, 2.75 и 2.22 раза соответственно большее значение $\Delta\tau_{\min}$, чем при наборе 1 (значение $\Delta\tau_{\min}$ которого больше, чем при симметричном наборе 2).

Заключение. Обнаруженные наборы 8, 9 и 12 показывают, что компоновку $w_1 = w_2 \neq w_3 = w_4$, $s_1 = s_2$ возможно использовать для уменьшения вероятности наложения импульсов на реальном устройстве, а также для выполнения ПП меньшей длины по сравнению с симметричным вариантом без риска наложения импульсов. Полученные данные можно использовать как рекомендации при трассировке макетов ПП в ситуациях, когда необходимо увеличить разность задержек.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, радиоэлектронная аппаратура, печатная плата, модальная фильтрация, модальное резервирование

Для цитирования: Морозов С. Р., Газизов Т. Р. Анализ асимметричных структур с трехкратным модальным резервированием // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2025. Т. 28, № 2. С. 6–19.

doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-2-6-19

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Исследование выполнено при финансовой поддержке российского научного фонда № 24-29-00579 (<https://rscf.ru/project/24-29-00579/>) в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники.

Благодарности. Авторы благодарны Медведеву А. В. за помощь в работе.

Статья поступила в редакцию 15.08.2024; принята к публикации после рецензирования 13.01.2025; опубликована онлайн 30.04.2025

Analysis of Asymmetric Structures with Triple Modal Reservation

Sergey R. Morozov[✉], Talgat R. Gazizov

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

✉ pred11072@yandex.ru

Abstract

Introduction. An original approach to electrical circuit reservation, referred to as modal reservation (MR), is developed with the purpose of increasing the reliability and functional safety of radio electronic equipment (REA). A specific feature of this method consists in the use of strong electromagnetic coupling between the conductors, thereby increasing the reliability and ensuring the electromagnetic compatibility of the device under development. Printed circuit boards (PCBs) with MR are conventionally constructed using a structure designed to maintain mirror symmetry along the vertical, and, in some cases, along the horizontal axis. Meanwhile, asymmetrical options for PCB layouts with MR have not been previously considered.

Aim. To compare triple MR PCBs constructed using symmetrical and asymmetrical layout options to identify beneficial effects in the time domain.

Materials and methods. Simulations were carried out in the TUSUR.EMC software environment without considering losses in the conductors and dielectrics. A mirror-symmetrical four-wire transmission line with edge and broad-side couplings was selected as the initial triple MR design.

Results. No asymmetric sets of parameters that would attenuate the interference pulse of more symmetric sets (1 and 2) were found for all possible failure scenarios. However, sets 8, 9, and 12 allowed 2.38, 2.75, and 2.22 times higher $\Delta\tau_{\min}$ values to be achieved compared to set 1 (whose $\Delta\tau_{\min}$ value was greater than with symmetric set 2).

Conclusion. The discovered sets 8, 9, and 12 show that the arrangement $w_1 = w_2 \neq w_3 = w_4$, $s_1 = s_2$ can be used to reduce the probability of pulse overlap on actual devices, as well as to implement shorter-length PCBs compared to the symmetrical option without the risk of pulse overlap. The data obtained can be used when tracing PCB layouts in situations requiring an increase in the delay difference.

Keywords: electromagnetic compatibility, radio electronic equipment, printed circuit board, modal filtering, modal reservation

For citation: Morozov S. R., Gazizov T. R. Analysis of Asymmetric Structures with Triple Modal Reservation. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2025, vol. 28, no. 2, pp. 6–19.
doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-2-6-19

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Source of funding. The research was supported by the Russian Science Foundation No. 24-29-00579 (<https://rscf.ru/project/24-29-00579/>) in Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

Acknowledgements. The authors is grateful to A. V. Medvedev for assistance in the work.

Submitted 15.08.2024; accepted 13.01.2025; published online 30.04.2025

Введение. При создании печатных плат (ПП) радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) большое внимание уделяется электромагнитной совместимости (ЭМС) и функциональной безопасности [1] при воздействии электромагнитных помех (ЭМП). Особо опасны кондуктивные сверхширокополосные (СШП) помехи, которые имеют высокое напряжение, малую длительность и широкий спектр. СШП-помехи могут проникать в РЭА по цепям питания и приводить к выгоранию компонентов, а следовательно – к выходу РЭА из

строения. Функциональная безопасность РЭА при воздействии ЭМП, в частности, СШП-помех, крайне важна. Поэтому необходимо использовать подходы, при которых методы обеспечения ЭМС интегрированы в конструкцию РЭА, схемотехнику электронных схем, электронную компонентную базу и связаны с методами обеспечения функциональной безопасности.

Для обеспечения функциональной безопасности часто используют резервирование [2, 3]. При распространении ЭМП в РЭА резервиро-

вания может оказаться недостаточно. Тогда его можно расширить электромагнитным разнообразием [4], чтобы создать различное поведение под воздействием одной и той же ЭМП. Это разнообразие достигается такими методами, как использование различных архитектур (процессоров, памяти), инверсия данных и сигналов, различная реализация одного и того же алгоритма и десинхронизация компонентов как в аппаратном, так и в программном обеспечении. Один из вариантов обеспечения электромагнитного разнообразия – пространственное разнесение резервируемых ПП. В [5, 6] показано, что от расположения резервируемых проводников или ПП друг относительно друга зависят как надежность, так и обеспечение ЭМС.

На основе холодного резервирования разработан новый подход к компоновке и трассировке резервируемых проводников одноименных цепей для ослабления влияния ЭМП малой длительности, называемый модальным резервированием (МР) [7]. При таком подходе резервируемая и резервные цепи образуют модальный фильтр (МФ) [8–11]. МР позволяет уменьшить габариты резервируемых и резервных систем, а также снизить уровень воздействия кондуктивных ЭМП и восприимчивость рассматриваемых цепей к ним.

Исследования структур с МР показали, что после отказов части компонентов на концах резервируемых проводников будет важен порядок переключения [12]. Так, в случае отказа, моделируемого либо коротким замыканием (КЗ), либо обрывом (ХХ) на одном из концов резервируемой цепи, после переключения на резервную цепь максимальная амплитуда выходного напряжения ($U_{\max}$) изменяется.

Разработаны и исследованы способы трехкратного МР [13]. При этом считалось, что структура симметрична по вертикальной оси,

т. е. ширины проводников, как и расстояния между проводниками, равны между собой. Однако варианты асимметричной компоновки проводников для этой структуры с МР рассмотрены не были. Цель работы – рассмотреть структуры с различными вариантами асимметрии, при которых удастся достичь лучших характеристик до и после отказов части компонентов, чем в симметричном варианте.

Материалы и методы. Моделирование выполнялось в системе TUSUR.EMC [14, 15] без учета потерь в проводниках и диэлектриках. Структура с трехкратным МР представляет собой четырехпроводную линию передачи (ЛП) с боковой и лицевой связями. Опорные проводники выполнены в виде отдельных слоев сверху и снизу. Считается, что структура в поперечном сечении зеркально-симметрична (рис. 1). Она обладает следующими параметрами: ширина проводников (П1–П4) $w_1 = w_2 = w_3 = w_4 = w = 200$ мкм; толщина проводников $t = 35$ мкм; расстояния между проводниками $s_1 = s_2 = s = 200$ мкм; диэлектрическая проницаемость внутреннего слоя $\epsilon_r = 10.2$; диэлектрическая проницаемость внешнего слоя $\epsilon_{r1} = 4.3$; толщина слоя диэлектрика $h = 254$ мкм; расстояние между сигнальными и опорным проводниками $h_2 = 530$ мкм; длина структуры $l = 1$ м. Выбор длины в 1 м обусловлен необходимостью модального разложения воздействующего импульса за счет соответствия условию

$$t_{\Sigma} < l \min |\tau_{i+1} - \tau_i|, \quad i = 1, \dots, N - 1,$$

где t_{Σ} – общая длительность импульса; l – длина отрезка; i – номер моды; τ_i – погонная задержка i -й моды; N – количество проводников в структуре. При несоблюдении этого условия происходит наложение импульсов, что увеличивает $U_{\max}$.

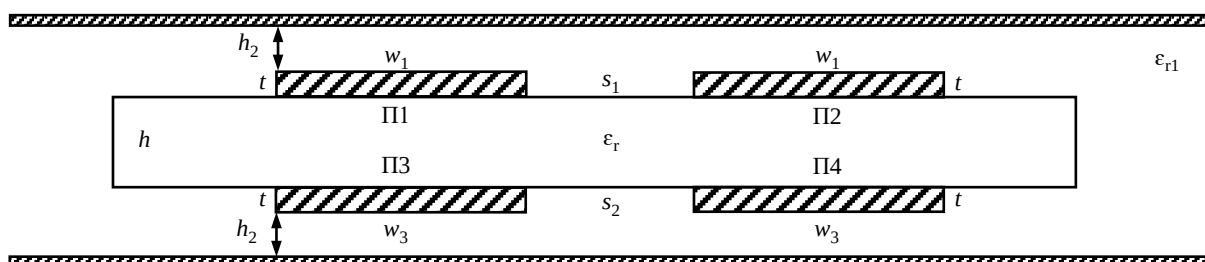


Рис. 1. Поперечное сечение выбранной структуры с трехкратным МР

Fig. 1. Cross section of the selected structure with triple modal reservation

На рис. 2 представлены эквивалентные схемы выбранной структуры с трехкратным МР до (рис. 2, а) и после (рис. 2, б) первого отказа. Параметры источника воздействия: форма импульса – трапецевидная; время нарастания, спада и плоской вершины – 10 пс; общая длительность импульса – 30 пс; амплитуда электродвижущей силы (ЭДС) – 2 В. Значения нагрузок R_1 – R_8 до отказов взяты равными 50 Ом. При отказе активной линии и переключении на П2 нагрузки R_1 , R_5 на концах ЛП рассматривались в вариантах 50-XX и 50-КЗ. КЗ задавалось значением нагрузки 10^{-6} Ом, а XX – 10^6 Ом.

Вычислены временные отклики структуры с трехкратным МР. Форма напряжения на ближнем конце (рис. 3) показывает псевдосогласование с трактом 50 Ом, что следует из равенства амплитуды напряжения половине ЭДС воздействия. Форма напряжения на дальнем конце (рис. 4) показывает 4 импульса разложения. Минимальная разность задержек ($\Delta\tau_{\min}$) равна 434.11 пс, тогда как максимальная разность за-

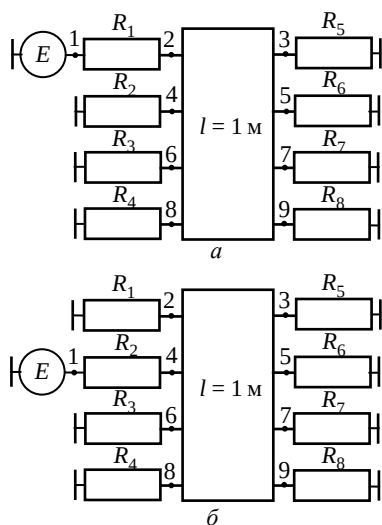


Рис. 2. Эквивалентные схемы выбранной структуры с трехкратным МР до (а) и после (б) первого отказа

Fig. 2. Equivalent circuits of the selected structure before (a) and after (b) first failure

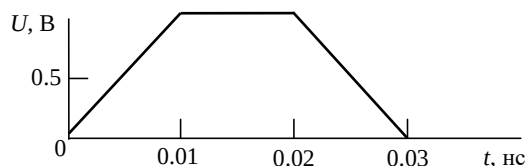


Рис. 3. Форма напряжения на ближнем конце структуры с трехкратным МР

Fig. 3. Voltage waveforms at the near end of a triple MR structure

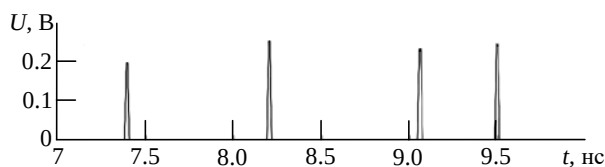


Рис. 4. Форма напряжения на дальнем конце структуры с трехкратным МР

Fig. 4. Voltage waveforms at the far end of a triple MR structure

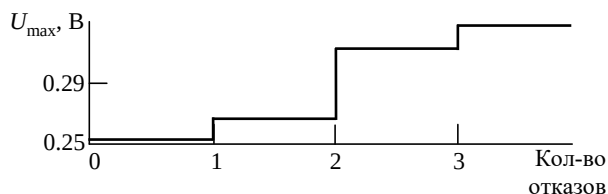


Рис. 5. Зависимости $U_{\max}$ от номера отказа структуры с трехкратным МР

Fig. 5. Dependencies of $U_{\max}$ on the failure number of a structure with a triple MR

держек ($\Delta\tau_{\max}$), которая определяется разницей задержек между первым и последним импульсами (и являющейся общим временем разложения импульса воздействия), равна 2107.97 пс, при этом $U_{\max} = 0.252$ В. На рис. 5 представлены зависимости $U_{\max}$ от номера отказа для выбранной структуры с трехкратным МР. Для нее $U_{\max}$ достигают 0.252, 0.265, 0.309 и 0.325 В до и после отказов 1, 2 и 3 соответственно.

Результаты. Здесь исследуется неодинаковость каналов передачи структуры с трехкратным МР, показанной ранее (рис. 1), введением асимметрии в поперечном сечении. Поиск оптимальных параметров проводился с помощью многовариантного анализа в диапазонах параметров, выбранных из практических соображений (минимум в 100 мкм выбран из-за ограничения производственных норм для ПП, а максимум в 1000 мкм – для ограничения числа вариантов перебора) по двум критериям: минимизация $U_{\max}$ и выравнивание амплитуд импульсов. Первый можно описать как

$$\max(U(t)) \rightarrow \min,$$

где $\max(U(t))$ – максимальная амплитуда выходного напряжения, а второй –

$$\sum [(U_i - U_j)^2] \rightarrow \min;$$

$$i, j \in \{1, 2, 3, 4\}; i \neq j,$$

где i и j – индексы; U_i и U_j – максимальные амплитуды i -го и j -го импульсов.

Изменение h_2 минимально изменяет $U_{\max}$ на дальнем конце, однако значительно влияет на амплитуду на ближнем конце ($U_{6,к}$). Поэтому для каждого набора параметров, представленных на графиках зависимостей далее, значение h_2 выбиралось для лучшего согласования с трактом 50 Ом в диапазоне от 100 до 5000 мкм за счет достижения близкого к половине ЭДС воздействия $U_{6,к}$. Были рассмотрены следующие варианты компоновок:

- 1) $w_1 = w_2 = w_3 = w_4$, $s_1 = s_2$, а w изменялись от 100 до 1000 мкм;
- 2) $w_1 = w_2 = w_3 = w_4$, $s_1 \neq s_2$, а w изменялись от 100 до 1000 мкм;
- 3) $w_1 = w_2 \neq w_3 = w_4$, $s_1 = s_2$, рассматривались два варианта: $w_3 = w_4 = 200$ мкм в первом и $w_3 = w_4 = 1000$ мкм во втором вариантах, а $w_1 = w_2$ изменялись от 100 до 1000 мкм;
- 4) $w_1 = w_2 \neq w_3 = w_4$, $s_1 = s_2$, рассматривались два варианта: $w_1 = w_2 = 200$ мкм в первом и $w_1 = w_2 = 1000$ мкм во втором вариантах, а $w_3 = w_4$ изменялись от 100 до 1000 мкм;
- 5) $w_1 = w_2 \neq w_3 = w_4$, $s_1 \neq s_2$, рассматривались два варианта: $w_3 = w_4 = 200$ мкм в первом и $w_3 = w_4 = 1000$ мкм во втором вариантах, а $w_1 = w_2$ изменялись от 100 до 1000 мкм;
- 6) $w_1 = w_2 \neq w_3 = w_4$, $s_1 \neq s_2$, рассматривались два варианта: $w_1 = w_2 = 200$ мкм в первом и $w_1 = w_2 = 1000$ мкм во втором вариантах, а $w_3 = w_4$ изменялись от 100 до 1000 мкм;
- 7) $w_2 = w_4 \neq w_1 = w_3$, $s_1 = s_2$, рассматрива-

лись два варианта: $w_2 = w_4 = 200$ мкм в первом и $w_2 = w_4 = 1000$ мкм во втором вариантах, а $w_1 = w_3$ изменялись от 100 до 1000 мкм;

8) $w_2 = w_4 \neq w_1 = w_3$, $s_1 = s_2$, рассматривались два варианта: $w_1 = w_3 = 200$ мкм в первом и $w_1 = w_3 = 1000$ мкм во втором вариантах, а $w_2 = w_4$ изменялись от 100 до 1000 мкм.

На рис. 6 приведены зависимости $\Delta\tau_{\min}$ и U_i от одновременно изменяемых w_1, w_2, w_3 и w_4 при $s_1 = s_2 = 200$ мкм, а на рис. 7 – при $s_1 = s_2 = 1000$ мкм.

Максимальные $\Delta\tau_{\min}$ равны 564 пс/м (рис. 6, а) и 107 пс/м (рис. 7, а). Первый график зависимости амплитуд (рис. 6, б) показывает примерное выравнивание U_2 , U_3 и U_4 при $w_1 = w_2 = w_3 = w_4 = 100$ мкм и $U_{\max} = 0.25$ В. На втором графике амплитуд (рис. 7, б) показано выравнивание U_3 и U_4 при изменении w в диапазоне 400...600 мкм, однако при $w = 400$ мкм максимально сближаются U_1 и U_2 при $U_{\max} = 0.23$ В. Таким образом, определены наборы 1 и 2.

На рис. 8 приведены зависимости $\Delta\tau_{\min}$ и U_i от одновременно изменяемых w_1, w_2, w_3 и w_4 при $s_1 = 200$ мкм, $s_2 = 1000$ мкм, а на рис. 9 – при $s_1 = 1000$ мкм, $s_2 = 200$ мкм.

Максимальные $\Delta\tau_{\min}$ равны 227 пс/м (рис. 8, а) и 175 пс/м (рис. 9, а). На первом графике зависимостей амплитуд (рис. 8, б) есть 4 набора параметров, при которых достигается выравнивание, как минимум, двух импульсов, а именно: $w_1 = w_2 = w_3 = w_4 = w = 200$ мкм (набор 1, где $U_1 = U_3$) с $U_{\max} = 0.37$ В, $w = 300$ мкм (набор 2,

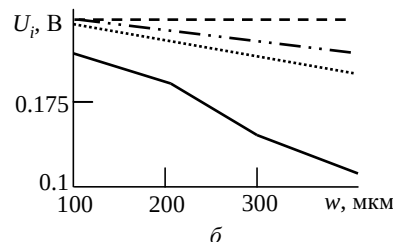
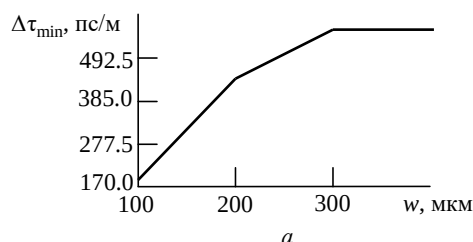


Рис. 6. Зависимости $\Delta\tau_{\min}$ (а) и $U_1(-)$, $U_2(---)$, $U_3(\cdots)$ и $U_4(-\cdots)$ (б) от одновременно изменяемых w_1, w_2, w_3 и w_4 при $s_1 = s_2 = 200$ мкм

Fig. 6. Dependencies of $\Delta\tau_{\min}$ (a) and $U_1(-)$, $U_2(---)$, $U_3(\cdots)$, $U_4(-\cdots)$ (б) on simultaneously changing w_1, w_2, w_3 and w_4 with $s_1 = s_2 = 200$ μm

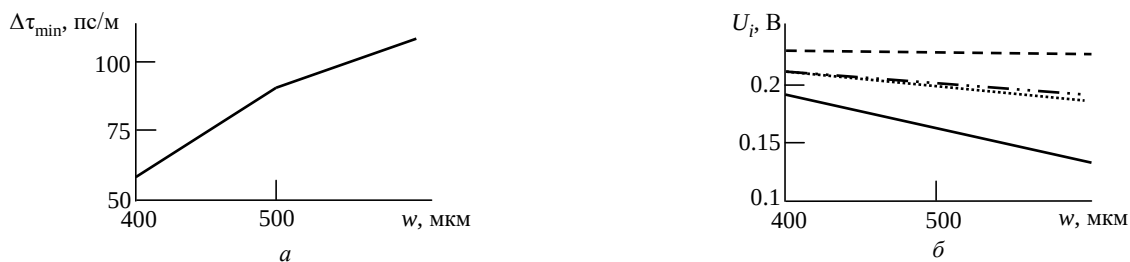


Рис. 7. Зависимости $\Delta\tau_{\min}$ (а) и $U_1(-)$, $U_2(---)$, $U_3(\cdots)$ и $U_4(-\cdots-)$ (б) от одновременно изменяемых w_1 , w_2 , w_3 и w_4 при $s_1 = s_2 = 1000$ мкм

Fig. 7. Dependencies of $\Delta\tau_{\min}$ (a) and $U_1(-)$, $U_2(---)$, $U_3(\cdots)$, $U_4(-\cdots-)$ (б) on simultaneously changing w_1 , w_2 , w_3 and w_4 with $s_1 = s_2 = 1000$ μm

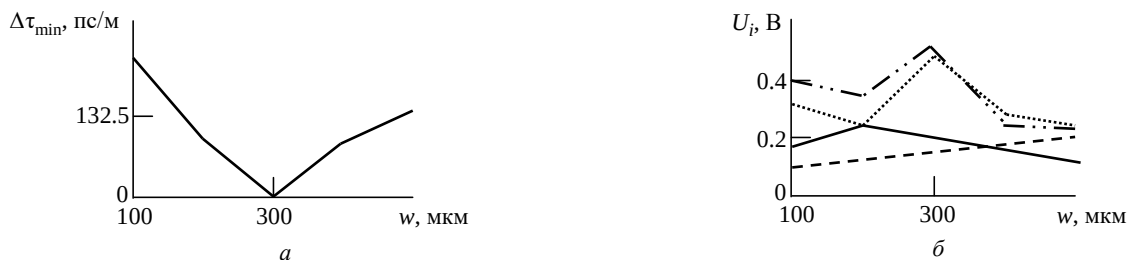


Рис. 8. Зависимости $\Delta\tau_{\min}$ (а) и $U_1(-)$, $U_2(---)$, $U_3(\cdots)$ и $U_4(-\cdots-)$ (б) от одновременно изменяемых w_1 , w_2 , w_3 и w_4 при $s_1 = 200$ мкм и $s_2 = 1000$ мкм

Fig. 8. Dependencies of $\Delta\tau_{\min}$ (a) and $U_1(-)$, $U_2(---)$, $U_3(\cdots)$, $U_4(-\cdots-)$ (б) on simultaneously changing w_1 , w_2 , w_3 and w_4 with $s_1 = 200$ μm and $s_2 = 1000$ μm

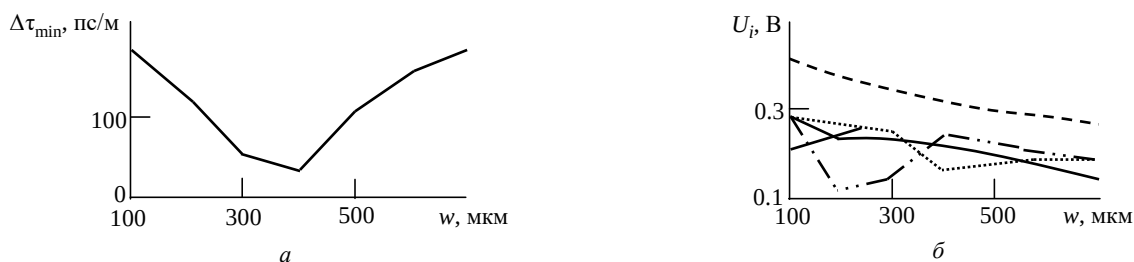


Рис. 9. Зависимости $\Delta\tau_{\min}$ (а) и $U_1(-)$, $U_2(---)$, $U_3(\cdots)$ и $U_4(-\cdots-)$ (б) от одновременно изменяемых w_1 , w_2 , w_3 и w_4 при $s_1 = 1000$ мкм и $s_2 = 200$ мкм

Fig. 9. Dependencies of $\Delta\tau_{\min}$ (a) and $U_1(-)$, $U_2(---)$, $U_3(\cdots)$, $U_4(-\cdots-)$ (б) on simultaneously changing w_1 , w_2 , w_3 and w_4 with $s_1 = 1000$ μm and $s_2 = 200$ μm

где $U_3 = U_4$) с $U_{\max} = 0.56$ В, $w = 400$ мкм (набор 3, где $U_1 = U_2$) с $U_{\max} = 0.28$ В и $w = 500$ мкм (набор 4, где $U_2 \approx U_3 \approx U_4$) с $U_{\max} = 0.244$ В. На втором графике зависимости амплитуд (рис. 9, б) видны 2 набора параметров, при $w = 100$ мкм и $w \approx 340$ мкм, однако при моделировании второго набора происходит наложение импульсов, а разность задержек $\Delta\tau_{\min} < 30$ пс. Из-за этого использовать данный набор некорректно, так как выравненная амплитуда соответствует амплитуде одного наложенного импульса. Поэтому по данным графикам выделены наборы 3–7.

На рис. 10–13 представлены зависимости $\Delta\tau_{\min}$ и U_i от одновременно изменяемых w_1 и w_2 при фиксированных значениях $w_3 = w_4$ и $s_1 = s_2$.

Максимальные $\Delta\tau_{\min}$ равны 575 пс/м (рис. 10, а), 504 пс/м (рис. 11, а), 94 пс/м (рис. 12, а) и 98 пс/м (рис. 13, а). На первом графике зависимостей амплитуд (рис. 10, б) представлен 1 набор параметров при $w_1 = w_2 = w_3 = w_4 = 200$ мкм, $s_1 = s_2 = 200$ мкм с $U_{\max} = 0.252$ В. На втором графике зависимостей амплитуд (рис. 11, б) представлено 2 набора параметров при $w_1 = w_2 = 200$ мкм с $U_{\max} = 0.325$ В и $w_1 = w_2 = 400$ мкм с $U_{\max} = 0.24$ В.

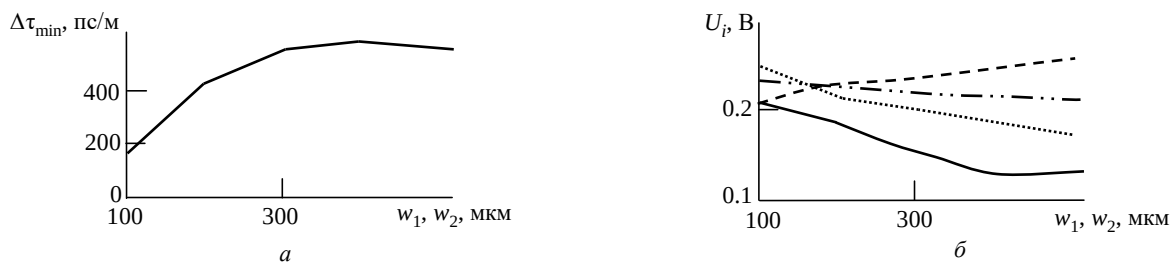


Рис. 10. Зависимости $\Delta\tau_{\min}$ (a) и $U_1(-)$, $U_2(---)$, $U_3(\cdots)$ и $U_4(-\cdots)$ (б) от одновременно изменяемых w_1 и w_2 при $s_1 = s_2 = 200$ мкм и $w_3 = w_4 = 200$ мкм

Fig. 10. Dependencies of $\Delta\tau_{\min}$ (a) and $U_1(-)$, $U_2(---)$, $U_3(\cdots)$, $U_4(-\cdots)$ (б) on simultaneously changing w_1 and w_2 with $s_1 = s_2 = 200$ μm and $w_3 = w_4 = 200$ μm

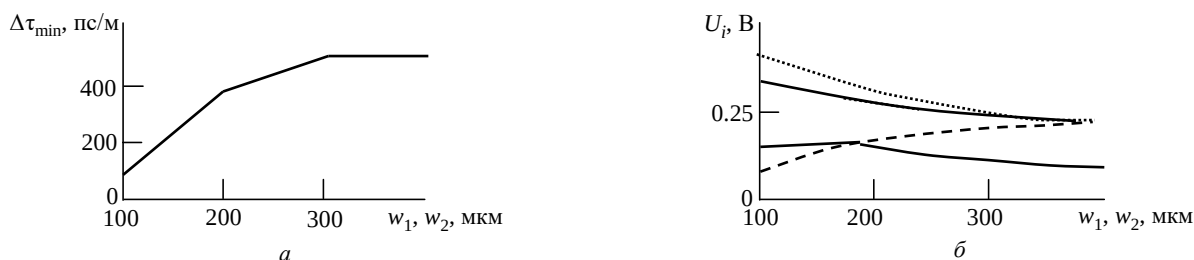


Рис. 11. Зависимости $\Delta\tau_{\min}$ (a) и $U_1(-)$, $U_2(---)$, $U_3(\cdots)$ и $U_4(-\cdots)$ (б) от одновременно изменяемых w_1 и w_2 при $s_1 = s_2 = 200$ мкм и $w_3 = w_4 = 1000$ мкм

Fig. 11. Dependencies of $\Delta\tau_{\min}$ (a) and $U_1(-)$, $U_2(---)$, $U_3(\cdots)$, $U_4(-\cdots)$ (б) on simultaneously changing w_1 and w_2 with $s_1 = s_2 = 200$ μm and $w_3 = w_4 = 1000$ μm

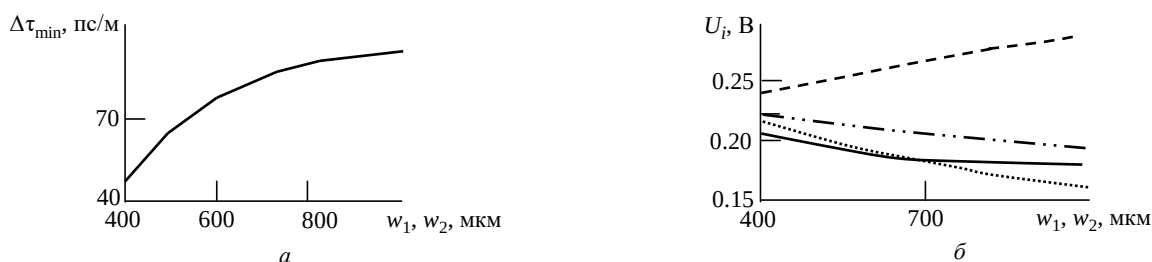


Рис. 12. Зависимости $\Delta\tau_{\min}$ (a) и $U_1(-)$, $U_2(---)$, $U_3(\cdots)$ и $U_4(-\cdots)$ (б) от одновременно изменяемых w_1 и w_2 при $s_1 = s_2 = 1000$ мкм и $w_3 = w_4 = 200$ мкм

Fig. 12. Dependencies of $\Delta\tau_{\min}$ (a) and $U_1(-)$, $U_2(---)$, $U_3(\cdots)$, $U_4(-\cdots)$ (б) on simultaneously changing w_1 and w_2 with $s_1 = s_2 = 1000$ μm and $w_3 = w_4 = 200$ μm

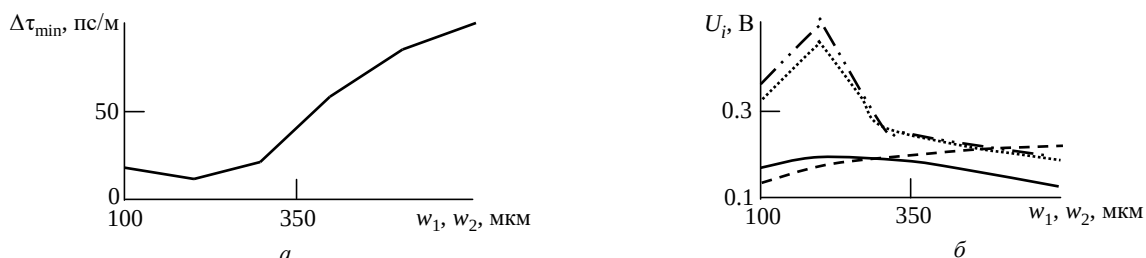


Рис. 13. Зависимости $\Delta\tau_{\min}$ (a) и $U_1(-)$, $U_2(---)$, $U_3(\cdots)$ и $U_4(-\cdots)$ (б) от одновременно изменяемых w_1 и w_2 при $s_1 = s_2 = 1000$ мкм и $w_3 = w_4 = 1000$ мкм

Fig. 13. Dependencies of $\Delta\tau_{\min}$ (a) and $U_1(-)$, $U_2(---)$, $U_3(\cdots)$, $U_4(-\cdots)$ (б) on simultaneously changing w_1 and w_2 with $s_1 = s_2 = 1000$ μm and $w_3 = w_4 = 1000$ μm

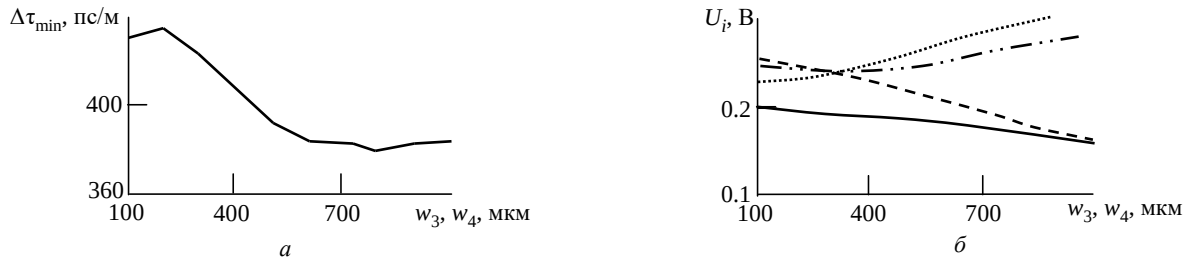


Рис. 14. Зависимости $\Delta\tau_{\min}$ (а) и $U_1(-)$, $U_2(---)$, $U_3(\cdots)$ и $U_4(-\cdots)$ (б) от одновременно изменяемых w_3 и w_4 при $w_1 = w_2 = 200$ мкм и $s_1 = s_2 = 200$ мкм

Fig. 14. Dependencies of $\Delta\tau_{\min}$ (a) and $U_1(-)$, $U_2(---)$, $U_3(\cdots)$, $U_4(-\cdots)$ (б) on simultaneously changing w_3 and w_4 with $w_1 = w_2 = 200$ μm and $s_1 = s_2 = 200$ μm

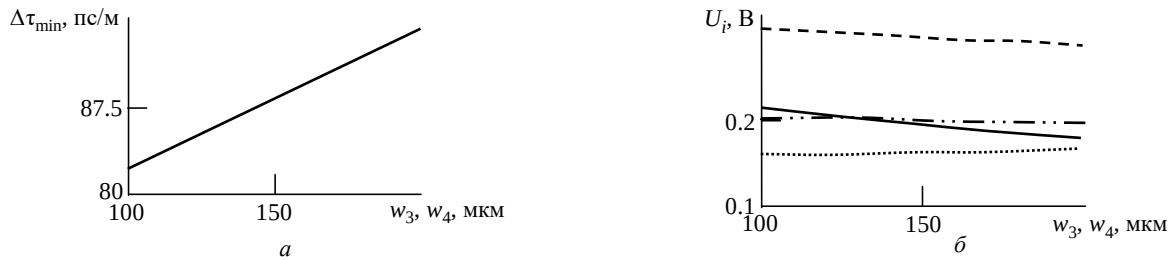


Рис. 15. Зависимости $\Delta\tau_{\min}$ (а) и $U_1(-)$, $U_2(---)$, $U_3(\cdots)$ и $U_4(-\cdots)$ (б) от одновременно изменяемых w_3 и w_4 при $w_1 = w_2 = 1000$ мкм и $s_1 = s_2 = 1000$ мкм

Fig. 15. Dependencies of $\Delta\tau_{\min}$ (a) and $U_1(-)$, $U_2(---)$, $U_3(\cdots)$, $U_4(-\cdots)$ (б) on simultaneously changing w_3 and w_4 with $w_1 = w_2 = 1000$ μm and $s_1 = s_2 = 1000$ μm

На третьем графике зависимостей амплитуд (рис. 12, б) не представлено наборов параметров. На четвертом графике зависимостей амплитуд (рис. 13, б) представлен 1 набор параметров при $w_1 = w_2 = 500$ мкм с $U_{\max} = 0.214$ В. Таким образом, обнаружены наборы 8–11.

На рис. 14 и 15 представлены зависимости $\Delta\tau_{\min}$ и U_i от одновременно изменяемых w_3 и w_4 при фиксированных значениях w_1 , w_2 и s_1 , s_2 .

Максимальные $\Delta\tau_{\min}$ равны 434 пс/м (рис. 14, а) и 94 пс/м (рис. 15, а). На первом графике зависимостей амплитуд (рис. 14, б) представлен 1 набор параметров при $w_3 = w_4 = 400$ мкм

с $U_{\max} = 0.25$ В. На втором графике зависимостей амплитуд (рис. 15, б) представлен 1 набор параметров при $w_3 = w_4 = 140$ мкм с $U_{\max} = 0.3$ В. Таким образом, определены наборы 12 и 13.

На рис. 16–19 представлены зависимости $\Delta\tau_{\min}$ и U_i от одновременно изменяемых w_1 и w_2 при фиксированных значениях w_3 , w_4 и s_1 , s_2 , а также при $s_1 \neq s_2$.

Максимальные $\Delta\tau_{\min}$ равны 236 пс/м (рис. 16, а), 163 пс/м (рис. 17, а), 245 пс/м (рис. 18, а) и 168 пс/м (рис. 19, а). На первом графике зависимостей амплитуд (рис. 16, б) представлены 2 набора параметров: при

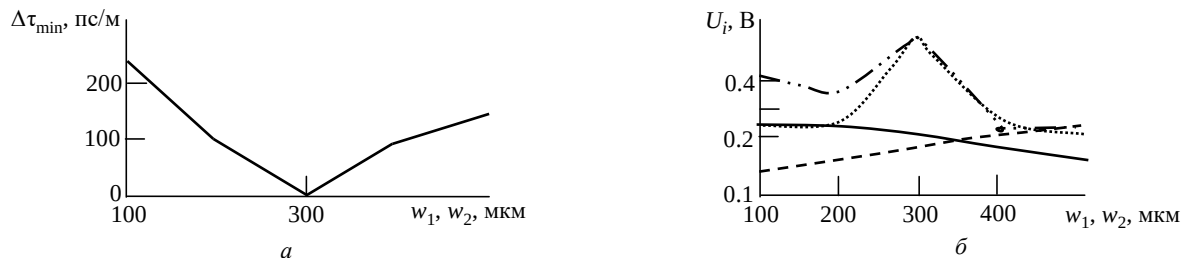


Рис. 16. Зависимости $\Delta\tau_{\min}$ (а) и $U_1(-)$, $U_2(---)$, $U_3(\cdots)$ и $U_4(-\cdots)$ (б) от одновременно изменяемых w_1 и w_2 при $w_3 = w_4 = 200$ мкм и $s_1 = 200$ мкм и $s_2 = 1000$ мкм

Fig. 16. Dependencies of $\Delta\tau_{\min}$ (a) and $U_1(-)$, $U_2(---)$, $U_3(\cdots)$, $U_4(-\cdots)$ (б) on simultaneously changing w_1 and w_2 with $w_3 = w_4 = 1000$ μm and $s_1 = 200$ μm and $s_2 = 1000$ μm

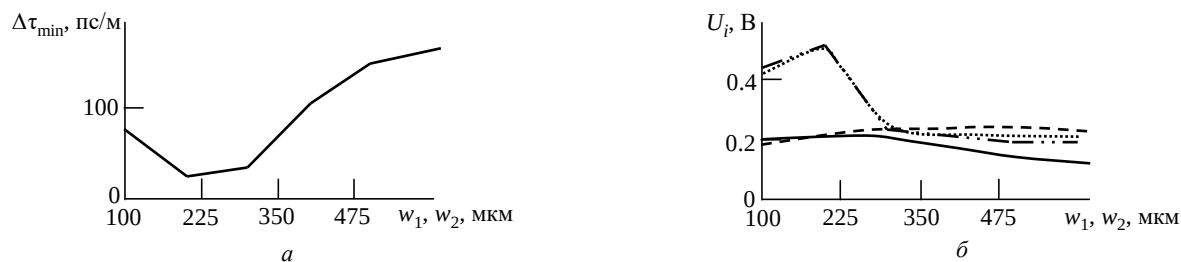


Рис. 17. Зависимости $\Delta\tau_{\min}$ (а) и $U_1(-)$, $U_2(-)$, $U_3(-)$ и $U_4(-)$ (б) от одновременно изменяемых w_1 и w_2 при $w_3 = w_4 = 1000$ мкм и $s_1 = 1000$ мкм и $s_2 = 200$ мкм

Fig. 17. Dependencies of $\Delta\tau_{\min}$ (a) and $U_1(-)$, $U_2(-)$, $U_3(-)$, $U_4(-)$ (б) on simultaneously changing w_1 and w_2 with $w_3 = w_4 = 1000$ μm and $s_1 = 1000$ μm and $s_2 = 200$ μm

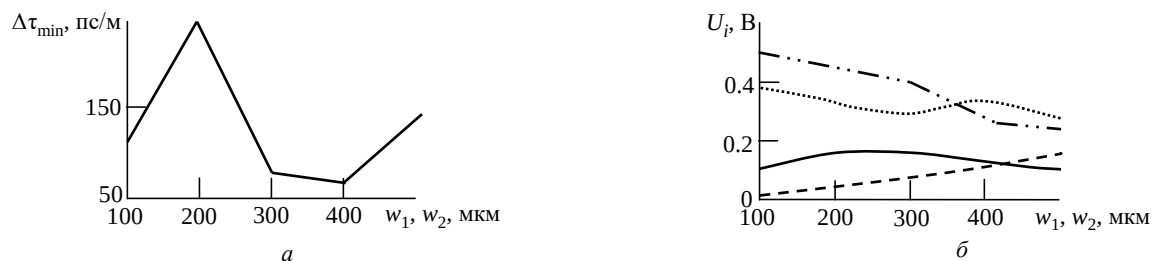


Рис. 18. Зависимости $\Delta\tau_{\min}$ (а) и $U_1(-)$, $U_2(-)$, $U_3(-)$ и $U_4(-)$ (б) от одновременно изменяемых w_1 и w_2 при $w_3 = w_4 = 1000$ мкм и $s_1 = 200$ мкм и $s_2 = 1000$ мкм

Fig. 18. Dependencies of $\Delta\tau_{\min}$ (a) and $U_1(-)$, $U_2(-)$, $U_3(-)$, $U_4(-)$ (б) on simultaneously changing w_1 and w_2 with $w_3 = w_4 = 1000$ μm and $s_1 = 200$ μm and $s_2 = 1000$ μm

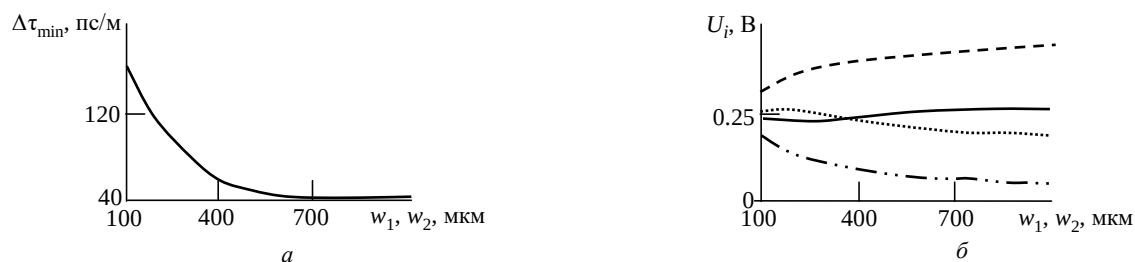


Рис. 19. Зависимости $\Delta\tau_{\min}$ (а) и $U_1(-)$, $U_2(-)$, $U_3(-)$ и $U_4(-)$ (б) от одновременно изменяемых w_1 и w_2 при $w_3 = w_4 = 200$ мкм и $s_1 = 1000$ мкм и $s_2 = 200$ мкм

Fig. 19. Dependencies of $\Delta\tau_{\min}$ (a) and $U_1(-)$, $U_2(-)$, $U_3(-)$, $U_4(-)$ (б) on simultaneously changing w_1 and w_2 with $w_3 = w_4 = 200$ μm and $s_1 = 1000$ μm and $s_2 = 200$ μm

$w_1 = w_2 = 200$ мкм (аналогичный набору 3 и поэтому не представленный отдельно) и $w_1 = w_2 = 500$ мкм с $U_{\max} = 0.23$ В. На втором графике зависимостей амплитуд (рис. 17, б) представлен 1 набор параметров при $w_1 = w_2 = 300$ мкм с $U_{\max} = 0.235$ В. На третьем графике зависимостей амплитуд (рис. 18, б) представлен 1 набор параметров при $w_1 = w_2 = 400$ мкм с $U_{\max} = 0.35$ В. На четвертом графике зависимостей амплитуд (рис. 19, б) представлен 1 набор параметров при $w_1 = w_2 = 340$ мкм, однако при моделировании амплитуды равны при $w_1 = w_2 = 390$ мкм с $U_{\max} = 0.4$ В. Таким образом, определены наборы 14–16.

На рис. 20–22 представлены зависимости $\Delta\tau_{\min}$ и U_i от одновременно изменяемых w_3 , w_4 при фиксированных значениях w_1 , w_2 и s_1 , s_2 . При этом $s_1 \neq s_2$.

Максимальные $\Delta\tau_{\min}$ равны 250 пс/м (рис. 20, а), 132.5 пс/м (рис. 21, а) и 101 пс/м (рис. 22, а). На первом графике зависимостей амплитуд (рис. 20, б) представлен 1 набор параметров при $w_3 = w_4 = 200$ мкм (аналогичный набору 3). На втором графике зависимостей амплитуд (рис. 21, б) представлен 1 набор параметров при $w_3 = w_4 = 300$ мкм с $U_{\max} = 0.42$ В. На третьем графике зависимостей амплитуд (рис. 22, б) представлен 1 набор параметров при $w_3 = w_4 =$

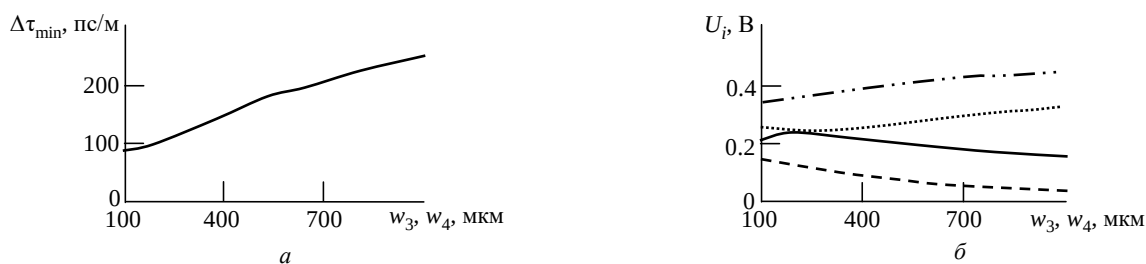


Рис. 20. Зависимости $\Delta\tau_{\min}$ (a) и $U_1(-)$, $U_2(---)$, $U_3(\cdots)$ и $U_4(-\cdots)$ (б) от одновременно изменяемых w_3 и w_4 при $w_1 = w_2 = 200 \mu\text{м}$ и $s_1 = 200 \mu\text{м}$ и $s_2 = 1000 \mu\text{м}$

Fig. 20. Dependencies of $\Delta\tau_{\min}$ (a) and $U_1(-)$, $U_2(---)$, $U_3(\cdots)$, $U_4(-\cdots)$ (б) on simultaneously changing w_3 and w_4 with $w_1 = w_2 = 200 \mu\text{м}$ and $s_1 = 200 \mu\text{м}$ and $s_2 = 1000 \mu\text{м}$

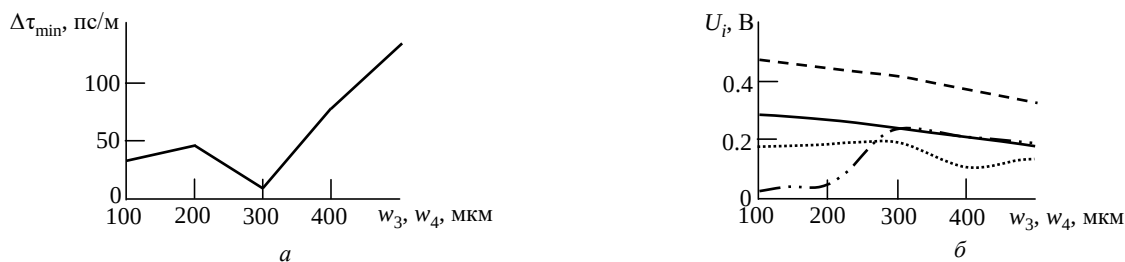


Рис. 21. Зависимости $\Delta\tau_{\min}$ (a) и $U_1(-)$, $U_2(---)$, $U_3(\cdots)$ и $U_4(-\cdots)$ (б) от одновременно изменяемых w_3 и w_4 при $w_1 = w_2 = 1000 \mu\text{м}$ и $s_1 = 1000 \mu\text{м}$ и $s_2 = 200 \mu\text{м}$

Fig. 21. Dependencies of $\Delta\tau_{\min}$ (a) and $U_1(-)$, $U_2(---)$, $U_3(\cdots)$, $U_4(-\cdots)$ (б) on simultaneously changing w_3 and w_4 with $w_1 = w_2 = 1000 \mu\text{м}$ and $s_1 = 1000 \mu\text{м}$ and $s_2 = 200 \mu\text{м}$

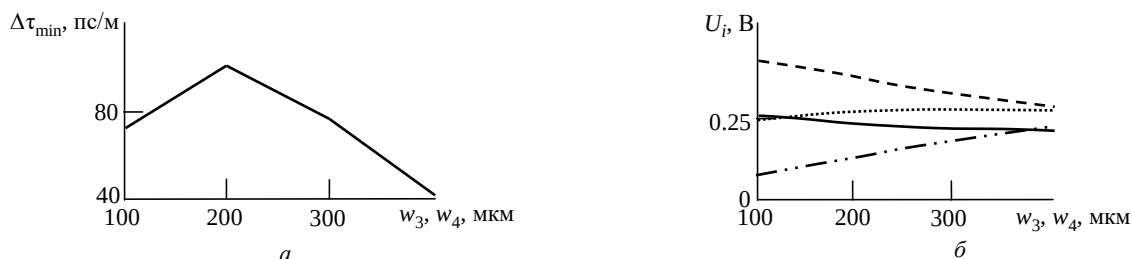


Рис. 22. Зависимости $\Delta\tau_{\min}$ (a) и $U_1(-)$, $U_2(---)$, $U_3(\cdots)$ и $U_4(-\cdots)$ (б) от одновременно изменяемых w_3 и w_4 при $w_1 = w_2 = 200 \mu\text{м}$ и $s_1 = 1000 \mu\text{м}$ и $s_2 = 200 \mu\text{м}$

Fig. 22. Dependencies of $\Delta\tau_{\min}$ (a) and $U_1(-)$, $U_2(---)$, $U_3(\cdots)$, $U_4(-\cdots)$ (б) on simultaneously changing w_3 and w_4 with $w_1 = w_2 = 200 \mu\text{м}$ and $s_1 = 1000 \mu\text{м}$ and $s_2 = 200 \mu\text{м}$

= 400 мкм с $U_{\max} = 0.28 \text{ В}$. Таким образом, определены наборы 17 и 18.

В табл. 1 приведены наборы параметров, полученные ранее, а также их значения $U_{\max}$, $U_{\text{б.к}}$ и $\Delta\tau_{\min}$. На рис. 23 представлены формы

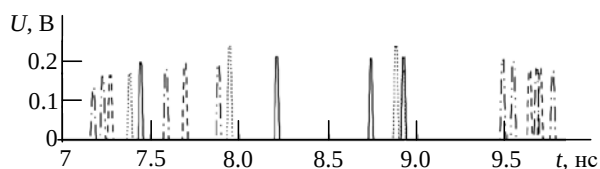


Рис. 23. Формы напряжения на дальнем конце структуры с наборами параметров 1 (-), 2 (---), 11 (-·-), 15 (···) и 18 (····) из табл. 1

Fig. 23. Voltage waveforms at the far end of the structure with parameter sets 1 (-), 2 (---), 11 (-·-), 15 (···), 18 (····) from Tab. 1

напряжения на дальнем конце структуры при наилучших определенных наборах параметров (1, 2, 11, 15, 18). На рис. 24 представлены поперечные сечения исследуемых компоновок структуры с трехкратным МР. В табл. 2 представлены значения $U_{\max}$ каждого из наборов параметров до и после отказов. На рис. 25 приведены зависимости $U_{\max}$ от номера отказа для каждого набора параметров. На рис. 26 представлены зависимости $U_{\max}$ от номера отказа для наборов с наименьшими амплитудами: рис. 26, а – наилучшие наборы от каждого графика на рис. 25, а рис. 26, б – среди всех наборов. Значения $U_{\max}$ для номера отказа от 0 до 1 соответствуют значениям до отказов (табл. 1).

Табл. 1. Наборы параметров

Tab. 1. Sets of parameters

Компоновка	Набор	w_1 , мкм	w_2 , мкм	w_3 , мкм	w_4 , мкм	s_1 , мкм	s_2 , мкм	h_2 , мкм	$\Delta\tau_{\min}$, пс/м	$U_{\max}$, В	$U_{\text{б.к.}}$, В
$w_1 = w_2 = w_3 = w_4, s_1 = s_2$	1	100	100	100	100	200	200	180	182.74	0.252	1.0027
	2	400	400	400	400	1000	1000	1250	57.277	0.229	0.9994
$w_1 = w_2 = w_3 = w_4, s_1 \neq s_2$	3	200	200	200	200	200	1000	350	99.921	0.369	1.0004
	4	300	300	300	300	200	1000	730	1.8424	0.56	1.001
	5	400	400	400	400	200	1000	1830	90.671	0.28	1.0001
	6	500	500	500	500	200	1000	5000	142.96	0.244	0.9874
	7	100	100	100	100	1000	200	140	173.39	0.429	1.0051
$w_1 = w_2 \neq w_3 = w_4, s_1 = s_2$	8	200	200	200	200	200	200	530	434.11	0.252	1.00053
	9	400	400	1000	1000	200	200	5000	503.9	0.236	0.976
	10	300	300	200	200	1000	1000	650	23.554	0.241	1.00414
	11	500	500	1000	1000	1000	1000	2580	82.363	0.214	1.00003
	12	200	200	400	400	200	200	560	406.53	0.248	1.0007
	13	1000	1000	140	140	1000	1000	4600	92.006	0.298	1.00646
$w_1 = w_2 \neq w_3 = w_4, s_1 \neq s_2$	14	500	500	200	200	200	1000	5000	139.44	0.231	0.992
	15	300	300	1000	1000	1000	200	800	34.071	0.235	1
	16	390	390	200	200	1000	200	620	46.867	0.399	1.00959
$w_2 = w_4 \neq w_1 = w_3, s_1 = s_2$	17	1000	1000	300	300	1000	200	2390	8.153	0.417	0.99998
	18	200	200	400	400	1000	200	310	43.008	0.284	1.00098

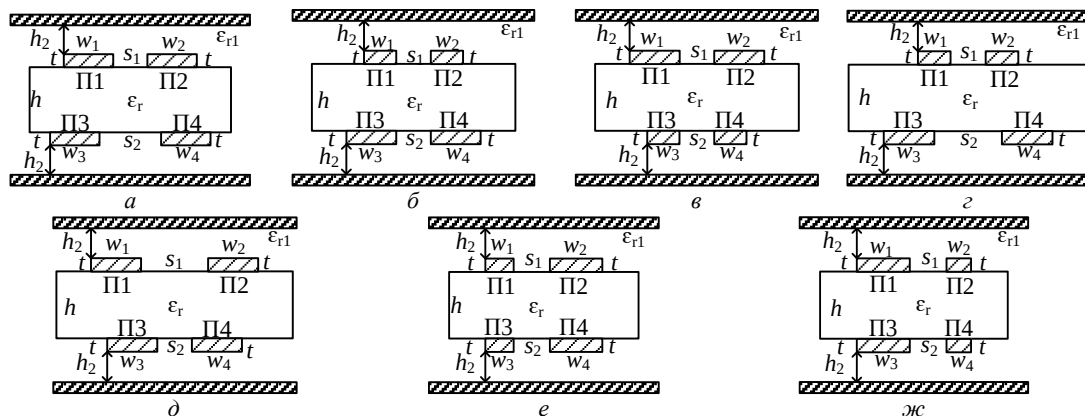


Рис. 24. Поперечные сечения исследуемых вариантов компоновки 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г), 5 (д), 6 (е) и 7 (ж) структуры с трехкратным МР

Fig. 24. Cross sections of the studied layout options 1 (a), 2 (б), 3 (в), 4 (г), 5 (д), 6 (е), 7 (ж) structure with triple MR

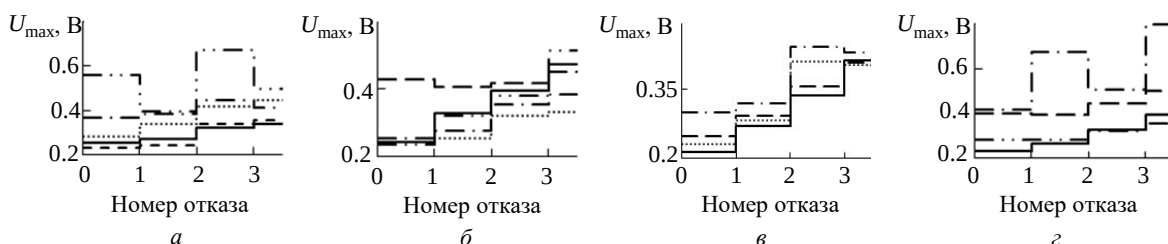


Рис. 25. Зависимости $U_{\max}$ от номера отказа для наборов параметров 1 (—), 2 (---), 3 (---), 4 (---), 5 (---) (а); 6 (—), 7 (---), 8 (---), 9 (---), 10 (---) (б); 11 (—), 12 (---), 13 (---), 14 (---) (в); 15 (—), 16 (---), 17 (---), 18 (---) (г)

Fig. 25. Dependencies of $U_{\max}$ on the failure number for parameter sets 1 (—), 2 (---), 3 (---), 4 (---), 5 (---) (a); 6 (—), 7 (---), 8 (---), 9 (---), 10 (---) (б); 11 (—), 12 (---), 13 (---), 14 (---) (в); 15 (—), 16 (---), 17 (---), 18 (---) (г)

Видно, что из рассмотренных наборов наименьшим значением $U_{\max}$ до отказов обладает набор 11. Однако после отказов из всех рассмотренных наборов не было обнаружено тех, что обладали бы лучшими амплитудными

характеристиками по сравнению с симметричными вариантами. Между тем есть асимметричный набор параметров, обладающий сопоставимыми характеристиками по сравнению с ними. Набор 10 до и после первого отказа об-

Табл. 2. Значения напряжений наборов до ($U_{\max}$), после первого ($U_{\max1}$), второго ($U_{\max2}$) и третьего ($U_{\max3}$) отказов у определенных наборов параметров структур с трехкратным МР

Tab. 2. Values of voltage sets before ($U_{\max}$), after the first ($U_{\max1}$), second ($U_{\max2}$) and third ($U_{\max3}$) failures for certain sets of parameters of structures with triple MR

Набор	$U_{\max}$, В	$U_{\max1}$, В	$U_{\max2}$, В	$U_{\max3}$, В
1	0.252	0.268	0.32	0.341
2	0.229	0.241	0.336	0.353
3	0.369	0.382	0.445	0.414
4	0.56	0.395	0.671	0.494
5	0.28	0.339	0.415	0.443
6	0.244	0.329	0.394	0.473
7	0.429	0.407	0.42	0.451
8	0.252	0.276	0.353	0.385
9	0.236	0.321	0.381	0.516
10	0.241	0.255	0.322	0.334
11	0.214	0.269	0.335	0.412
12	0.248	0.291	0.354	0.406
13	0.298	0.318	0.442	0.428
14	0.231	0.282	0.41	0.402
15	0.235	0.264	0.328	0.397
16	0.399	0.395	0.443	0.501
17	0.417	0.672	0.508	0.796
18	0.284	0.282	0.324	0.358

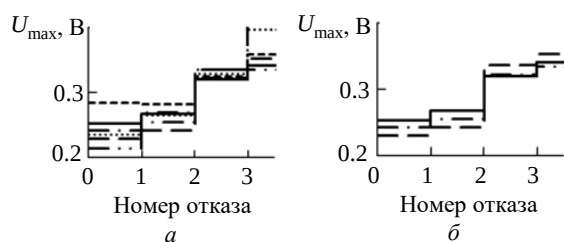


Рис. 26. Зависимости $U_{\max}$ от номера отказа для лучших наборов параметров 1 (—), 2 (---), 10 (---), 11 (---), 15 (---), 18 (---) (а) и 1 (—), 2 (---), 10 (---) (б)

Fig. 26. Dependencies of $U_{\max}$ on the failure number for the best sets of parameters 1 (—), 2 (---), 10 (---), 11 (---), 15 (---), 18 (---) (a) and 1 (—), 2 (---), 10 (---) (b)

ладает значением $U_{\max}$, которое находится между значениями при наборах 1 и 2. После отказа 2 набор 10 обладает сопоставимой амплитудой с набором 1, а после отказа 3 амплитуда данного набора становится меньше, чем

при симметричных вариантах. Между тем данный набор имеет недостаток – минимальная разница погонных задержек $\Delta\tau_{\min} = 24$ пс/м, что меньше общей длительности импульса 30 пс. Из-за этого импульсы накладываются. Стоит также отметить наборы 8, 9 и 12. Они не улучшают амплитудных характеристик, но увеличивают $\Delta\tau_{\min}$ в 2.38, 2.75 и 2.22 раза по сравнению с набором 1.

Вывод. Таким образом, проанализированы асимметричные варианты компоновок ПП с трехкратным МР с целью выявления полезных эффектов во временной области. Определены 18 наборов параметров, при которых выравниваются амплитуды как минимум двух из четырех импульсов. Не обнаружено наборов параметров, дающих большее ослабление помехового импульса после отказов активной линии по сравнению с симметричными наборами (1 и 2). Однако обнаружен набор (10), обладающий сопоставимыми с симметричными наборами (1 и 2) характеристиками, но с $\Delta\tau_{\min} < 30$ пс, что ведет к наложению амплитуд импульсов. Помимо этого обнаружено, что при использовании некоторых вариантов асимметричной компоновки (8, 9 и 12) $\Delta\tau_{\min}$ больше в 2.38, 2.75 и 2.22 раза соответственно, чем при наборе 1 (значение $\Delta\tau_{\min}$ которого больше, чем при симметричном наборе 2). Это означает, что компоновку $w_1 = w_2 \neq w_3 = w_4$, $s_1 = s_2$ возможно использовать для уменьшения вероятности наложения импульсов на реальном устройстве или длины линии, по сравнению с симметричным вариантом, без риска наложения импульсов. Полученные данные можно использовать как рекомендации при трассировке макетов ПП, когда необходимо увеличить разность задержек.

В ходе дальнейших исследований планируется провести экспериментальные измерения макетов ПП, созданных по результатам моделирования.

Список литературы

1. IEC 61508-1:2010 Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-Related Systems – P. 1: General requirements (see Functional Safety and IEC 61508). URL: <https://webstore.iec.ch/publication/5515> (дата обращения 10.04.24).
2. Patel M. R. Spacecraft Power Systems. Boca Raton: CRC Press, 2005. 736 p. doi: 10.1201/9781420038217
3. Денисенко В. В. Аппаратное резервирование в промышленной автоматизации. Ч. 1 // Современные технологии автоматизации. 2008. № 2. С. 90–99. URL: <https://www.cta.ru/cms/f/369991.pdf> (дата обращения 12.04.2024).
4. Monolithic MEMS T-type switch for redundancy switch matrix applications / K. Y. Chan, M. Daneshmand, A. A. Fomani, R. R. Mansour, R. Ramer // 38th European

Microwave Conf., Amsterdam, Netherlands, 27–31 Oct. 2008. IEEE, 2008. P. 1513–1516.

doi: 10.1109/EUMC.2008.4751755

5. Techniques and Measures to Achieve EMI Resilience in Mission- or Safety-Critical Systems / D. Pissort, J. Lannoo, J. Van Waes, A. Degraeve, J. Boydens // IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine. 2017. Vol. 6, iss. 4. P. 107–114.

doi: 10.1109/MEMC.0.8272297.

6. Degraeve A., Pissort D. Study of the effectiveness of spatially EM-diverse redundant systems under plane-wave illumination // Asia-Pacific Intern. Symp. on Electromagnetic Compatibility (APEMC), Shenzhen, China, 17–21 May 2016. IEEE, 2016. P. 211–213.

doi: 10.1109/APEMC.2016.7523012.

7. Шарафутдинов В. Р., Газизов Т. Р. Анализ способов резервирования на основе модальной фильтрации // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 3. С. 117–144.

doi: 10.24411/2410-9916-2019-10307

8. Khazhibekov R., Zabolotsky A. M. Modal filter with interdigital structure of conductors for 100 Mbit/s Ethernet equipment protection // Intern. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON 2019), Tomsk, Russia, 18–20 Apr. 2019. IEEE, 2019. P. 1–4.

doi: 10.1109/SIBCON.2019.8729577

9. Бевзенко И. Г., Заболоцкий А. М. Модальная фильтрация как средство защиты от сверхкоротких импульсов // Электронные средства и системы управления: материалы докл. междунар. науч.-практ. конф. 2007. № 1. С. 258–260.

10. Zhechev Y. S. Signal integrity analysis for the four-layer reflection symmetric modal filter // J. of Radio Electronics. 2022. № 8. P. 1–16.

doi: 10.30898/1684-1719.2022.8.5

11. Зима Е., Газизов Р. Р. Модальное резервирование: современное состояние // Докл. ТУСУР. 2024. Т. 27, № 3. С. 55–69.

doi: 10.21293/1818-0442-2024-27-3-55-69

12. Switching order after failures in symmetric protective electrical circuits with triple modal reservation / A. O. Belousov, A. V. Medvedev, E. B. Chernikova, T. R. Gazizov, A. M. Zabolotsky // Symmetry. 2021. Vol. 13, iss. 6. Art. № 1074. P. 1–22.

doi: 10.3390/sym13061074

13. Медведев А. В. Моделирование, оценка и выбор оптимального порядка переключения цепей с трехкратным модальным резервированием после отказов вдоль проводников // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 2. С. 175–203.

doi: 10.24412/2410-9916-2023-2-175-203

14. Kuksenko S. P. Preliminary results of TUSUR University project for design of spacecraft power distribution network: EMC simulation // IOP Conf. Ser.: Materials Sci. and Eng. 2019. Vol. 560. Art. № 012110. P. 1–7.

doi: 10.1088/1757-899X/560/1/012110

15. Разработка программного обеспечения для моделирования радиоэлектронных средств с учетом электромагнитной совместимости в ТУСУР / С. П. Куksenko, Т. Р. Газизов, А. А. Квасников, А. В. Демаков, А. А. Иванов, Д. В. Ключин, А. Алхадж Хасан, А. Е. Максимов, А. В. Осинцев // Наноиндустрия. 2023. Т. 16, № S9–1 (119). С. 170–178.

doi: 10.22184/1993-8578.2023.16.9s.170.178

Информация об авторах

Морозов Сергей Романович – магистр по направлению "Инфокоммуникационные технологии и системы связи" (2024, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники), аспирант кафедры телевидения и управления, инженер научно-исследовательской лаборатории фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости кафедры телевидения и управления Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Автор 11 научных работ. Сфера научных интересов – электромагнитная совместимость; устройства защиты; модальная фильтрация; модальное резервирование.

Адрес: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, пр. Ленина, д. 40, Томск, 634050, Россия

E-mail: pred11072@yandex.ru; sergei.r.morozov@tusur.ru

<https://orcid.org/0009-0006-2351-9819>

Газизов Тальгат Рашитович – доктор технических наук (2010); профессор (2023), заведующий кафедрой телевидения и управления Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Автор 550 научных работ. Сфера научных интересов – электромагнитная совместимость; устройства защиты; модальная фильтрация; модальное резервирование.

Адрес: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, пр. Ленина, д. 40, Томск, 634050, Россия

E-mail: talgat.r.gazizov@tusur.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1192-4853>

References

1. IEC 61508-1:2010 Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-Related Systems – P. 1: General requirements (see Functional

Safety and IEC 61508). Available at: <https://webstore.iec.ch/publication/5515> (accessed 10.04.24).

2. Patel M. R. *Spacecraft Power Systems*. Boca Raton, CRC Press, 2005, 736 p.
doi: 10.1201/9781420038217
3. Denisenko V. V. *Hardware Redundancy in Industrial Automation. Part 1. Modern Automation Technologies*. 2008, no. 2, pp. 90–99. (In Russ.). Available at: <https://www.cta.ru/cms/f/369991.pdf> (accessed 12.04.2024)
4. Chan K. Y., Daneshmand M., Fomani A. A., Mansour R. R., Ramer R. *Monolithic MEMS T-Type Switch for Redundancy Switch Matrix Applications*. 38th European Microwave Conf., Amsterdam, Netherlands, 27–31 Oct. 2008. IEEE, 2008, pp. 1513–1516.
doi: 10.1109/EUMC.2008.4751755
5. Pissort 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 Compability Magazine. 2017, vol. 6, iss. 4, pp. 107–114.
doi: 10.1109/MEMC.0.8272297.
6. Degraeve A., Pissort D. *Study of the Effectiveness of Spatially EM-Diverse Redundant Systems Under Plane-Wave Illumination*. Asia-Pacific Intern. Symp. on Electromagnetic Compatibility (APEMC). Shenzhen, China, 17–21 May 2016. IEEE, 2016, pp. 211–213.
doi: 10.1109/APEMC.2016.7523012
7. Sharafutdinov V. R., Gazizov T. R. *Analysis of Reservation Methods Based on Modal Filtration*. Systems of Control, Communication and Security. 2019, no. 3, pp. 117–144. (In Russ.)
doi: 10.24411/2410-9916-2019-10307
8. Khazhibekov R., Zabolotsky A. M. *Modal Filter with Interdigital Structure of Conductors for 100 Mbit/s Ethernet Equipment Protection*. Intern. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON 2019), Tomsk, Russia, 18–20 Apr. 2019. IEEE, 2019, pp. 1–4.
doi: 10.1109/SIBCON.2019.8729577
9. Bevzenko I. G., Zabolotsky A. M. *Modal Filtering as a Means of Protection Against Ultrashort Pulses*. Electronic Means and Control Systems: Proc. Reports of the Intern. Scientific and Practical Conf. 2007, vol. 1, pp. 258–260.
10. Zhechev Y. S. *Signal Integrity Analysis for the Four-Layer Reflection Symmetric Modal Filter*. J. of Radio Electronics. 2022, no. 8, pp. 1–16.
doi: 10.30898/1684-1719.2022.8.5
11. Zima E., Gazizov R. R. *Modal Reservation: Current State*. Proc. of TUSUR University. 2024, vol. 27, no. 3, pp. 55–69. (In Russ.)
doi: 10.21293/1818-0442-2024-27-3-55-69
12. 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, iss. 6, art. no. 1074, pp. 1–22.
doi: 10.3390/sym13061074
13. Medvedev A. V. *Simulating, Evaluating, and Selecting the Optimum Switching Order for Circuits with Triple Modal Reservation after Failures along the Conductors*. Systems of Control, Communication and Security. 2023, no. 2, pp. 175–203. (In Russ.)
doi: 10.24412/2410-9916-2023-2-175-203
14. Kuksenko S. P. *Preliminary results of TUSUR University project for design of spacecraft power distribution network: EMC simulation*. IOP Conf. Ser.: Materials Sci. and Eng. 2019, vol. 560, art. no. 012110, pp. 1–7.
doi: 10.1088/1757-899X/560/1/012110
15. Kuksenko S. P., Gazizov T. R., Kvasnikov A. A., Demakov A. V., Ivanov A. A., Klyukin D. V., Alhadege Hasan A., Maksimov A. Ye., Osintsev A. V. *Developing Software for Modeling Radioelectronic Equipment with Respect to Electromagnetic Compatibility in TUSUR. Nanoindustry*. 2023, vol. 16, no. S9-1(119), pp. 170–178. (In Russ.)
doi: 10.22184/1993-8578.2023.16.9s.170.178

Information about the authors

Sergey R. Morozov, Master in Infocommunication technologies and communication systems (2024, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics), Postgraduate student of the Department of Television and Control, Engineer of Research Laboratory of Fundamental Research on Electromagnetic Compatibility of Department of Television and Control in Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. The author of 11 scientific publications. Area of expertise: electromagnetic compatibility; protection devices; modal filtering; modal reservation. Address: Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40, Lenina Ave., Tomsk 634050, Russia
E-mail: pred11072@yandex.ru; sergei.r.morozov@tusur.ru
<https://orcid.org/0009-0006-2351-9819>

Talgat R. Gazizov, Dr Sci. (Eng.) (2010), Professor (2023), Head of the Department of Television and Control of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. The author of 550 scientific publications. Area of expertise: electromagnetic compatibility; protection devices; modal filtering; modal reservation. Address: Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40, Lenina Ave., Tomsk 634050, Russia
E-mail: talgat.r.gazizov@tusur.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1192-4853>