

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.5.2>

УДК: 621.391.825

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ УСТРОЙСТВ ЗАЩИТЫ ОТ СВЕРХКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ, РАБОТАЮЩИХ В ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОМ И СИНФАЗНОМ РЕЖИМАХ

В.П. Костелецкий, Е.Б. Черникова, А.М. Лакоза

**Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 40**

Статья поступила в редакцию 11 февраля 2025 г.

Аннотация. В работе представлен подход к разработке устройств защиты от сверхкоротких импульсов (СКИ), работающих в дифференциальном и синфазном режимах. Приведены результаты обоснования структурного исполнения устройств и выбора схемных моделей, учитывающих режимы при моделировании. Выполнена параметрическая оптимизация поперечных сечений 6- и 8-проводных структур. Оптимизация выполнялась по двум критериям: минимизация амплитуды напряжения на выходе для дифференциального и синфазного режимов по-отдельности и минимизация квадрата разности максимального и минимального временных интервалов для увеличения минимального значения разности погонных задержек, и, как следствие, максимизации длительности СКИ, который может полностью раскладываться. Результаты моделирования с оптимальными параметрами показали, что ослабление СКИ в исследуемых структур увеличилось в среднем в 12 раз в обоих режимах, по сравнению с ослаблением, полученным до оптимизации. Из анализа частотных и временных характеристик получено, что 6-проводная

структура оптимальна для использования в качестве защиты цепей питания, а 8-проводная – как для защиты цепей питания, так и сигнальных цепей.

Ключевые слова: устройства защиты, электромагнитная совместимость, дифференциальный режим, синфазный режим, модальное разложение, радиоэлектронная аппаратура.

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-01216, <https://rscf.ru/project/23-79-01216/> в ТУСУРе и при поддержке Минобрнауки России по проекту FEWM-2024-0005.

Автор для переписки: Черникова Евгения Борисовна, chiernikova96@mail.ru

Введение

Повышенная восприимчивость современной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) к кондуктивным помеховым воздействиям актуализирует проблему электромагнитной совместимости (ЭМС) [1]. Наиболее опасными видами помеховых воздействий являются сверхширокополосные импульсы субнаносекундной и наносекундной длительности [2]. Сверхкороткие импульсы (СКИ) перекрывают значительный частотный диапазон, благодаря чему преодолевают средства защиты РЭА, основанные на традиционных конструкторских и схемотехнических решениях. Распространение таких помех по линиям передачи меняет электрические параметры радиоэлектронных компонентов, приводит к электрическому пробоем полупроводников и диэлектриков с последующим выходом оборудования из строя. Кроме того, СКИ могут приводить к функциональным сбоям. Их уровень может достигать значений, сопоставимых с уровнем информационных сигналов, тем самым влияя на логику работы устройств. Совокупность уменьшения напряжений логических уровней, увеличения рабочих частот РЭА, ужесточающихся требований к регламентируемым уровням помеховых эмиссий, а также необходимость подавления помеховых эмиссий в дифференциальном и синфазном режимах работы одновременно приводит к потребности в новых, более совершенных, устройствах защиты [3, 4]. При разработке современных

устройств защиты широко используют технические решения, основанные на применении полосковых фильтров. На основе линий передачи с неоднородным диэлектрическим заполнением создаются устройства защиты от СКИ, которые раскладывают помеху на составляющие с меньшей амплитудой из-за разности фазовых скоростей в линии [5]. Они обеспечивают высокую надежность и отказоустойчивость благодаря отсутствию пассивных и активных радиоэлектронных компонентов, что делает их предпочтительным выбором для защиты от импульсных помех малой длительности. Для повышения эффективности таких устройств с эффектом модального разложения необходимо оптимизировать параметры их поперечных сечений. Оптимизация позволяет улучшить характеристики устройства, снижая амплитуду выходного сигнала и увеличивая временные интервалы между импульсами, тем самым обеспечивая лучшее ослабление помех [6]. Таким образом, целью работы является разработка и оптимизация новых устройств защиты радиоэлектронной аппаратуры от СКИ, работающих в дифференциальном и синфазном режимах.

1. Структуры, методы, схемы

Существует несколько подходов к разработке устройств защиты от СКИ с эффектом модального разложения. Один из них заключается в использовании в составе устройства общего диэлектрического основания для размещения на нем необходимой конфигурации проводников, тем самым упрощая и удешевляя конструкцию. Другой метод предполагает объединений двух и более обособленных структур в единую конструкцию устройства защиты, что позволяет получить большую разность погонных задержек мод. Кроме того, этот подход предпочтителен при разработке устройства защиты, работающего в дифференциальном и синфазном режимах.

Исследованы два поперечных сечения устройств защиты, работающих в дифференциальном и синфазном режимах, представляющие собой 6- и 8-проводные структуры. Параметры и структуры исследуемых поперечных сечений выбраны путем предварительного многовариантного анализа [7].

Их проводники специальным образом сконфигурированы на общем диэлектрическом основании и объединены в одну конструкцию из двух структур, в которых опорные проводники соединены между собой на ближнем и дальнем концах.

Поперечные сечения исследуемых устройств защиты характеризуются следующими параметрами: ширина проводников (w), расстояние между проводниками (s), расстояние от проводника до края диэлектрика (d), толщина диэлектрических слоев (h_1), толщина воздушного зазора между структурами (h_2), толщина проводников (t), диэлектрическая проницаемость слоев (ϵ_{r1}), диэлектрическая проницаемость окружающего воздуха (ϵ_{r2}), длина структуры (l).

На рис. 1а представлено поперечное сечение 6-проводной структуры, работающей в дифференциальном и синфазном режимах. Исходные геометрические параметры поперечного сечения: $w = 6$ мм, $s = 2$ мм, $d = 1$ мм, $h_1 = 500$ мкм, $h_2 = 1360$ мкм, $t = 105$ мкм, $\epsilon_{r1} = 10$, $\epsilon_{r2} = 1$, $l = 100$ мм. Схема электрических соединений исследуемого поперечного сечения представлена на рис. 1б.

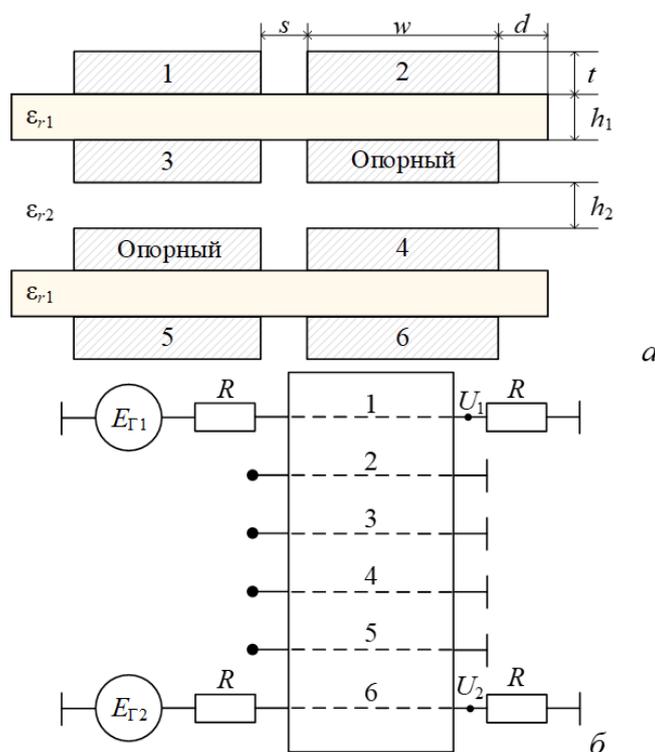


Рис. 1. Поперечное сечение (а) и схема электрических соединений (б) 6-проводной структуры.

На рис. 2а представлено поперечное сечение 8-проводной структуры, работающей в дифференциальном и синфазном режимах. А на рис. 2б его схема электрических соединений. Геометрические параметры поперечного сечения 8-проводной структуры: $w = 3$ мм, $s = 3$ мм, $d = 1,50$ мм, $h_1 = 500$ мкм, $h_2 = 800$ мкм, $t = 105$ мкм, $\epsilon_{r1} = 10$, $\epsilon_{r2} = 1$, $l = 100$ мм.

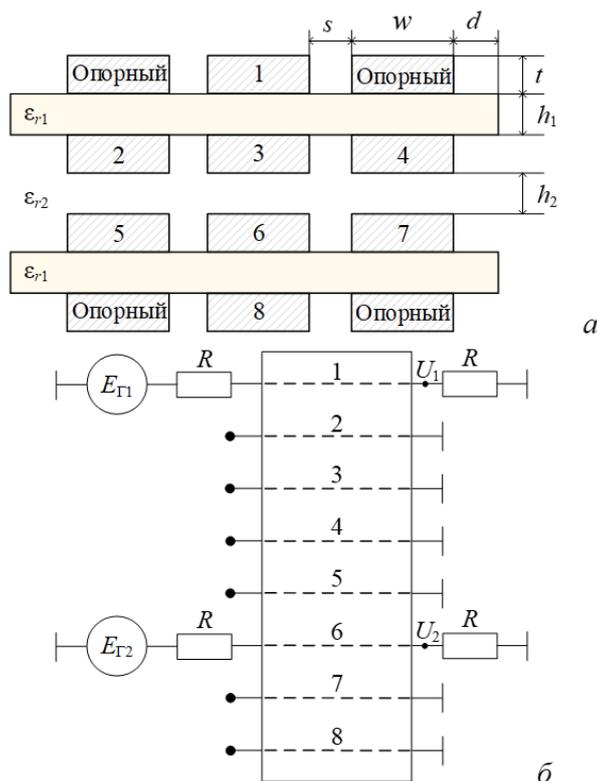


Рис. 2. Поперечное сечение (а) и схема электрических соединений (б) 8-проводной структуры.

Предварительное квазистатическое моделирование выполнено в ПО TUSUR.EMC [8] без учета потерь в проводниках и диэлектриках. В качестве входного воздействия использован СКИ трапецеидальной формы с длительностями фронта, спада и плоской вершины по 0,1 нс и амплитудой э.д.с 1 В (рис. 3) [9].

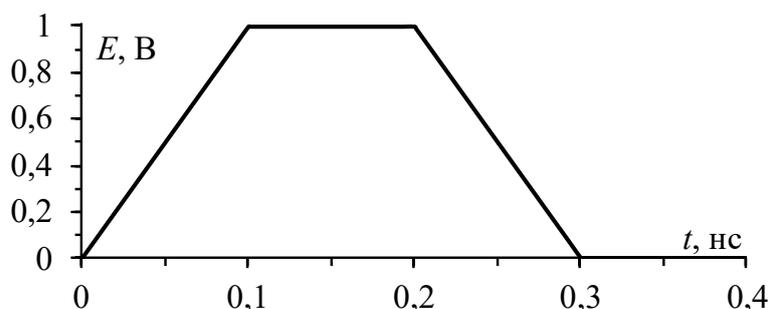


Рис. 3. Форма э.д.с. входного воздействия.

Реализация режимов воздействия при компьютерном моделировании выполнена источниками э.д.с. $E_{Г1}$ и $E_{Г2}$. Для дифференциального режима $E_{Г1} = 0,5$ В, $E_{Г2} = -0,5$ В, а для синфазного режима – $E_{Г1} = E_{Г2} = 1$ В. Напряжение на выходе защитного устройства определяется по выражению (1) для дифференциального режима и по выражению (2) для синфазного режима [10].

$$U_{DM} = U_1 - U_2, \quad (1)$$

$$U_{CM} = \frac{U_1 + U_2}{2}, \quad (2)$$

где U_1 – напряжение на выходе линии, к которой подключен источник э.д.с $E_{Г1}$, U_2 – напряжение на выходе линии, к которой подключен источник э.д.с $E_{Г2}$.

При моделировании приняты следующие значения номиналов конечных нагрузок: сопротивление на концах активных проводников $R = 50$ Ом, на ближних концах пассивных проводников короткое замыкание (КЗ) – 1 мОм, на ближних дальних концах пассивных проводников холостой ход (ХХ) – 1 МОм. Для обеспечения одинаковых условий моделирования для всех исследуемых структур $l = 100$ мм. Активными проводниками являются те, на которые подключены источники э.д.с., остальные проводники пассивные.

На рис. 4 показаны формы напряжения на выходе 6-проводной структуры в дифференциальном и синфазном режимах.

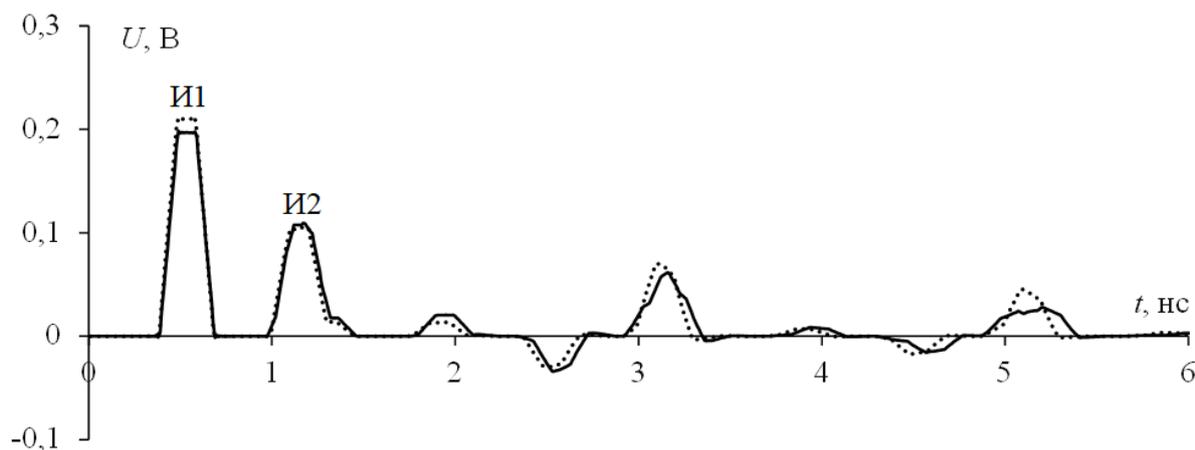


Рис. 4. Формы напряжения на выходе 6-проводной структуры в дифференциальном (...) и синфазном (—) режимах.

В результате моделирования получено, что при данных параметрах поперечного сечения погонные задержки мод равны: $\tau_1 - 3,83$ нс/м, $\tau_2 - 3,87$ нс/м, $\tau_3 - 9,72$ нс/м, $\tau_4 - 9,74$ нс/м, $\tau_5 - 9,98$ нс/м, $\tau_6 - 10$ нс/м. Также вычислены значения максимального напряжения U_{\max} на выходе защитного устройства в дифференциальном режиме 216 мВ и в синфазном режиме – 195 мВ. В соответствии с режимом воздействия в дифференциальном режиме используются моды 1, 3 и 5, а синфазном – моды 2, 4 и 6. Импульс И1 формируется модой с погонной задержкой τ_1 в дифференциальном режиме и τ_2 – в синфазном. Импульс И2 формируется путем наложения мод с погонными задержками τ_3, τ_5 в дифференциальном режиме и τ_4, τ_6 – в синфазном. Максимальная амплитуда определяется импульсом И1 в обоих режимах. Остальные импульсы являются импульсами переотражения.

Коэффициент ослабления k защитного устройства определяется соотношением:

$$k = \frac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{вых}}}, \quad (3)$$

где $U_{\text{вх}} = E_{\Gamma}/2$ (половина э.д.с. или напряжение на согласованной нагрузке без устройства защиты), $U_{\text{вых}}$ – напряжение на выходе устройства защиты.

Коэффициент ослабления защитного устройства на основе 6-проводной структуры по (3) составил 2,56 раза для синфазного режима и 2,31 – для дифференциального режима.

На рис. 5 показаны формы напряжения на выходе 8-проводной структуры в синфазном и дифференциальном режимах.

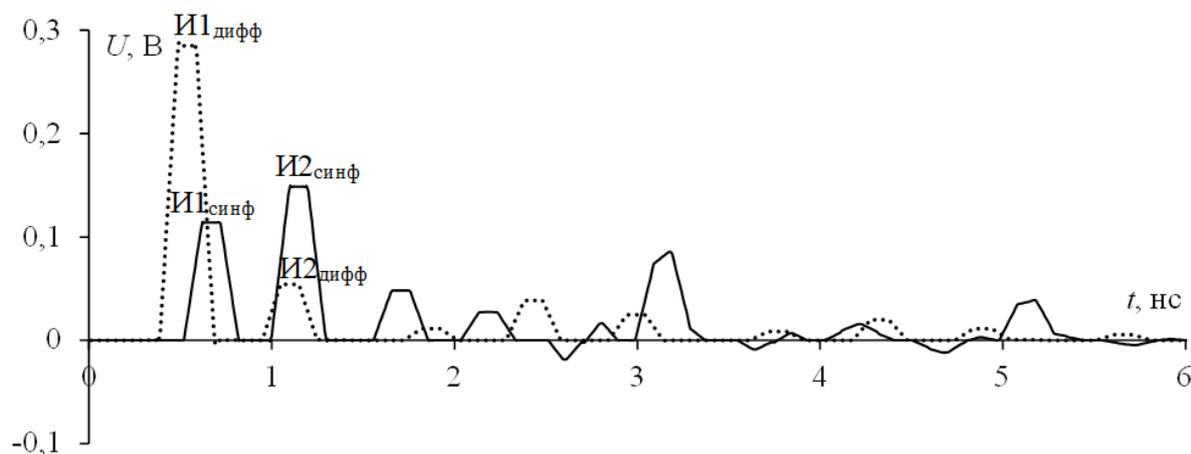


Рис. 5. Формы напряжения на выходе 8-проводной структуры в дифференциальном (...) и синфазном (—) режимах.

В результате моделирования получено, что при данных параметрах поперечного сечения погонные задержки мод равны: $\tau_1 - 3,9$ нс/м, $\tau_2 - 5,2$ нс/м, $\tau_3 - 7,27$ нс/м, $\tau_4 - 7,3$ нс/м, $\tau_5 - 9,5$ нс/м, $\tau_6 - 9,91$ нс/м, $\tau_7 - 9,95$ нс/м, $\tau_8 - 9,97$ нс/м. Значения U_{max} на выходе защитного устройства в дифференциальном режиме равны 286 мВ, в синфазном режиме – 148 мВ. В соответствии с режимом воздействия в дифференциальном режиме используются моды 1, 3, 5 и 7, а синфазном – моды 2, 4, 6 и 8. В дифференциальном режиме U_{max} определяется импульсом $И1_{дифф}$, в синфазном – $И2_{синф}$. Амплитуда импульса $И1_{дифф}$ в дифференциальном режиме формируется модой с погонной задержкой τ_1 , а $И2_{дифф}$ – наложением мод с погонными задержками τ_5 и τ_7 , мода τ_3 имеет незначительную амплитуду и оказывают слабое влияние на формирование U_{max} в дифференциальном режиме. В синфазном режиме амплитуда импульса $И1_{синф}$ формируется модой с погонной задержкой τ_2 , а $И2_{синф}$ – наложением мод с погонными задержками τ_6 и τ_8 , мода τ_4 не оказывает значительного влияния на формирование амплитуды U_{max} в синфазном режиме. Остальные импульсы

являются импульсами переотражения. Коэффициент ослабления защитного устройства относительно половины э.д.с. составил 3,38 раза для синфазного режима и 1,75 – для дифференциального режима.

Полученные результаты предварительного моделирования показали необходимость оптимизации по двум критериям, позволяющих достичь наибольших значений ослабления: минимизация амплитуды импульсов разложения на выходе и выравнивание временных интервалов между ними. Первый критерий позволяет увеличить коэффициент ослабления СКИ. Вторым критерий позволяет увеличить максимальную длительность СКИ, а также перераспределить энергию помехового импульсного воздействия во времени. Эти критерии достигаются путем поиска номиналов конечных нагрузок на ближнем и дальнем концах, характеристического импеданса линии, а также изменения электромагнитной связи между проводниками. В данном случае предполагается достичь критерии путем изменения электромагнитной связи путем подбора геометрических параметров поперечных сечений. Для этого используется простой генетический алгоритм (ГА), реализованный в ПО TUSUR.EMC.

Для реализации амплитудного критерия в качестве целевой функции (ЦФ) выбрана минимизация максимальной амплитуды импульсов на выходе для дифференциального (U_{maxDM}) и синфазного (U_{maxCM}) режимов по-отдельности:

$$F_{CM} = \max(U_{CM}(t)), \quad (4)$$

$$F_{DM} = \max(U_{DM}(t)), \quad (5)$$

где $U_{CM}(t)$ – напряжение на выходе активного проводника в синфазном режиме, $U_{DM}(t)$ – в дифференциальном режиме.

Для увеличения максимальной длительности помехового импульса выбрана ЦФ, которая реализует минимизацию квадрата разности между

максимальным и минимальным значениями временных интервалов [11].

Для 6-проводной структуры:

$$F_{time} = \left(\max(\Delta t_1 \div \Delta t_5) - \min(\Delta t_1 \div \Delta t_5) \right)^2. \quad (6)$$

Для 8-проводной структуры:

$$F_{time} = \left(\max(\Delta t_1 \div \Delta t_7) - \min(\Delta t_1 \div \Delta t_7) \right)^2. \quad (7)$$

Количество особей равно 50, количество поколений – 100, а коэффициент кроссовера – 0,5. Выполнено по 5 запусков ГА, чтобы убедиться в повторяемости результатов.

2. 6-проводная структура

Диапазоны оптимизации параметров поперечного сечения для 6-проводной структуры: $w = 11 - 26$ мм, $s = 3 - 5$ мм, $h_1 = 0,2 - 1$ мм, $h_2 = 3 - 5$ мм. Параметры $t = 35$ мкм, $d = 1$ мм, $\varepsilon_{r1} = 10,2$, $\varepsilon_{r2} = 1$, $l = 100$ мм в процессе оптимизации не изменяются. Результаты оптимизации по амплитудному критерию в дифференциальном и синфазном режимах приведены в таблицах 1 и 2, а по временному – в таблице 3. Полужирным выделены параметры, обеспечивающие лучший результат. На рис. 6 приведены формы напряжения на выходе 6-проводной структуры, полученные по результатам оптимизации по амплитудному критерию, а на рис. 7 – по временному.

Таблица 1. Результаты минимизации U_{max} на выходе 6-проводной структуры в синфазном режиме.

Значение	1	2	3	4	5	Отклонение, %
w , мм	26	26	25,94	25,82	25,94	0,69
s , мм	3,25	4	3,52	3,85	3,57	18,75
h_1 , мм	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0
h_2 , мм	4,99	4,87	4,98	4,96	5	2,60
U_{max} , мВ	13,25	13,42	13,4	13,37	13,27	1,26
Время, с	35448,8	35441	35381,7	35391,2	35548,8	0,47

Таблица 2. Результаты минимизации U_{\max}
на выходе 6-проводной структуры в дифференциальном режиме.

Значение	1	2	3	4	5	Отклонение, %
w , мм	26	25,06	25,29	26	25,76	3,61
s , мм	3,92	3,24	3,90	3,75	3,81	17,34
h_1 , мм	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0
h_2 , мм	5,00	4,97	4,99	4,97	4,67	6,60
U_{\max} , мВ	13,33	13,74	13,61	13,35	13,24	3,63
Время, с	34777,4	34866,6	35040,3	34876,6	35830,1	2,93

Выполнено моделирование 6-проводной структуры с оптимальными параметрами поперечного сечения: для дифференциального режима – $w = 25,76$ мм, $s = 3,81$ мм, $h_1 = 0,2$ мм, $h_2 = 4,67$ мм и для синфазного режима – $w = 26$ мм, $s = 3,25$ мм, $h_1 = 0,2$ мм, $h_2 = 4,99$ мм.

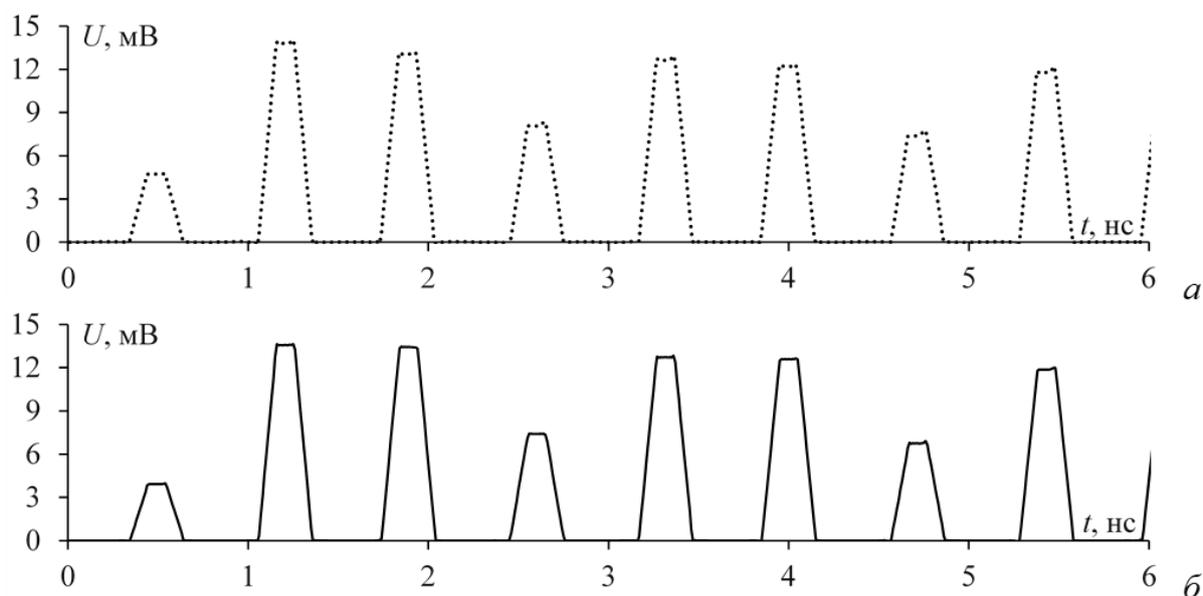
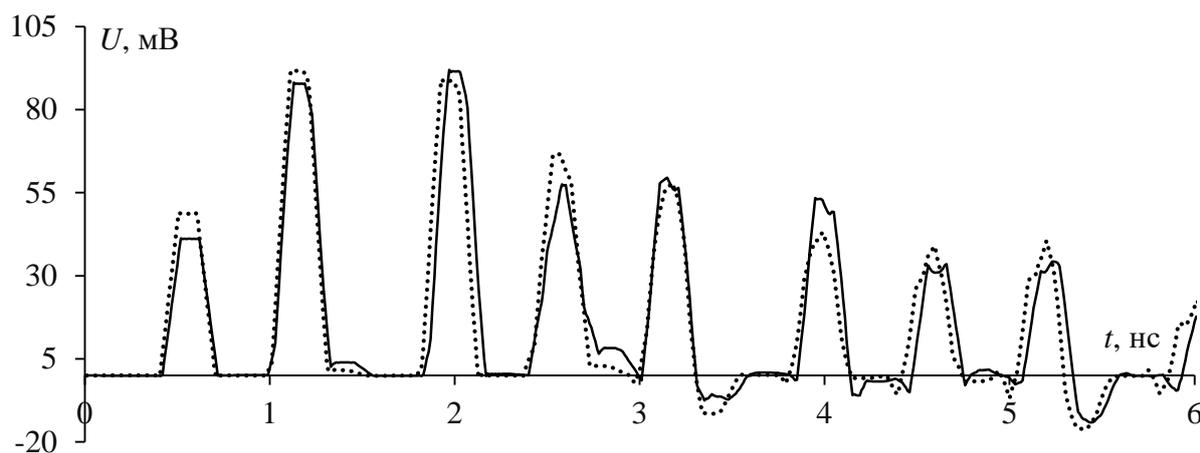


Рис. 6. Формы напряжения на выходе 6-проводной структуры в дифференциальном (а) и синфазном (б) режимах при минимизации U_{\max}

Таблица 3. Результаты минимизации значения F_{time} для 6-проводной структуры.

Значение	1	2	3	4	5	Отклонение, %
w , мм	11,05	11	11	11	11,06	0,54
s , мм	3,04	3,10	3,00	3,01	3,03	3,22
h_1 , мм	0,99	1	0,97	0,99	1	3
h_2 , мм	4,99	5	4,98	4,91	4,89	1,8
F_{time}	0,30	0,30	0,31	0,30	0,30	3,22
τ_1	4,06	4,06	4,06	4,06	4,06	0
τ_2	4,19	4,18	4,18	4,19	4,19	0,24
τ_3	9,82	9,81	9,83	9,81	9,81	0,21
τ_4	9,91	9,9	9,91	9,9	9,9	0,11
τ_5	10,12	10,11	10,12	10,12	10,11	0,10
τ_6	10,28	10,28	10,29	10,28	10,28	0,10
Δt_1 , нс	0,125	0,125	0,125	0,125	0,124	0,8
Δt_2 , нс	5,63	5,62	5,64	5,62	5,62	0,35
Δt_3 , нс	0,088	0,089	0,087	0,087	0,086	3,37
Δt_4 , нс	0,211	0,02	0,2	0,213	0,021	6,11
Δt_5 , нс	0,166	0,016	0,164	0,168	0,017	4,76
Время, с	31715,6	31760,1	31768,5	32241,3	32363,2	2,01

Для получения форм напряжения на выходе 6-проводной структуры (рис. 7), выбраны лучшие значения оптимизации по критерию минимизации квадрата разности максимального и минимального временных интервалов: $w = 11$ мм, $s = 3,01$ мм, $h_1 = 0,99$ мм, $h_2 = 4,91$ мм.

Рис. 7. Формы напряжения на выходе 6-проводной структуры в дифференциальном (...) и синфазном (—) режимах при минимизации F_{time}

По результатам оптимизации по амплитудному критерию получены оптимальные параметры, позволяющие для 6-проводной структуры уменьшить

значение $U_{\max DM}$ до 13,24 мВ, а $U_{\max CM}$ до 13,25 мВ, т.е. в среднем в 15 раз меньше по сравнению с U_{\max} до оптимизации в обоих режимах. Оптимизация по временному критерию не увеличила разности погонных задержек. Это связано со спецификой геометрических моделей поперечных сечений и обеспечиваемой в них электромагнитной связи.

3. 8-проводная структура

Оптимизация для 8-проводной структуры выполнена аналогично 6-проводной структуре. Диапазоны оптимизации параметров поперечного сечения: $w = 15 - 25$ мм, $s = 6 - 8$ мм, $h_1 = 0,2 - 1$ мм, $h_2 = 1 - 3$ мм. Параметры $t = 35$ мкм, $d = 1$ мм, $\varepsilon_{r1} = 10,2$, $\varepsilon_{r2} = 1$, $l = 100$ мм в процессе оптимизации не изменяются. Результаты оптимизации по амплитудному критерию приведены в таблицах 4 и 5, а по временному – в таблице 6.

Таблица 4. Результаты минимизации U_{\max} на выходе 8-проводной структуры в синфазном режиме.

Значение	1	2	3	4	5	Отклонение, %
w , мм	25	25	24,84	24,96	25	0,64
s , мм	7,97	7,94	7,94	7,97	7,79	2,25
h_1 , мм	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0
h_2 , мм	1,21	1,33	1,16	1,21	1,22	12,78
U_{\max} , мВ	12,62	12,63	12,73	12,64	12,65	0,78
Время, с	25472,8	26257,9	27148	27979,5	29312,9	13,1

Таблица 5. Результаты минимизации U_{\max} на выходе 8-проводной структуры в дифференциальном режиме.

Значение	1	2	3	4	5	Отклонение, %
w , мм	24,84	24,96	25	25	24,96	0,64
s , мм	6,09	6,82	7,16	6,15	7,16	14,94
h_1 , мм	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0
h_2 , мм	3	3	2,95	2,99	2,94	2
U_{\max} , мВ	23,55	23,49	23,56	23,46	23,58	0,5
Время, с	25570,6	25995,3	25544,4	25990,1	27061,1	5,5

Таблица 6. Результаты минимизации значения F_{time} для 8-проводной структуры.

Значение	1	2	3	4	5	Отклонение, %
w , мм	15,2745	15,0784	15,902	15	15,3137	2,04
s , мм	6,10196	6	6	6,12549	6,08627	2,04
h_1 , мм	0,971765	0,962353	0,996863	0,971765	0,96549	3,14
h_2 , мм	1,48627	1,47843	1,54118	1,49412	1,47843	4,07
F_{time}	0,068191	0,0677886	0,0675631	0,067476	0,0682506	1,13
τ_1	3,57	3,58	3,57	3,58	3,57	0,28
τ_2	4,81	4,82	4,83	4,81	4,81	0,42
τ_3	7,32	7,32	7,34	7,33	7,32	0,27
τ_4	7,32	7,32	7,34	7,33	7,32	0,27
τ_5	9,93	9,93	9,94	9,92	9,93	0,21
τ_6	10,29	10,29	10,29	10,29	10,29	0
τ_7	10,3	10,3	10,3	10,29	10,3	0,10
τ_8	10,3	10,3	10,31	10,3	10,31	0,10
Δt_1 , нс	1,23	1,24	1,25	1,23	1,23	1,6
Δt_2 , нс	2,5	2,5	2,5	2,51	2,51	0,39
Δt_3 , нс	0,00001	0,00001	0,000011	0,00001	0,00001	9,09
Δt_4 , нс	2,61	2,6	2,6	2,59	2,61	0,76
Δt_5 , нс	0,35	0,35	0,35	0,36	0,35	2,77
Δt_6 , нс	0,0074	0,0074	0,0069	0,0077	0,0073	10,38
Δt_7 , нс	0,007	0,0073	0,0076	0,007	0,0069	9,21
Время, с	22935,2	20898,1	21041,3	23131	20894,1	9,65

На рис. 8 приведены формы напряжения на выходе 8-проводной структуры, полученных по результатам оптимизации по амплитудному критерию. Для дифференциального режима использовались следующие оптимальные параметры поперечного сечения: $w = 25$ мм, $s = 6,15$ мм, $h_1 = 0,20$ мм, $h_2 = 2,99$ мм. Аналогично для синфазного режима: $w = 25$ мм, $s = 7,97$ мм, $h_1 = 0,2$ мм, $h_2 = 1,21$ мм. Для получения форм напряжения на выходе 8-проводной структуры (рис. 9) выбраны лучшие значения оптимизации по критерию минимизации квадрата разности максимального и минимального временных интервалов: $w = 15,90$ мм, $s = 6$ мм, $h_1 = 1$ мм, $h_2 = 1,54$ мм.

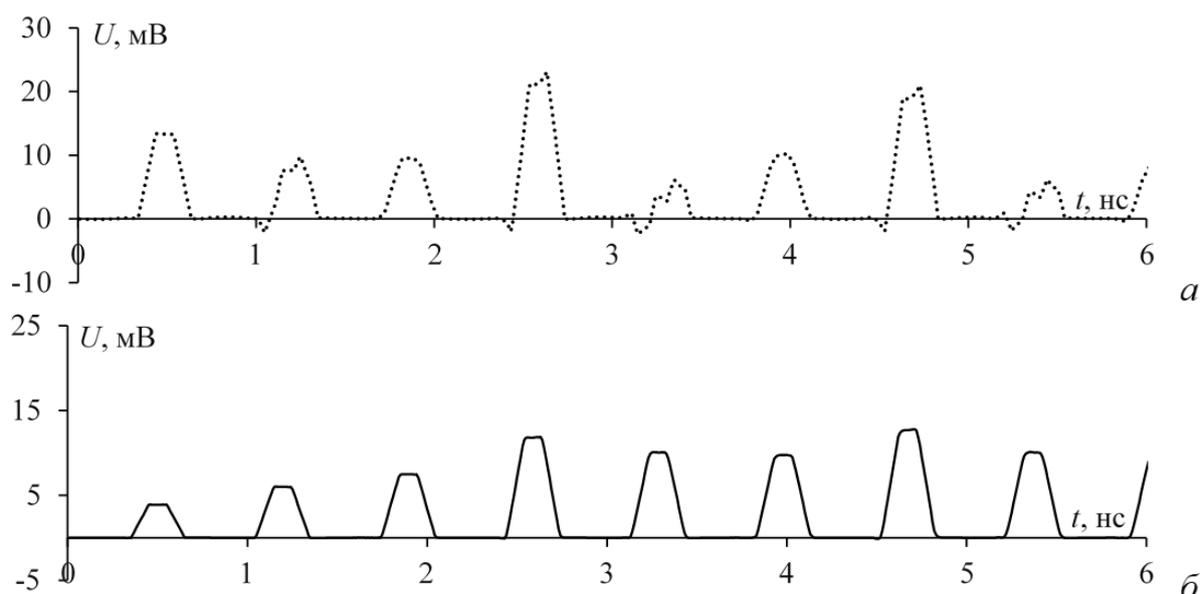


Рис. 8. Формы напряжения на выходе 8-проводной структуры в дифференциальном (а) и синфазном (б) режимах при минимизации U_{\max} .

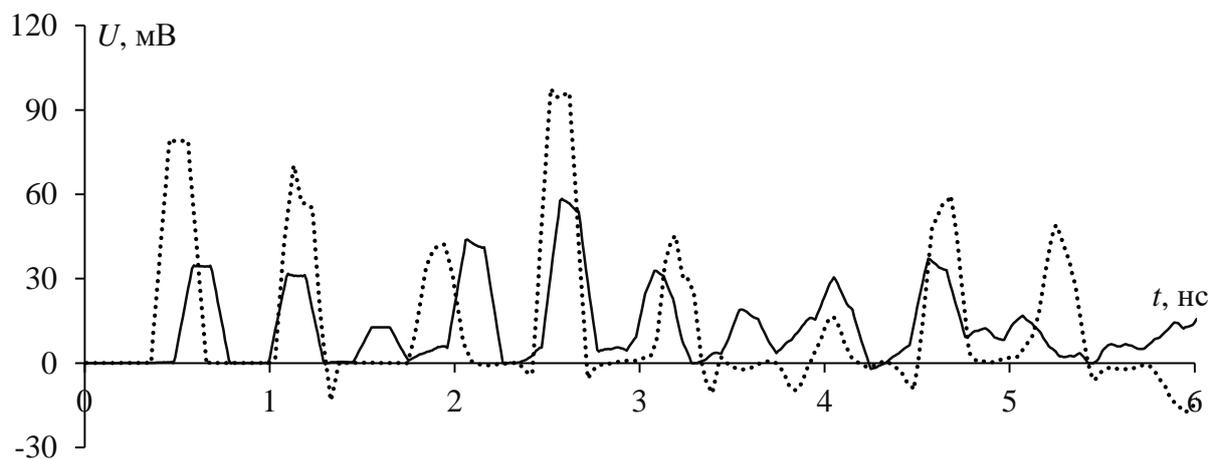


Рис. 9. Формы напряжения на выходе 8-проводной структуры в дифференциальном (...) и синфазном (—) режимах при минимизации F_{time} .

По результатам оптимизации по амплитудному критерию получены оптимальные параметры, позволяющие для 8-проводной структуры уменьшить значение $U_{\max DM}$ до 23,46 мВ, а $U_{\max CM}$ до 12,62 мВ, т.е. в среднем в 12 раз меньше по сравнению с U_{\max} до оптимизации в обоих режимах. Оптимизация по временному критерию, аналогично 6-проводной структуре, не увеличила разности погонных задержек.

4. Матрицы погонных параметров оптимизированных устройств защиты

Для дальнейшего исследования устройств защиты выбраны параметры, полученные в результате оптимизации по амплитудному критерию. Однако так как оптимизация выполнялась для каждого режима по-отдельности, а устройство защиты подразумевает работу в дифференциальном и синфазном режимах одновременно, необходимо выбрать параметры, позволяющие получить минимальное значение U_{\max} в обоих режимах. В результате для 6-проводной структуры $w = 26$ мм, $s = 3,5$ мм, $d = 1$ мм, $h_1 = 0,2$ мм, $h_2 = 5$ мм, $t = 35$ мкм, $\varepsilon_{r1} = 10,2$, $\varepsilon_{r2} = 1$, $l = 0,1$ м, а для 8-проводной – $w = 25$ мм, $s = 8$ мм, $d = 1$ мм, $h_1 = 0,2$ мм, $h_2 = 2,5$ мм, $t = 35$ мкм, $\varepsilon_{r1} = 10,2$, $\varepsilon_{r2} = 1$, $l = 0,1$ м.

Для оптимизированных 6- и 8-проводной структуры вычислены матрицы электростатической (**C**) и электромагнитной (**L**) индукций, а также матрицы характеристического импеданса (**Zc**) и погонных задержек (**τ**) мод в ПО TUSUR.EMC с помощью метода моментов. Для 6-проводной структуры:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 11789,1 & -8,275 & -11770,7 & -0,932 & -2,682 & -1,203 \\ -8,275 & 11789,1 & -2,686 & -2,602 & -1,203 & -2,682 \\ -11770,7 & -2,686 & 11824,2 & -1,203 & -2,602 & -0,932 \\ -0,932 & -2,602 & -1,203 & 11824,2 & -2,686 & -11770,7 \\ -2,682 & -1,203 & -2,602 & -2,686 & 11789,1 & -8,275 \\ -1,203 & -2,682 & -0,932 & -11770,7 & -8,275 & 11789,1 \end{bmatrix} \text{ пФ/м,}$$

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} 167,4 & 1,389 & 160,178 & 9,388 & 0,791 & 9,566 \\ 1,389 & 9,436 & 1,342 & 0,773 & 0,024 & 0,791 \\ 160,178 & 1,342 & 162,510 & 9,566 & 0,773 & 9,388 \\ 9,388 & 0,773 & 9,566 & 162,510 & 1,342 & 160,178 \\ 0,791 & 0,024 & 0,773 & 1,342 & 9,436 & 1,389 \\ 9,566 & 0,791 & 9,388 & 160,178 & 1,389 & 167,4 \end{bmatrix} \text{ нГн/м,}$$

$$\mathbf{Zc} = \begin{bmatrix} 48 & 0,132 & 47,324 & 2,594 & 0,074 & 2,609 \\ 0,132 & 0,894 & 0,130 & 0,073 & 0,001 & 0,074 \\ 47,324 & 0,130 & 47,544 & 2,609 & 0,073 & 2,594 \\ 2,594 & 0,073 & 2,609 & 47,544 & 0,130 & 47,324 \\ 0,074 & 0,001 & 0,073 & 0,130 & 0,894 & 0,132 \\ 2,609 & 0,074 & 2,594 & 47,324 & 0,132 & 48 \end{bmatrix} \text{ Ом, } \boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} 3,39831 \\ 3,41276 \\ 10,5258 \\ 10,5281 \\ 10,5617 \\ 10,5893 \end{bmatrix} \text{ нс/м.}$$

Для 8-проводной структуры:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 11114,7 & -1,111 & -11093,8 & -1,111 & -0,732 & -3,014 & -0,732 & -2,321 \\ -1,111 & 11190,8 & -0,392 & -0,002 & -88,672 & -0,319 & -0,0007 & -0,732 \\ -11093,8 & -0,392 & 11189,5 & -0,392 & -0,319 & -88,399 & -0,319 & -3,014 \\ -1,111 & -0,002 & -0,392 & 11190,8 & -0,0007 & -0,319 & -88,672 & -0,732 \\ -0,732 & -88,672 & -0,319 & -0,0007 & 11190,8 & -0,392 & -0,002 & -1,111 \\ -3,014 & -0,319 & -88,399 & -0,319 & -0,392 & 11189,5 & -0,392 & -11093,8 \\ -0,732 & -0,0007 & -0,319 & -88,672 & -0,002 & -0,392 & 11190,8 & -1,111 \\ -2,321 & -0,732 & -3,014 & -0,732 & -1,111 & -11093,8 & -1,111 & 11114,7 \end{bmatrix} \text{ пФ/м,}$$

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} 335,589 & 0,492 & 330,320 & 0,498 & 0,482 & 278,133 & 0,488 & 281,575 \\ 0,492 & 9,225 & 0,497 & 0,0009 & 0,673 & 0,489 & 0,0009 & 0,488 \\ 330,320 & 0,497 & 334,950 & 0,497 & 0,490 & 281,575 & 0,489 & 278,133 \\ 0,498 & 0,0009 & 0,497 & 9,225 & 0,0009 & 0,490 & 0,673 & 0,482 \\ 0,482 & 0,673 & 0,490 & 0,0009 & 9,225 & 0,497 & 0,0009 & 0,498 \\ 278,133 & 0,489 & 281,575 & 0,490 & 0,497 & 334,950 & 0,497 & 330,320 \\ 0,488 & 0,0009 & 0,489 & 0,673 & 0,0009 & 0,497 & 9,225 & 0,492 \\ 281,575 & 0,488 & 278,133 & 0,482 & 0,498 & 330,320 & 0,492 & 335,589 \end{bmatrix} \text{ нГн/м,}$$

$$\mathbf{Zc} = \begin{bmatrix} 95,590 & 0,050 & 95,090 & 0,050 & 0,048 & 79,365 & 0,049 & 79,044 \\ 0,050 & 0,907 & 0,050 & 0,00005 & 0,036 & 0,049 & 0,00005 & 0,049 \\ 95,090 & 0,050 & 95,524 & 0,050 & 0,048 & 79,044 & 0,049 & 79,365 \\ 0,050 & 0,00005 & 0,050 & 0,907 & 0,00005 & 0,048 & 0,036 & 0,048 \\ 0,048 & 0,036 & 0,048 & 0,00005 & 0,907 & 0,050 & 0,00005 & 0,050 \\ 79,365 & 0,049 & 79,044 & 0,048 & 0,050 & 95,524 & 0,050 & 95,090 \\ 0,049 & 0,00005 & 0,049 & 0,036 & 0,00005 & 0,050 & 0,907 & 95,090 \\ 79,044 & 0,049 & 79,365 & 0,048 & 0,050 & 95,090 & 0,050 & 95,590 \end{bmatrix} \text{ Ом,}$$

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} 3,36442 \\ 3,49298 \\ 9,82161 \\ 9,82162 \\ 10,4273 \\ 10,4826 \\ 10,4833 \\ 10,4849 \end{bmatrix} \text{ нс/м.}$$

Из матриц для 6-проводной структуры видно равенство некоторых элементов по главной диагонали: $C_{11} = C_{22} = C = C_{66}$ и $C_{33} = C_{44}$. Также равны некоторые взаимные элементы, в зависимости от расположения относительно земли: $C_{12} = C_{56}$; $C_{13} = C_{46}$; $C_{14} = C_{36}$; $C_{15} = C_{26}$; $C_{16} = C_{25}$; $C_{23} = C_{45}$; $C_{24} = C_{35}$. Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что геометрическая модель поперечного сечения является центрально-симметричной. Аналогично из матриц 8-проводной структуры видно равенство элементов по главной диагонали: $C_{11} = C_{88}$; $C_{22} = C_{77}$; $C_{33} = C_{66}$; $C_{44} = C_{55}$ и равенство взаимных элементов: $C_{12} = C_{78} = C_{14} = C_{58}$; $C_{13} = C_{68}$; $C_{15} = C_{17} = C_{48} = C_{28}$; $C_{16} = C_{38}$; $C_{24} = C_{57}$; $C_{25} = C_{47}$; $C_{26} = C_{35} = C_{37} = C_{46}$; $C_{34} = C_{23} = C_{56} = C_{67}$. Таким образом, 8-проводная структура является зеркально-симметричной по горизонтальной оси.

5. Квазистатическое моделирование частотных и временных характеристик оптимизированных устройств защиты

Здесь представлены результаты получения временных откликов и S_{21} для 6- и 8-проводной структур с оптимизированными параметрами поперечного сечения. Частотные и временные характеристики оптимизированных устройств защиты получены посредством квазистатического моделирования в ПО Advanced Design System (ADS) [12] по вычисленным матрицам \mathbf{L} и \mathbf{C} . В качестве входного воздействия также использован трапециевидный импульс с длительностями фронта, спада и плоской вершины по 100 пс, так что суммарная длительность входного импульса равна 300 пс. При получении частотных характеристик стоит обратить внимание что устройства защиты являются 4-портовыми. Для получения частотных характеристик в дифференциальном и синфазном режимах использована методика, изложенная в [13], и формулы:

$$S_{dd_{21}} = \frac{S_{21} - S_{41} - S_{23} + S_{43}}{2}, \quad (8)$$

$$S_{cc_{21}} = \frac{S_{21} + S_{41} + S_{23} + S_{43}}{2}. \quad (9)$$

По выражениям (8) и (9) из небалансных характеристик вычисляются балансные характеристики для дифференциального S_{dd21} и синфазного S_{cc21} режимов. На рис. 10 и 11 показаны формы напряжения на выходе 6-проводной структуры и частотная зависимость $|S_{21}|$.

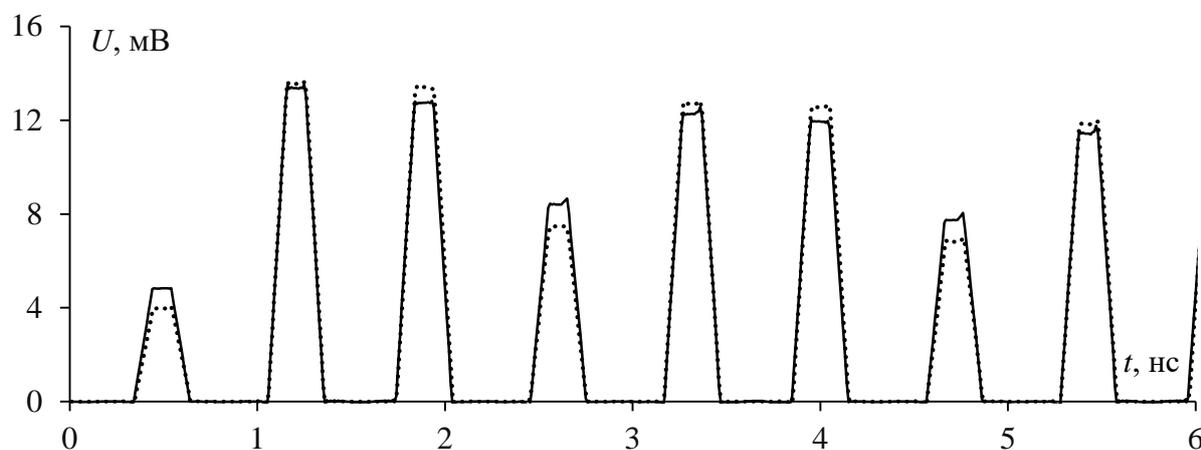


Рис. 10. Формы напряжения на выходе 6-проводной структуры в дифференциальном (...) и синфазном (—) режимах.

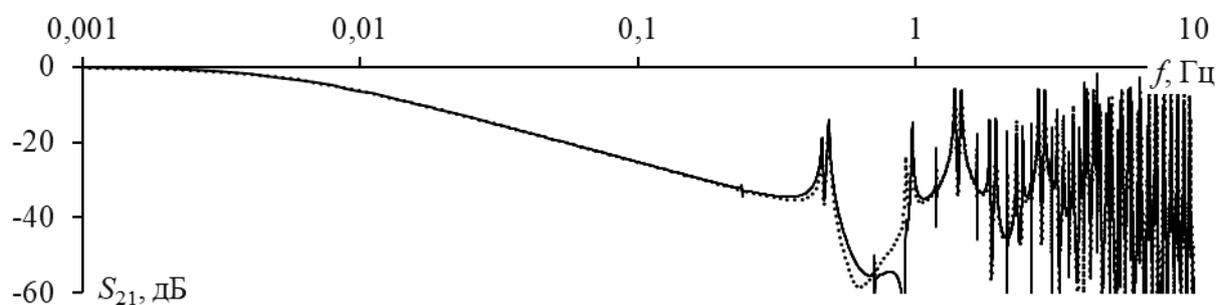


Рис. 11. Частотная зависимость S_{21} 6-проводной структуры в дифференциальном (...) и синфазном (—) режимах.

Из рисунков видно, что на выходе 6-проводной структуры $U_{\max} = 13,33$ мВ в синфазном, а в дифференциальном $U_{\max} = 13,15$ мВ. Частота среза для обоих режимов составила 6 МГц.

На рис. 12 и 13 показаны формы напряжения на выходе 8-проводной структуры и частотная зависимость $|S_{21}|$.

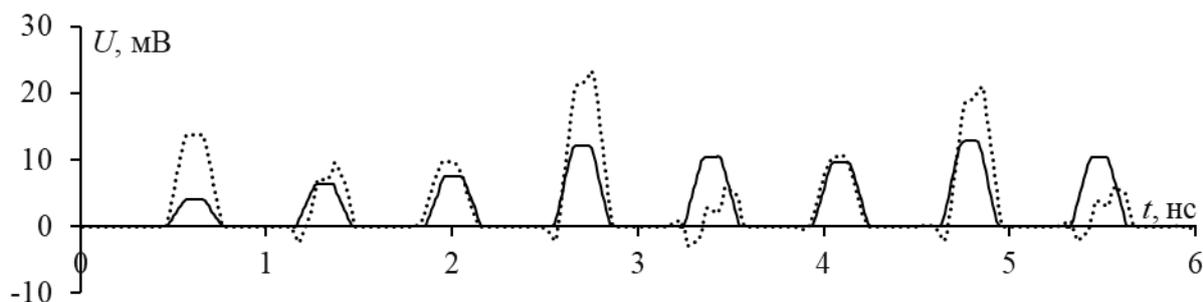


Рис. 12. Формы напряжения на выходе 8-проводной структуры в дифференциальном (...) и синфазном (—) режимах.

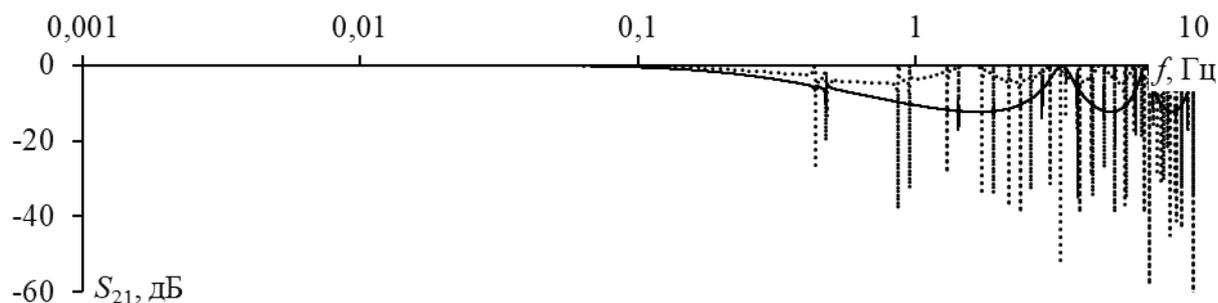


Рис. 13. Частотная зависимость S_{21} устройства защиты в дифференциальном (...) и синфазном (—) режимах.

Из рисунков видно, что на выходе 8-проводной структуры $U_{\max} = 12$ мВ в синфазном, а в дифференциальном $U_{\max} = 28,8$ мВ. Частота среза в синфазном режиме составила 267,7 МГц, а в дифференциальном – 467,30 МГц, соответственно.

Заключение

Таким образом, приведены результаты выбора и обоснования новых устройств защиты от СКИ, работающих в синфазном и дифференциальном режимах. Выбраны 6-проводная и 8-проводная структуры, проводники каждой из которых специально сконфигурированы на общем диэлектрическом основании и объединены в отдельные конструкции, где опорные проводники соединены между собой на ближнем и дальнем концах. Схемы соединений представляют из себя обеспечение холостого хода на ближнем конце пассивных проводников и короткого замыкания – на дальнем. Для реализации режимов воздействия используются два источника э.д.с. $E_{Г1}$ и $E_{Г2}$: для дифференциального $E_{Г1} = 0,5$ В и $E_{Г2} = -0,5$ В, а синфазного – $E_{Г1} = E_{Г2} = 1$ В. В 6-проводной структуре для оптимального ослабления в дифференциальном

и синфазном режимах обеспечивается симметрия воздействий, а для 8-проводной структуры – асимметрия. В соответствии с режимом воздействия в 6-проводной структуре в дифференциальном режиме используются моды 1, 3 и 5, а синфазном – моды 2, 4 и 6; в 8-проводной структуре в дифференциальном режиме используются моды 1, 3, 5 и 7, а синфазном – моды 2, 4, 6 и 8.

Оптимизированы параметры поперечных сечений 6- и 8-проводных структур посредством ГА по двум критериям: минимизации амплитуды напряжения на выходе для дифференциального и синфазного режимов по-отдельности и минимизации квадрата разности максимального и минимального временных интервалов. По амплитудному критерию получены оптимальные параметры, позволяющие для 6-проводной структуры уменьшить значение U_{maxDM} до 13,24 мВ, а U_{maxCM} до 13,25 мВ, а 8-проводной – U_{maxDM} до 23,46 мВ, а U_{maxCM} до 12,62 мВ. Оптимизация по временному критерию не увеличила разность погонных задержек. Это связано со спецификой геометрических моделей поперечных сечений и обеспечиваемой в них электромагнитной связи. Для дальнейшего исследования устройств защиты выбраны параметры, обеспечивающие минимумы U_{max} как в дифференциальном, так и синфазном режимах, полученные с учетом влияния параметров.

Вычислены матрицы коэффициентов электростатической и электромагнитной индукции и матрицы погонных задержек мод оптимизированных устройств защиты. Результаты позволили сделать вывод о том, что геометрическая модель поперечного сечения 6-проводной структуры является центрально-симметричной, а 8-проводной - зеркально-симметричной по горизонтальной оси.

По вычисленным матрицам, в ПО ADS вычислены характеристики коэффициента передачи $|S_{21}|$ и временные отклики на воздействие с амплитудой э.д.с 1 В с общей длительностью 300 пс. В результате 6-проводная структура ослабляет входной импульс $K_{CM} = 37,5$ и $K_{DM} = 38$ и частотой среза $f_c = 6$ МГц для обоих режимов, а 8-проводная – $K_{CM} = 41,6$ и $K_{DM} = 21,9$ и частотой среза $f_c = 267,7$ МГц для синфазного режима и $f_c = 467,3$ МГц – для дифференциального. Из анализа частоты среза получено, что 6-проводную структуру можно

использовать для защиты цепей питания, а 8-проводную – как для защиты цепей питания, так и сигнальных.

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-01216, <https://rscf.ru/project/23-79-01216/> в ТУСУРе и при поддержке Минобрнауки России по проекту FEWM-2024-0005.

Литература

1. Kučera M., Šebök M. Electromagnetic compatibility analysing of electrical equipment // 2016 Diagnostic of Electrical Machines and Insulating Systems in Electrical Engineering (DEMISEE). – IEEE. – 2016. P. 104-109. <https://doi.org/10.1109/DEMISEE.2016.7530476>
2. Mora, N. et al. Study and classification of potential IEMI sources // System and assessment notes. – 2014. – № 41. – 92 p.
3. Колпаков А. ЕМІ и EMC – Проблемы силовой электроники // Вестник Электроники. – 2018. – № 3(63). – С. 16–26.
4. Luo F. et al. Design of a hybrid busbar filter combining a transmission-line busbar filter and a one-turn inductor for DC-fed three-phase motor drive systems // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2013. – Vol. 28. – №. 12. – P. 5588-5602. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2013.2244913>
5. 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. <https://www.doi.org/10.1109/TEMС.2016.2548783>
6. Belousov A. O. et al. UAVs protection and countermeasures in a complex electromagnetic environment // Complexity. – 2022. – Vol. 2022 – №. 1. – P. 8539326. <https://doi.org/10.1155/2022/8539326>

7. Lakoza A. M., Kosteletskii V. P., Chernikova E. B. Influence of cross-section geometrical parameters on the structures characteristics protecting in differential and common modes // 2024 IEEE 3rd International Conference on Problems of Informatics, Electronics and Radio Engineering (PIERE). – Novosibirsk, Russia. – 2024. – P. 180-184. <https://doi.org/10.1109/PIERE62470.2024.10804968>.
8. 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 – IOP Publishing, 2019. – Vol. 560 – №. 012110. – P. 1–7. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/560/1/012110>
9. МЭК 61000–2–13. Электромагнитная совместимость: Окружающая среда. Электромагнитные среды высокой мощности (НРЕМ). Излучаемые и проводимые. – 2005. – 44 с.
10. Кечиев Л. Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры – М.: ООО «Группа ИДТ», 2007. – 616 с.
11. Черникова Е. Б. Параметрическая оптимизация асимметричных многопроводных линий передачи с учетом комбинационных импульсов // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 6. – С. 1–23. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.6.11>
12. PathWave Advanced Design System (ADS). – URL: <https://www.keysight.com/ru/ru/products/software/pathwavedesign-software/path-wave-advanced-design-system.html> (дата обращения: 18.09.2024).
13. Dunsmore J. P. Handbook of microwave component measurements: with advanced VNA technique / J. P. Dunsmore. – John Wiley & Sons. – 2020. – 848 p.

Для цитирования:

Костелецкий В.П., Черникова Е.Б., Лакоза А.М. Оптимизация параметров поперечного сечения устройств защиты от сверхкоротких импульсов, работающих в дифференциальном и синфазном режимах. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №. 5. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.5.2>