

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.6.6>

УДК: 621.396.669

ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОГЛОТИТЕЛЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ В ИНТЕГРАЛЬНОМ ИСПОЛНЕНИИ

В.А. Трубченинов, С.В. Власов, Е. Жечев

**Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
634050, Россия, Томск, проспект Ленина, 40**

Статья поступила в редакцию 11 марта 2025 г.

Аннотация. Современные тенденции развития электроники требуют разработки компактных и высокопроизводительных устройств, работающих в условиях высокого уровня электромагнитных помех (ЭМП). Для обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) дифференциальных линий передачи (ДЛП) перспективным решением является применение электромагнитных поглотителей (ЭП). Однако влияние толщины таких поглотителей на временные и частотные характеристики линий в интегральном исполнении остается недостаточно изученным. В работе использованы методы моделирования, реализованные в программных продуктах TUSUR.EMC и COMSOL Multiphysics. Рассмотрена ДЛП на подложке из GaAs, при этом толщина ЭП варьировались от 0 до 20 мкм. Исследование включает анализ коэффициентов передачи и отражения, временных задержек и целостность сигнала. Цель исследования заключалась в определении оптимальной толщины ЭП, обеспечивающей максимальное подавление помех при минимальном влиянии на полезный сигнал. Результаты показали, что применение ЭП с толщиной 8 мкм снижает амплитуду помехи в 1,4 раза, увеличивает время прихода в 1,15 раза, а также уменьшает уровень отраженных сигналов в полосе

заграждения до минус 13,16 дБ, но при этом ширина полосы пропускания уменьшается с 2,41 ГГц (при $H = 0$) до 1,03 ГГц (при $H = 20$ мкм). Таким образом, использование ЭП с оптимальной толщиной значительно повышает ЭМС ДЛП в интегральном исполнении. Полученные результаты могут быть использованы для проектирования высокочастотных устройств с улучшенными характеристиками помехозащищенности.

Ключевые слова: временной отклик, дифференциальная линия передачи, интегральное исполнение, частотные характеристики, электромагнитный поглотитель.

Финансирование: работа выполнена в рамках проекта FEWM-2024-0005 Минобрнауки России.

Автор для переписки: Трубченинов Вячеслав Анатольевич, slava.trubcheninov@mail.ru

Введение

Современные тенденции развития электроники стремительно направлены к миниатюризации устройств, что открывает новые возможности для создания компактных и высокопроизводительных систем. Постепенное уменьшение размеров электронных компонентов сопровождается повышением их функциональных возможностей, что делает интегральные решения основой технологий следующего поколения [1-4].

Одновременно с этим возрастает количество устройств, использующих дифференциальный режим передачи. Такой подход широко применяется благодаря ключевым преимуществам, включая высокую помехоустойчивость от внешних излучаемых помех, снижение перекрестных помех и улучшенные показатели сигнал-шум [5-7]. К числу интерфейсов, использующих этот принцип, относятся популярные стандарты, такие как HDMI, USB, PCI Express и другие высокоскоростные шины, которые нашли широкое применение в современных устройствах [8-11].

Однако, несмотря на популярность дифференциальных решений, их интеграция сопряжена с рядом сложностей, одной из которых является обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) [12]. Хотя такие устройства обладают высокой устойчивостью к излучаемым электромагнитным помехам (ЭМП), они все же уязвимы к воздействию кондуктивных помех, что требует тщательной проработки конструктивных решений [13] для обеспечения защиты от них.

Одним из методов повышения ЭМС является применение электромагнитных поглотителей (ЭП), что позволяет значительно улучшить помехоподавляющие свойства [14]. Ранее в [15] было проанализировано влияние толщины ЭП на характеристики связанных линий передачи. Однако в этом исследовании не рассматривались структуры в интегральном исполнении и использование дифференциального режима включения проводников, что открывает новые направления для дальнейших исследований.

Целью работы является исследование влияния толщины ЭП на характеристики дифференциальной линии передачи (ДЛП) в интегральном исполнении.

1. Описание подходов и методов

В качестве подложки структуры использован материал GaAs (арсенид галлия), а в качестве проводящего слоя – золото. Параметры структуры (мкм): ширина проводников $w = 5$, толщина проводников $t = 2$, расстояние между проводниками $s = 20$, расстояние от края подложки до проводников $d = 10$, толщина подложки $H_1 = 125$, толщина ЭП H изменяется от 0 до 20 мкм, с шагом 4 мкм, длина линии $l = 22 \cdot 10^3$, относительная диэлектрическая проницаемость подложки $\varepsilon_r = 12,94$, тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta_\varepsilon = 0,006$, относительная магнитная проницаемость $\mu_r = 1$. В качестве ЭП использован листовой поглотитель ЗИПСИЛ 601 РПМ-01 с $\varepsilon_{r1} = 20$, $\mu_{r1} = 3$ и $\operatorname{tg} \delta_{\varepsilon 1} = 0,1$. На рис. 1 представлены поперечные сечения исследуемой структуры без ЭП и с ним, а также ее эквивалентная схема включения. Данные параметры были

выбраны с учетом особенностей технологического процесса изготовления, так как в будущем планируется проведение лабораторного эксперимента.

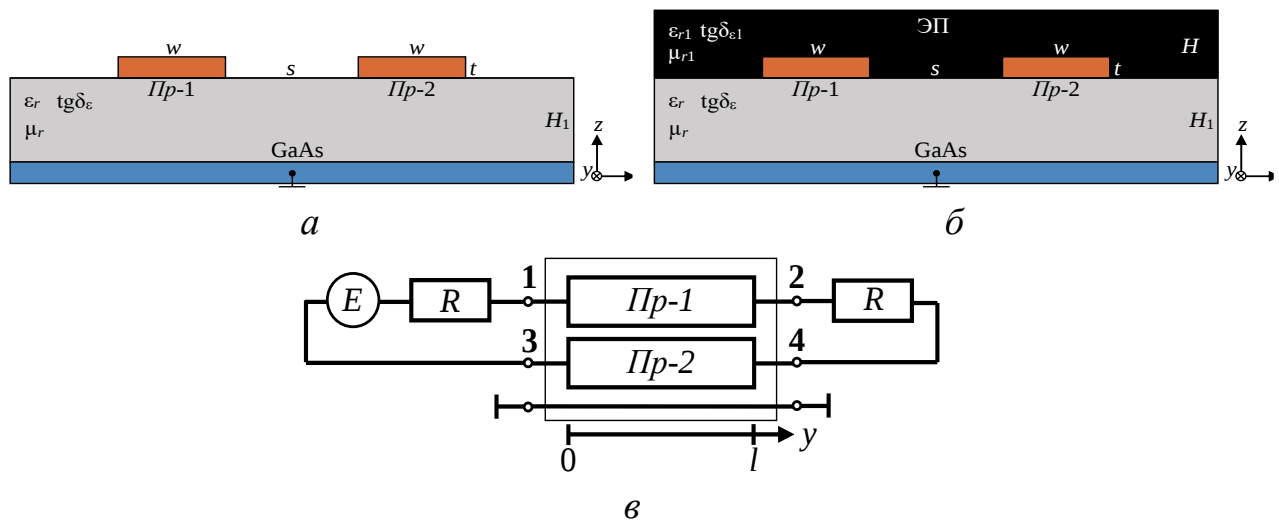


Рис. 1. Поперечное сечение исследуемой структуры без ЭП (а) и с ним (б), а также ее эквивалентная схема включения (в).

Материал ЗИПСИЛ 601 РПМ-01 [16] представляет собой широкополосный листовой ЭП, который демонстрирует высокую эффективность в подавлении электромагнитных волн в сверхвысокочастотном диапазоне. Его структура состоит из композитного материала, включающего как магнитные, так и диэлектрические наполнители. Такое сочетание обеспечивает эффективное поглощение электромагнитной энергии в широком диапазоне частот, что делает материал эффективным в задачах обеспечения ЭМС. Применение данного материала позволяет существенно снизить взаимное электромагнитное влияние между элементами радиоэлектронной аппаратуры, а также уменьшить уровень паразитного излучения. На рис. 2 представлен 3-D вид для исследуемой структуры без ЭП и с ним.

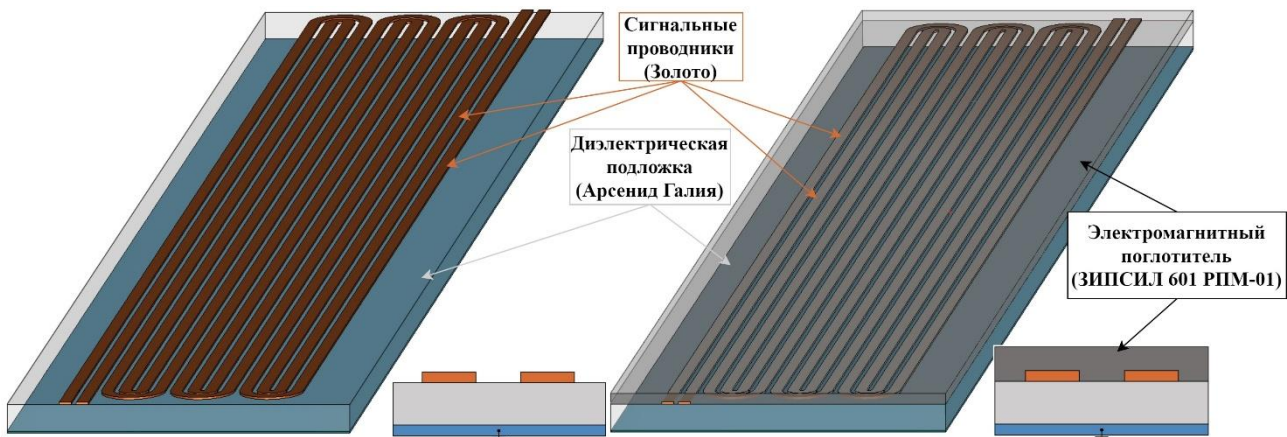


Рис. 2. 3-D вид исследуемой структуры без ЭП и с ним.

Так как в данной статье исследуется дифференциальный режим, для определения дифференциального сигнала требуется измерить напряжение относительно земли на каждом из двух проводников, а после полученных значений напряжения можно вычислить дифференциальное напряжение, воспользовавшись следующей формулой [17]:

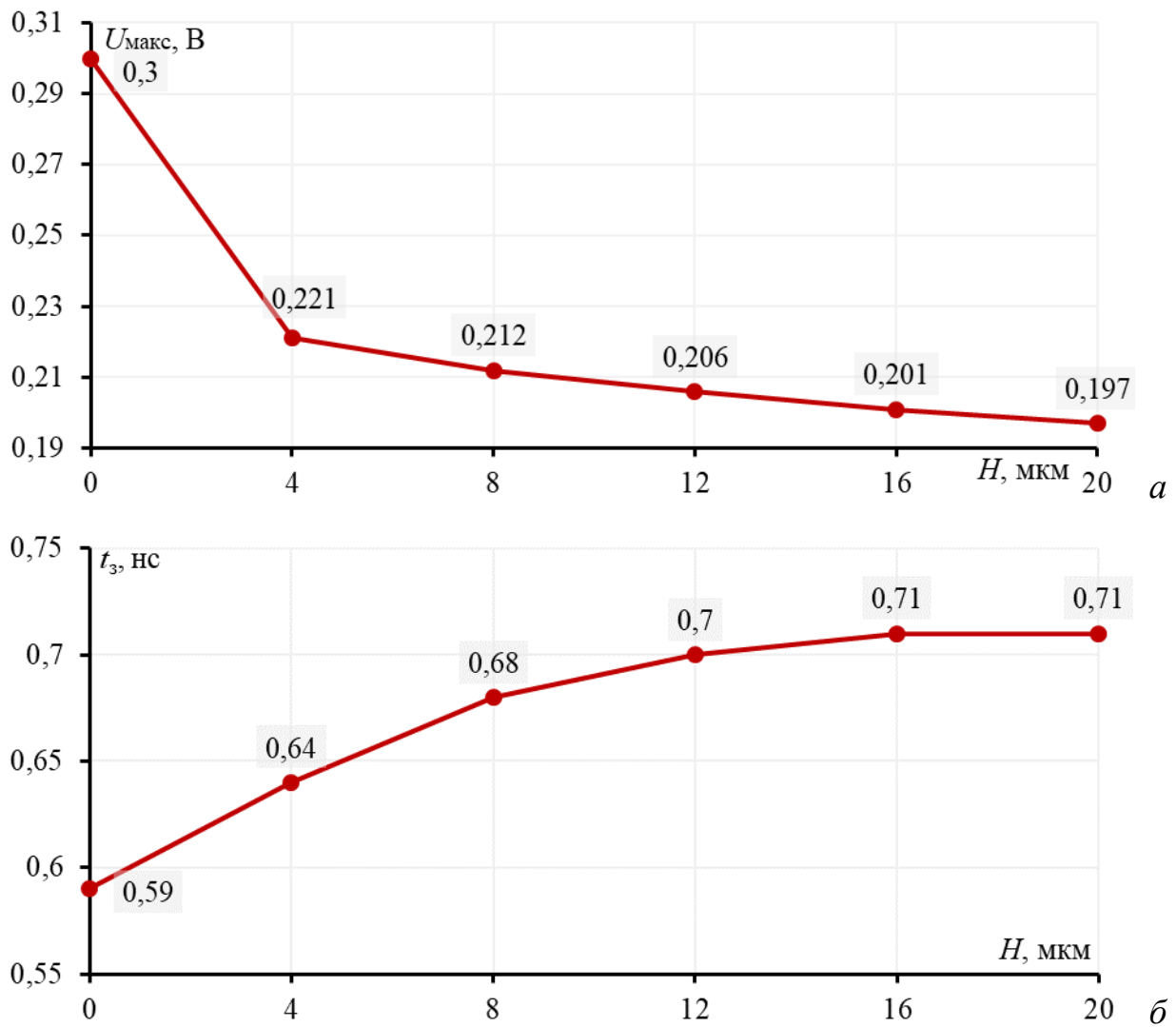
$$U_{\text{дифф}} = U_1 - U_2,$$

где U_1 – это напряжение на первом проводнике относительно земли (узел 2), а U_2 – напряжение на втором проводнике относительно земли (узел 4).

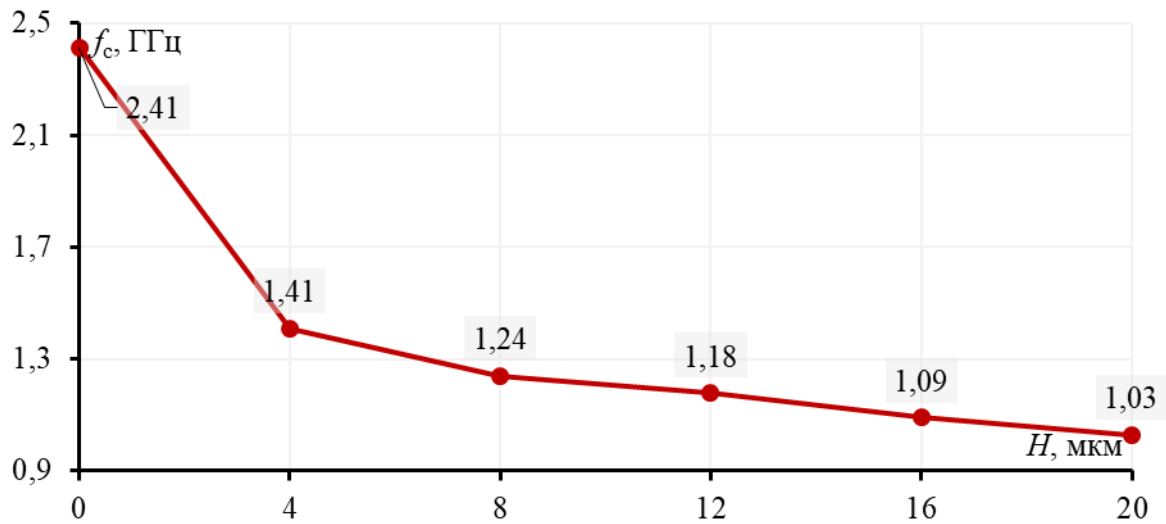
Для определения дифференциальных параметров, таких как коэффициент передачи ($|S_{dd21}|$) и отражения ($|S_{dd11}|$) использовались формулы, взятые из [18].

2. Поиск оптимальной толщины ЭП

В данном разделе представлены результаты исследования влияния толщины ЭП во временной и частотной областях (анализ был проведен в диапазоне от 0 до 20 ГГц). Получены зависимости значений времени прихода помехи (t_3), максимальной амплитуды напряжения помехи на выходе структуры ($U_{\text{макс}}$), частоты среза (f_c), отношения сигнал/шум (SNR), среднеквадратичного фазового отклонения (СФО), среднего группового времени запаздывания (ГВЗ) в полосе пропускания, а также среднее значение $|S_{dd21}|$ в полосе заграждения и максимальное значение $|S_{dd11}|$ в полосе пропускания от H . Значение t_3 определялось при 10 % от $U_{\text{макс}}$. На рис. 3 представлена зависимость $U_{\text{макс}}$ и t_3 от толщины ЭП.

Рис. 3. Зависимость U_{max} (a) и t_3 (б) от толщины ЭП.

При добавлении ЭП U_{max} уменьшается. Так, U_{max} составила 300 мВ, а при добавлении 4 мкм ЭП – 221 мВ, что на 79 мВ меньше. При увеличении толщины ЭП значение U_{max} продолжает уменьшаться. Увеличение толщины ЭП влияет на среду распространения ЭМП, что способствует увеличению t_3 . На рис. 4 представлена зависимость f_c от толщины ЭП.

Рис. 4. Зависимость f_c от толщины ЭП.

При добавлении ЭП f_c уменьшается. Так без ЭП она составила – 2,41 ГГц, а при увеличении на 4 мкм – 1,41 ГГц. Дальнейшее увеличение толщины ЭП незначительно уменьшает (до 8 %) f_c до толщины ЭП в 12 мкм, после достижения которой изменение f_c не превышает 5 %. На рис. 5 представлены зависимости максимального значения $|S_{dd11}|$ в полосе пропускания и среднего значения $|S_{dd21}|$ в полосе заграждения от толщины ЭП.

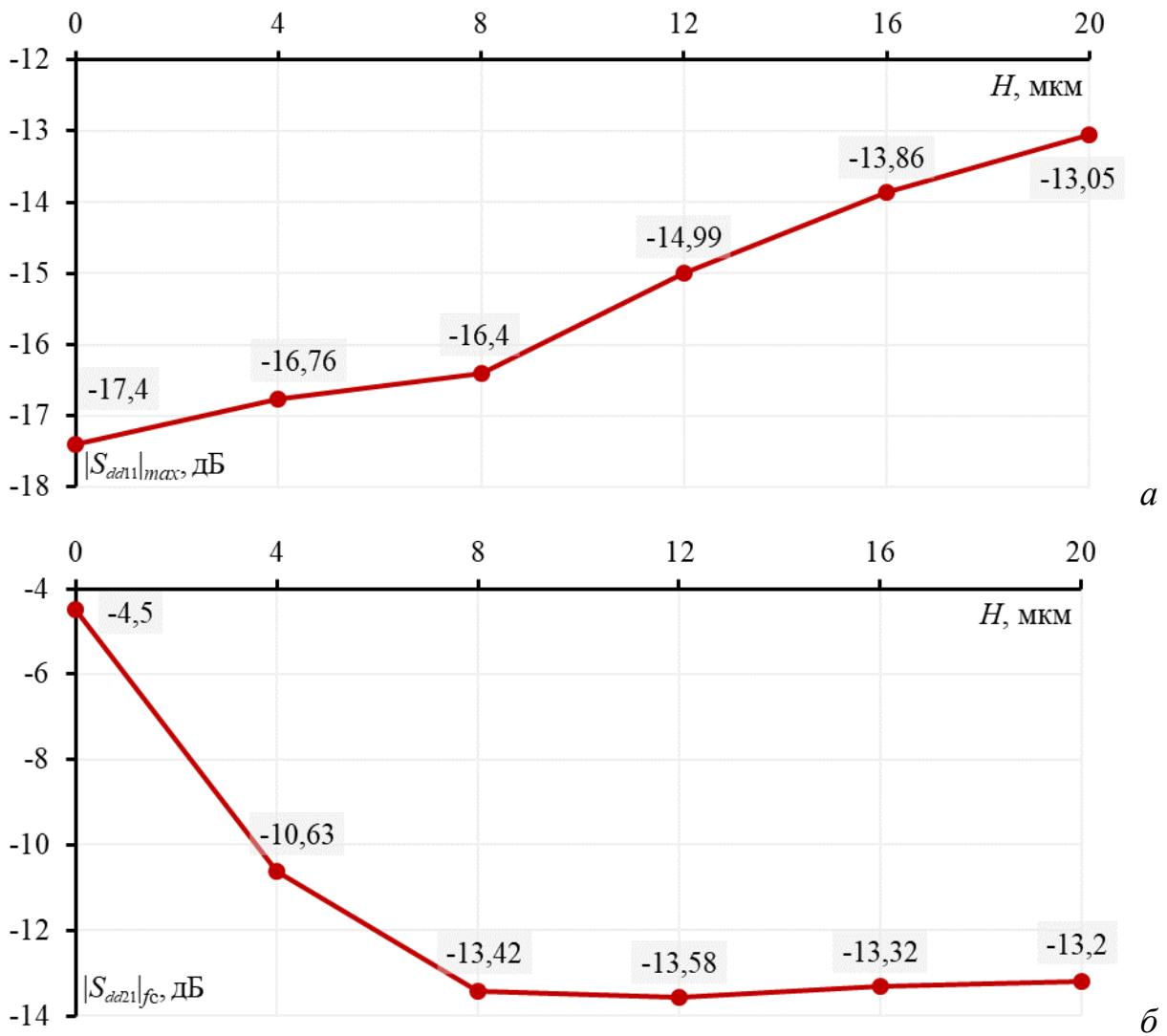


Рис. 5. Зависимость $|S_{dd11}|$ в полосе пропускания (а) и среднего значения $|S_{dd21}|$ в полосе заграждения (б) от толщины ЭП.

Значение $|S_{dd11}|$ при добавлении ЭП $H = 4$ мкм увеличилось и составило минус 16,76 дБ, а без ЭП – $|S_{dd11}|$ равен минус 17,4 дБ. При дальнейшем увеличении толщины ЭП, $|S_{dd11}|$ постепенно увеличивается, практически линейно. Значение $|S_{dd21}|$ в полосе заграждения уменьшается при добавлении ЭП, без ЭП составило минус 4,5 дБ, при увеличении ЭП на 4 мкм – минус 10,63 дБ, при 8 мкм – минус 13,42 дБ, а при дальнейшем увеличении толщины ЭП изменение значения не превышает 2 %. На рис. 6 представлены зависимости среднего значения ГВЗ в полосе пропускания, отношение сигнал/шум и СФО от толщины ЭП.

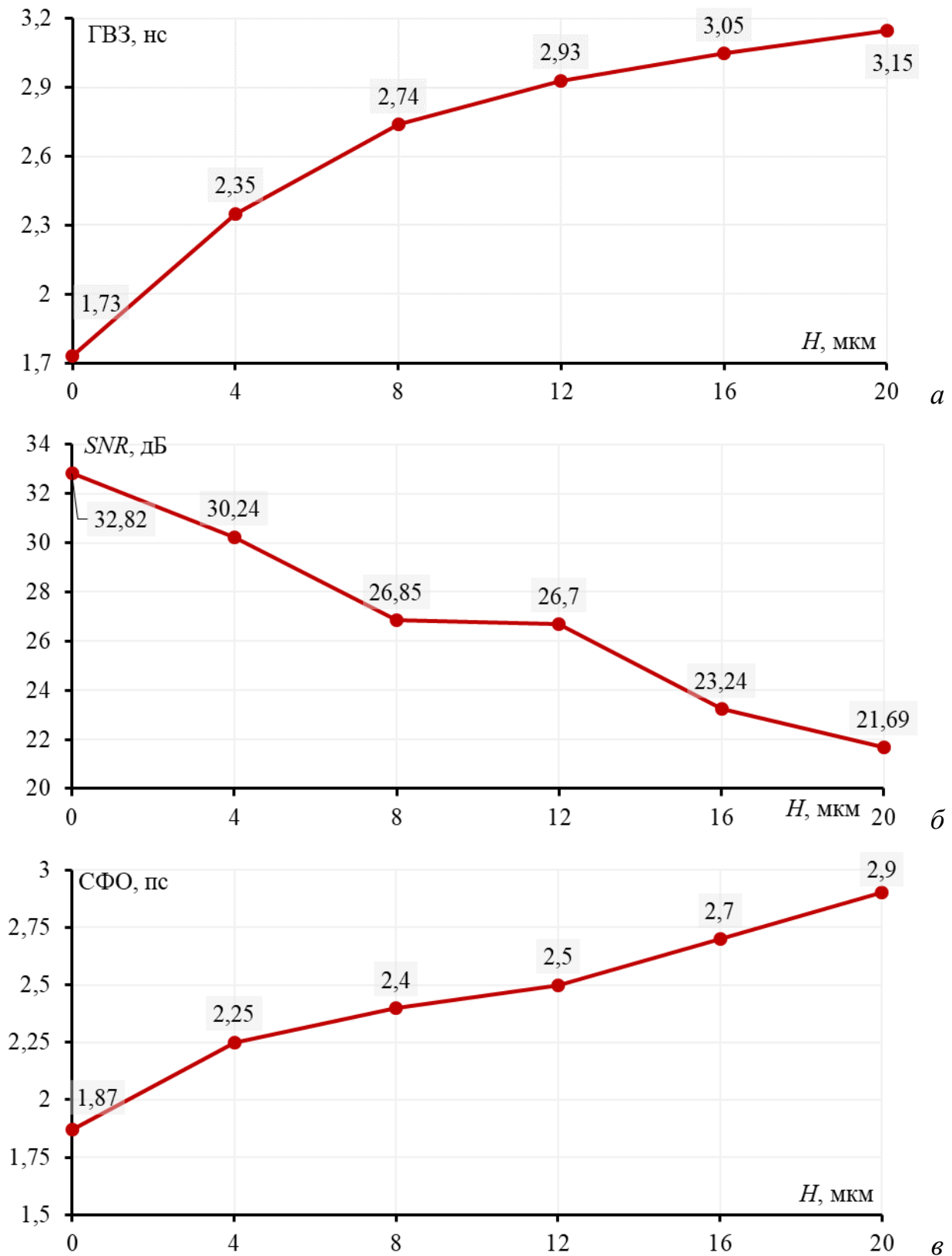


Рис. 6. Зависимость ГВЗ (а), отношение сигнал/шум (б) и СФО (в) от толщины ЭП.

Значение ГВЗ и СФО увеличиваются при добавлении ЭП, так ГВЗ без ЭП было 1,73 нс, при добавлении 4 мкм – 2,35 нс, а при дальнейшем увеличении толщины ЭП значение ГВЗ увеличивается менее значительно, до 7 %. Значение

СФО без ЭП составило 1,87 пс, при добавлении ЭП 4 мкм – 2,25 пс, а при 8 мкм – 2,4 пс. Значение SNR уменьшается, без ЭП составляет 32,82 дБ, а при добавлении уже 4 мкм – 30,24 дБ, дальнейшее увеличение толщины ЭП уменьшает значение SNR до 21,69 дБ при толщине 20 мкм.

3. Сравнение результатов

Из представленных выше зависимостей можно сделать вывод, что наиболее эффективной толщиной ЭП с точки зрения помехоподавляющих свойств является 8 мкм, так как после этого значения изменения характеристик несущественные. На рис. 7 представлены результаты моделирования во временной области для $H = 0$ и $H = 8$ мкм, а также для всех H .

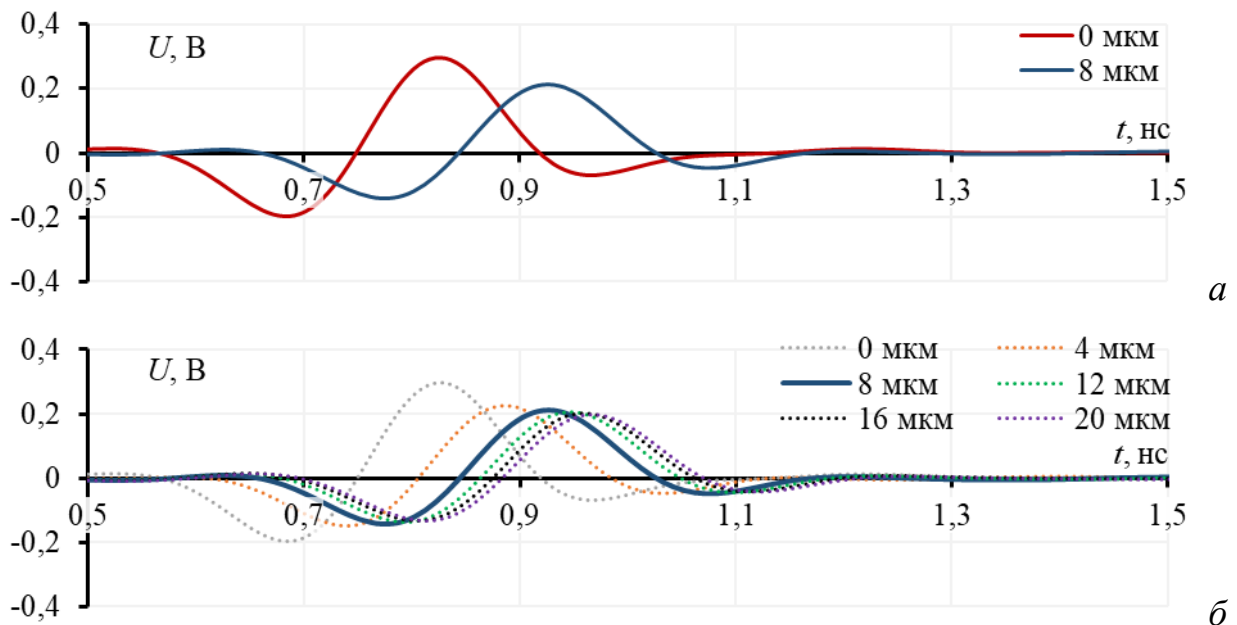


Рис. 7. График временного отклика для $H = 0$ мкм и $H = 8$ мкм (а) и всех H (б).

Из рис. 7 следует, что t_3 при $H = 8$ мкм увеличилось в 1,15 раза и составило 0,68 нс, когда при $H = 0$ – 0,59 нс. Значение $U_{\text{макс}}$ уменьшилось в 1,4 раза и составило 212 мВ. Дальнейшее увеличение толщины приведет к незначительному уменьшению амплитуды, не более 2 %, что доказывает, что толщина $H = 8$ мкм является оптимальной, с точки зрения подавления СШП. На рис. 8 представлены результаты моделирования исследуемой структуры в частотной области при $H = 0$ мкм и $H = 8$ мкм. Исследуемый частотный диапазон составил от 0 до 20 ГГц.

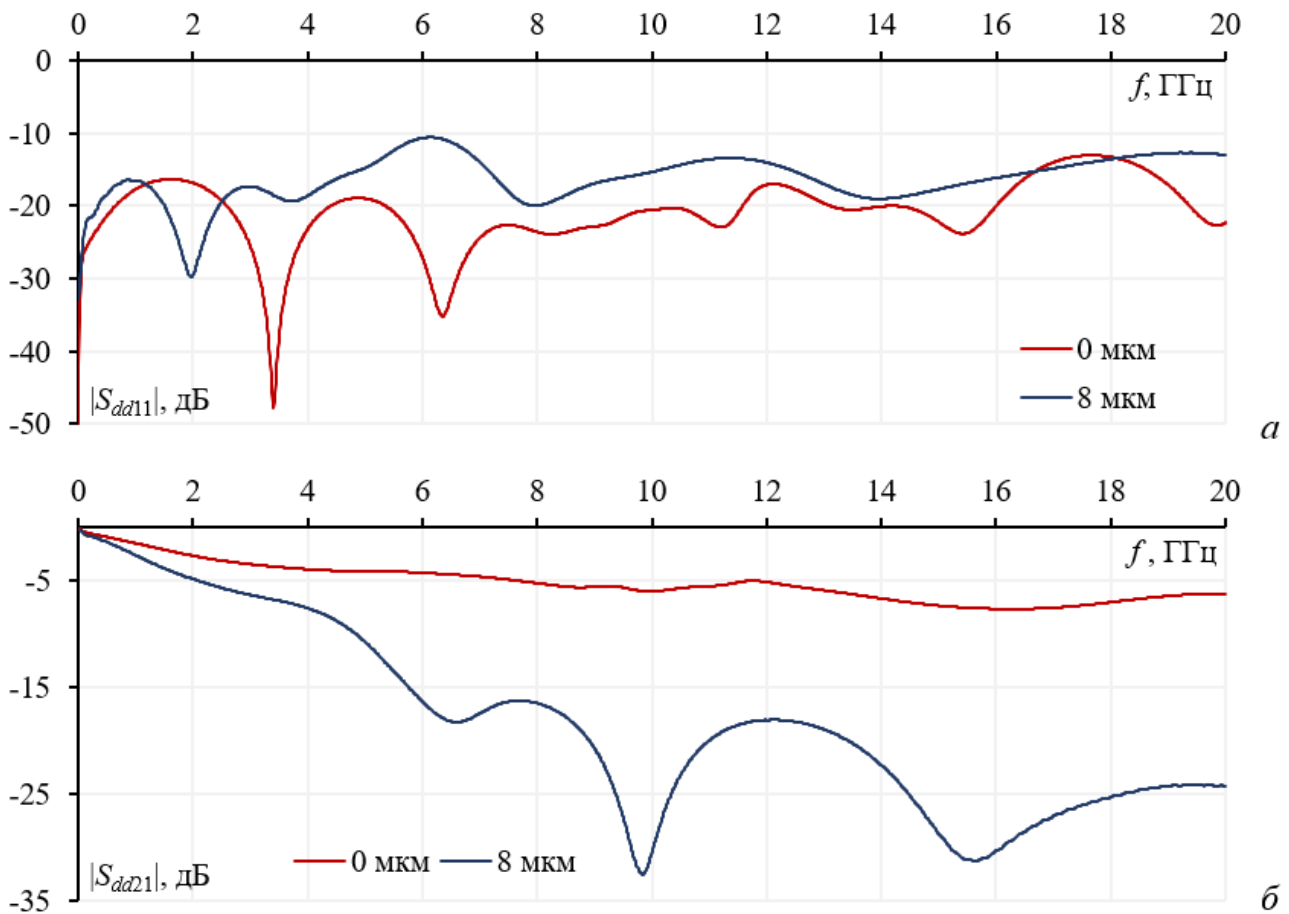


Рис. 8. Результаты моделирования $|S_{dd11}|$ (а) и $|S_{dd21}|$ (б) для $H = 0$ и 8 мкм.

Из графиков выше видно, что при использовании ЭП изменения значений $|S_{dd21}|$ в полосе пропускания незначительны, а в полосе заграждения значения уменьшаются более чем в 3 раза, что характеризуют о более эффективном подавление помех в этой области.

Далее проводится оценка целостности передаваемого полезного сигнала для исследуемой структуры без ЭП и с ним. Для анализа глазковых диаграмм была выбрана скорость передачи данных 1 Гбит/с. Скорость выбрана с учетом полосы пропускания для структуры без ЭП. Так основной спектр полезного сигнала со скоростью 1 Гбит/с лежит в полосе пропускания исследуемой структуры без ЭП. Для построения глазковых диаграмм подавалась псевдослучайная битовая последовательность размерностью 10000 бит. На рис. 9 представлены глазковые диаграммы для исследуемой структуры без ЭП и с ним ($H = 8$ мкм).

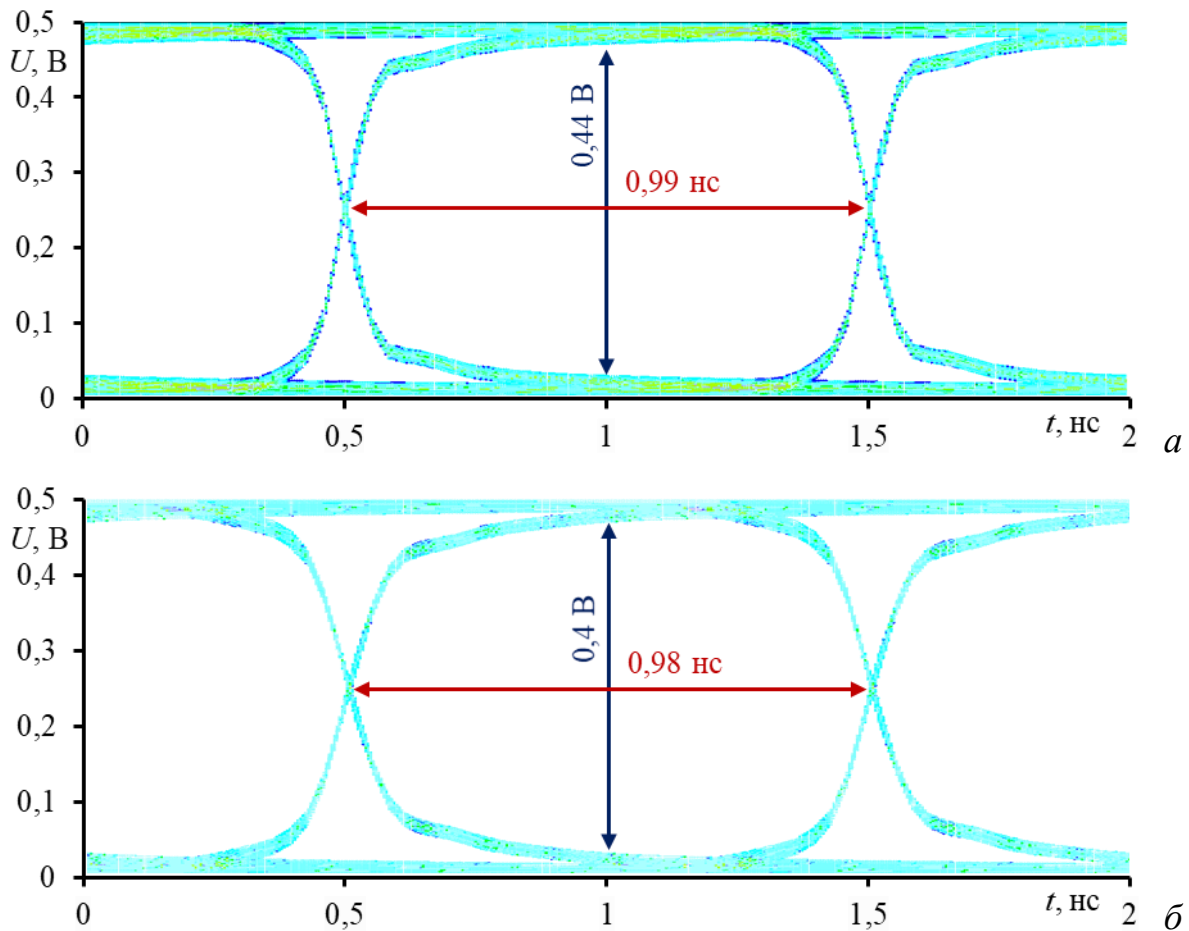


Рис. 9. Глазковая диаграмма для исследуемой структуры без ЭП (а) и с ним (б).

Добавление ЭП в исследуемую структуру привело к снижению высоты «глаза» глазковой диаграммы с 0,44 В до 0,4 В, что свидетельствует о возрастании затухания сигнала, при этом ширина «глаза» практически не изменилась и составила 0,99 нс без ЭП и 0,98 нс с ним, что указывает на незначительное влияние ЭП на временные характеристики полезного сигнала.

4. Валидация результатов

Для проверки и подтверждения полученных результатов было выполнено моделирование с использованием двух программных продуктов. На первом этапе применялась программа TUSUR.EMC [19], предназначенная для предварительного анализа на основе квазистатического моделирования. В дальнейшем для проведения более детального электродинамического моделирования использовался программный комплекс Comsol Multiphysics [20]. Сравнительные результаты моделируемой структуры с ЭП, полученные с

использованием этих двух программных продуктов, представлены на рис. 10. В качестве сравнения выбрана толщина ЭП $H = 12$ мкм.

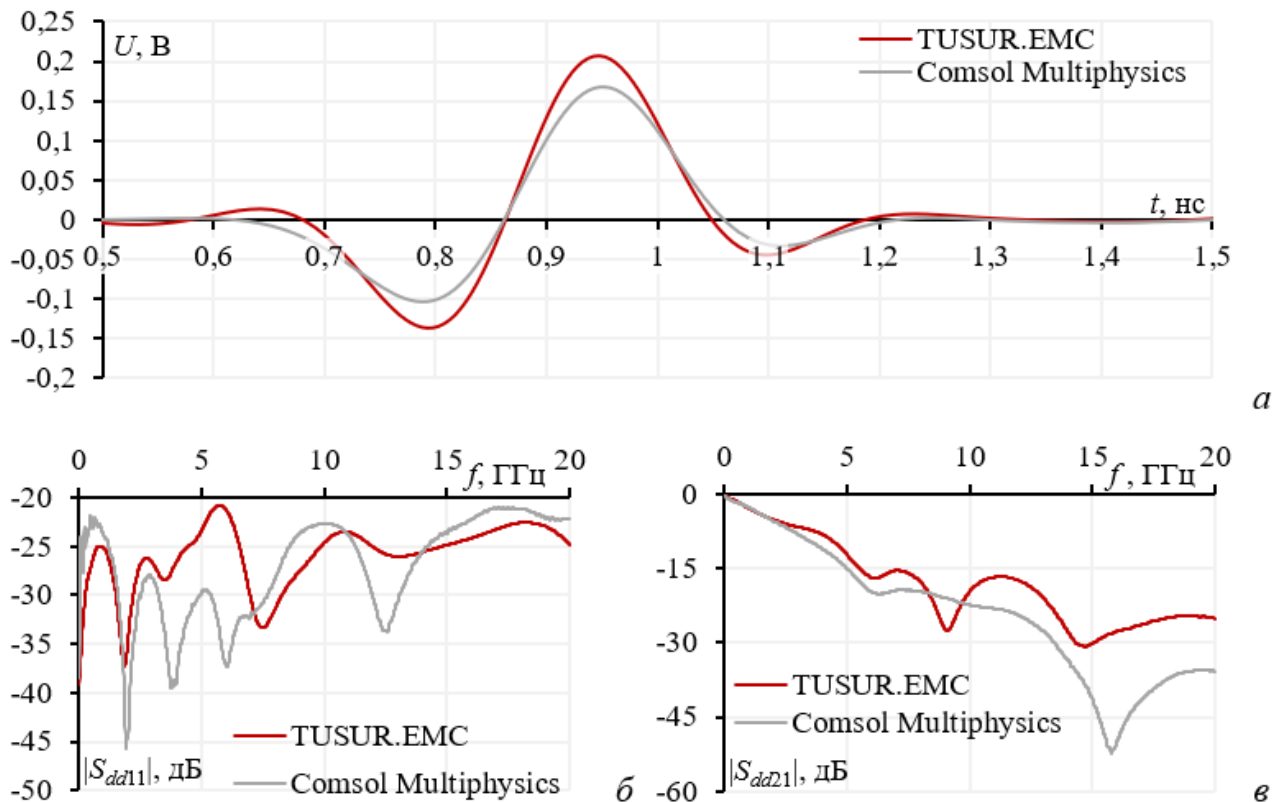


Рис. 10. Сравнение результатов моделирования во временной (а) и частотной (б, в) областях.

График временной области (рис. 10а) показывает схожесть кривых с незначительными расхождениями амплитуды напряжения помехи на пиках и в переходных процессах. В частотной области для параметра $|S_{dd11}|$ (рис. 10б) кривые практически совпадают до 4 ГГц, но начинают расходиться на более высоких частотах. Для параметра $|S_{dd21}|$ (рис. 10в) аналогично наблюдается совпадение в низкочастотной области до 5 ГГц и выраженные различия в диапазоне 10 – 20 ГГц. Эти расхождения могут быть связаны с методом моделирования и настройками сегментации в используемых программных продуктах.

Заключение

Проведенные исследования подтвердили эффективность применения ЭП для улучшения помехоподавляющих свойств ДПП в интегральном исполнении. Определено, что оптимальная толщина ЭП для исследуемой структуры составляет 8 мкм, так как дальнейшее ее увеличение не приводит к существенным улучшениям помехоподавляющих характеристик. При такой толщине ЭП амплитуда напряжения помехи уменьшилась в 1,4 раза (до 212 мВ), а время их прихода увеличилось в 1,15 раза (до 0,68 нс), но стоит учитывать, что добавление ЭП также уменьшает полосу пропускания. Таким образом применение ЭП позволило достичь дополнительного ослабления помехи, что положительно сказалось на обеспечении ЭМС. Результаты работы могут быть использованы для проектирования высокочастотных интегральных устройств с повышенной устойчивостью к ЭМП.

Следующим этапом исследования планируется проведение лабораторного эксперимента для валидации полученных результатов моделирования, а также исследование других материалов в качестве ЭП.

Финансирование: работа выполнена в рамках проекта FEWM-2024-0005 Минобрнауки России.

Литература

1. Бабунько С.А., Орлов О.С. Комплексная миниатюризация СВЧ-приборов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2010. – Т. 13. – №. 1. – С. 61-72.
2. Летавин Д.А. Миниатюризация микрополосковых СВЧ-устройств: магистерская диссертация: дис. – 2016.
3. Борейко Д., Хроленко Т., Яковлев А. Унифицированные полосовые LC-фильтры, выполненные по интегральной технологии // Современная электроника. – 2015. – №. 7. – С. 38-40.

4. Борейко Д.А., Князева А.Р. Интегральные катушки индуктивности с уменьшенной площадью // Техника радиосвязи. – 2021. – №. 1. – С. 86-94.
5. Lima D.A.C. et al. Review of Bus Differential Protection Using IEC 61850 // Energies. – 2022. – Т. 15. – №. 24. – С. 9537.
6. Zhou P. et al. A novel ultra-wideband common-mode suppression circuit based on multi-mode transmission line // 2018 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). – IEEE, 2018. – С. 1-3.
7. Костелецкий В.П., Заболоцкий А.М. Полосковая структура, защищающая от сверхкоротких импульсов в дифференциальном и синфазном режимах // Системы управления, связи и безопасности. – 2021. – №. 2. – С. 130-141.
8. Исайчева А.В. и др. Влияние побочных электромагнитных излучений и наводок на передаваемую информацию в цифровых видеоинтерфейсах dvi и hdmi // Концепции, инструменты и технологии развития современной науки и техники. – 2023. – С. 73-76.
9. Богодистова Е.С. Анализ физической и логической организации интерфейса USB // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии. – 2020. – С. 197-203.
10. Дугин Е. Применение межплатных соединителей Samtec QStrip серий QTH/QSH для высокоскоростной передачи данных в системах стандарта PCI Express 3-го поколения с пропускной способностью 8 ГТ/с // Компоненты и технологии. – 2015. – №. 9. – С. 126-130.
11. Егоров Д.В., Бобков В.Д. Исследование способов борьбы с электромагнитными помехами на печатных платах // Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации. – 2019. – С. 51-53.
12. Юрков Н.К., Андреев П.Г., Жумабаева А.С. Проблема обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». – 2015. – Т. 1. – С. 201-203.

13. Костелецкий В.П. Обзор гибридных фильтров для защиты радиоэлектронных средств от кондуктивных помех // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2022. – Т. 25. – №. 1. – С. 37-47.
14. Zhang M. et al. Electromagnetic absorber converting radiation for multifunction // Materials Science and Engineering: R: Reports. – 2021. – Т. 145. – С. 100627.
15. Трубоченинов В.А., Власов С.В., Жечев Е.С., Заболоцкий А.М. Методы компоновки электромагнитных поглотителей в структурах малогабаритных модальных фильтров // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 10. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.10.14>
16. Лист широкополосного поглотителя СВЧ-энергии ЗИПСИЛ 601 РПМ-01 (СВЧ-поглотитель). Официальный сайт компании «Зипсил»: <https://www.zipsil.ru/high-loss-microwave-absorber-silicone-sheets/> (дата обращения: 30.10.2024).
17. Кечиев Л. Печатные платы и узлы гигабитной электроники. – Litres, 2018.
18. Zhou Y., Chen Y. Properties of mixed-mode S-parameters // Microwave and Optical Technology Letters. – 2008. – Т. 50. – №. 11. – С. 2869-2874.
19. Куксенко С.П. и др. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2015. – №. 2 (36). – С. 45-50.
20. Zimmerman W.B.J. Introduction to COMSOL multiphysics // Multiphysics modeling with finite element methods. – 2006. – P. 1-26.

Для цитирования:

Трубоченинов В.А., Власов С.В., Жечев Е. Исследование влияния электромагнитного поглотителя на временные и частотные характеристики дифференциальной линии передачи // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – № 6. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.6.6>