

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.1.7>

УДК: 621.396.669

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОГЛОТИТЕЛЯ НА ВРЕМЕННЫЕ И ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ

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

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

Статья поступила в редакцию 10 октября 2024 г.

Аннотация. В сфере цифровой электроники имеют широкое применение устройства, работающие в дифференциальном режиме, например, интерфейсы LVDS, USB, HDMI и т.д. Однако кондуктивные помехи, такие как электромагнитные и электрические воздействия, могут ухудшать качество передачи данных и вызывать сбои в работе устройств. В работе представлен анализ влияния электромагнитного поглотителя (ЭП) на временные и частотные характеристики дифференциальной линии передачи. Исследуемая структура представляет собой двухпроводную микрополосковую линию передачи. Применение ЭП позволяет уменьшить распространение ЭМП, но уменьшает также полосу пропускания устройства. Так, ослабление сверхширокополосной помехи было 3,52 раза, а с ЭП 23,8 раза, а полоса пропускания уменьшилась с 3 ГГц до 0,5 ГГц.

Ключевые слова: сверхширокополосная помеха, микрополосковая линия передачи, электромагнитный поглотитель, дифференциальный режим.

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00486 <https://rscf.ru/project/23-29-00486/>.

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

Введение

Современное развитие радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) требует повышения плотности размещения компонентов и увеличения скорости передачи данных [1]. Это приводит к усилению требований к обеспечению электромагнитной совместимости и защите от электромагнитных помех (ЭМП), особенно в системах, использующих высокоскоростные дифференциальные линии передачи (ЛП) [2,3]. Дифференциальный режим работы, применяемый в интерфейсах LVDS, USB, HDMI и других современных цифровых системах [4-6] позволяет передавать данные с высокой скоростью, обеспечивая минимальный уровень электромагнитных помех используемых ЛП. Однако, по мере роста плотности трассировки и сложности схем, дифференциальные ЛП становятся все более уязвимыми к сверхширокополосным (СШП) помехам.

Традиционные методы подавления ЭМП включают использование экранирования и фильтрации [7, 8], однако в условиях повышенных требований к скорости передачи данных и плотности компоновки такие решения могут быть недостаточными. Улучшить помехозащищенность дифференциальных ЛП позволяет электромагнитных поглотителей (ЭП). Он снижает воздействие ЭМП на сигнал, не оказывая существенного влияния на структуру схемы и ее электрические параметры [9,10].

Цель работы – оценить влияние ЭП на временные и частотные характеристики дифференциальной ЛП. Задачи исследования:

- проектирование и моделирование исследуемой структуры;
- анализ частотных и временных характеристик;
- анализ целостности полезного сигнала;
- описание преимуществ и недостатков применения ЭП в дифференциальных ЛП.

1 Описание подходов и методов исследования

В качестве исследуемой структуры выбрана связанная микрополосковая ЛП со следующими параметрами (мкм): ширина проводников $w = 170$, толщина проводников $t = 18$, расстояние между проводниками $s = 350$, расстояние от края подложки до проводников $d = 3 \cdot w$, толщина подложки $H_1 = 100$, толщина ЭП $H = 400$, длина линии $l = 200 \cdot 10^3$, относительная диэлектрическая проницаемость подложки $\epsilon_r = 4,5$, тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta_\epsilon = 0,025$, относительная магнитная проницаемость $\mu_r = 1$. В качестве ЭП использован листовой поглотитель ЗИПСИЛ 601 РПМ-01 с $\epsilon_{r1} = 20$, $\mu_{r1} = 3$ и $\text{tg}\delta_{\epsilon1} = 0,1$. Материал ЗИПСИЛ 601 РПМ-01 [11] представляет собой широкополосный листовой ЭП, который обладает высокими показателями эффективности в подавлении СВЧ электромагнитных волн. Он изготовлен из композитного материала, содержащего магнитные и диэлектрические наполнители, что позволяет эффективно поглощать электромагнитные волны в широком частотном диапазоне. Благодаря своей структуре и свойствам, ЗИПСИЛ 601 РПМ-01 может использоваться для повышения уровня ЭМС в устройствах, работающих в СВЧ-диапазоне, минимизации отражений. На рис. 1 представлены поперечные сечения исследуемой структуры без ЭП и с ним, а также ее эквивалентная схема включения.

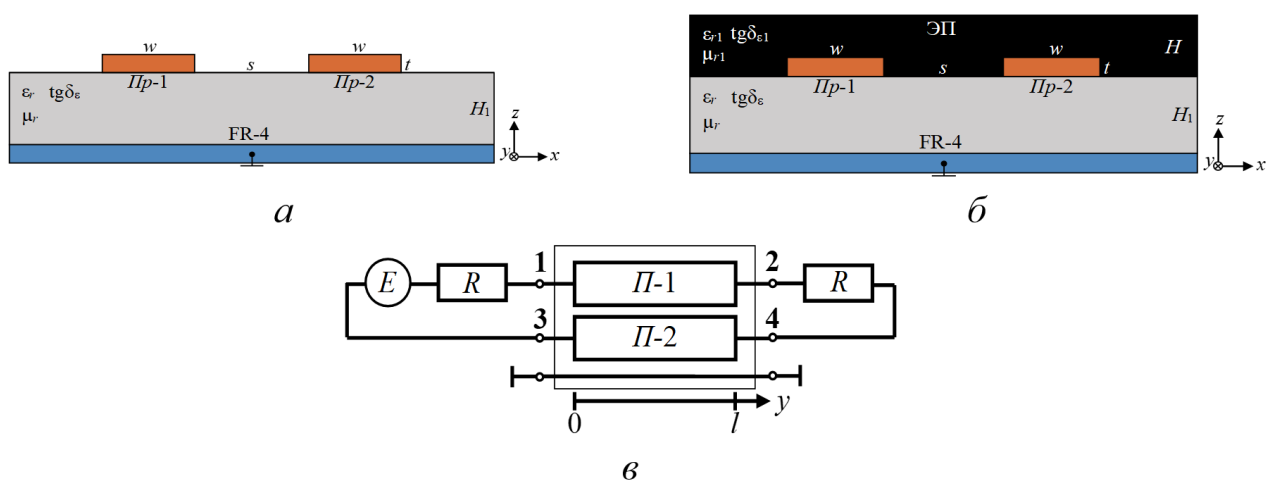


Рис. 1. Поперечное сечение исследуемой структуры без ЭП (а) и с ним (б), а также ее эквивалентная схема включения (в).

Поскольку в работе рассматривается дифференциальная помеха, для ее определения требуется измерить напряжение на каждом из двух проводников относительно земли. После получения этих значений напряжения можно вычислить дифференциальное напряжение, воспользовавшись следующей формулой [12]:

$$U_{\text{дифф}} = U_1 - U_2,$$

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

2 Анализ во временной области

В качестве помехового воздействия использован импульс малой длительности, который соответствует определению СШП помехи из стандарта МЭК [13]. Такой импульс имеет ширину спектра от 0,1 до 6 ГГц. Форма импульса и его спектральная плотность напряжения представлены на рис. 2.

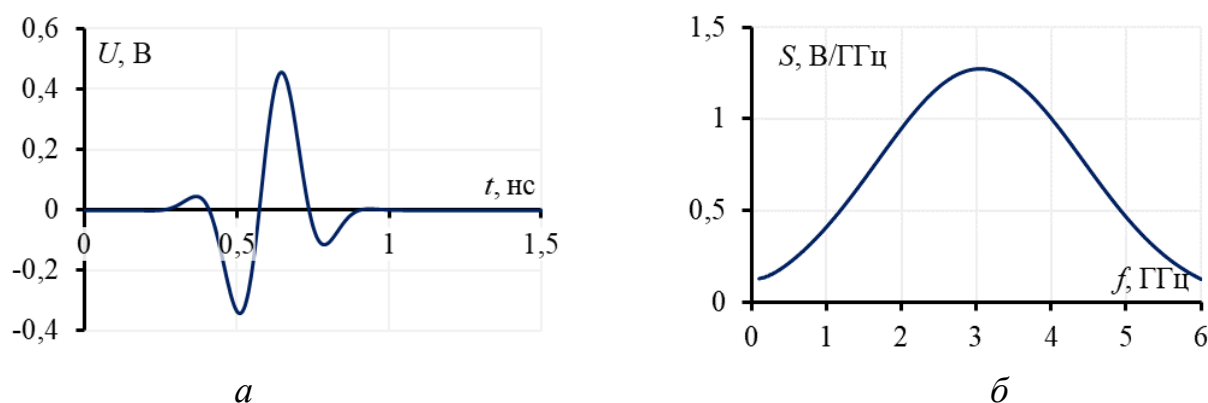


Рис. 2. Форма входного воздействия (а) и его спектральная плотность напряжения (б).

На вход (узлы 1 и 3) устройства в дифференциальном режиме подавалась СШП помеха. Временной отклик на СШП помеху представлен на рис. 3. Значение резисторов принято равным по 100 Ом.

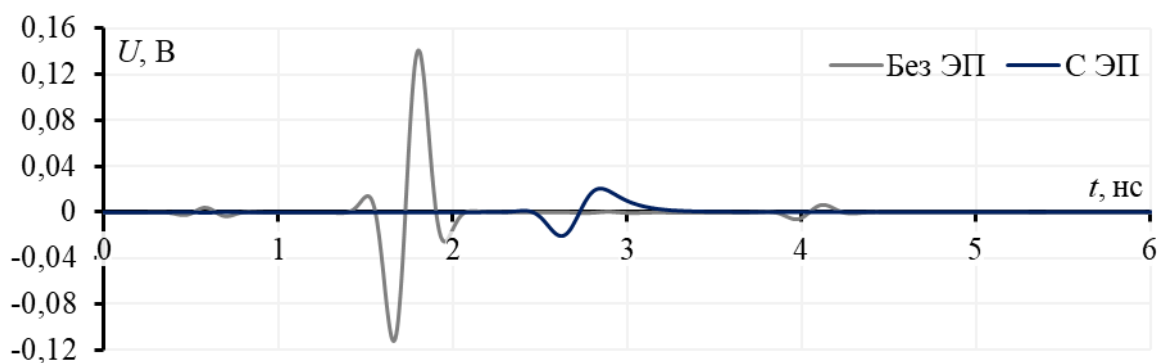


Рис. 3. Результаты моделирования дифференциальной ЛПП во временной области без ЭП и с ним.

Анализ временных характеристик показал уменьшение амплитуды помехи на выходе ЛПП при добавлении ЭП. А также возникновение задержки помехи. Амплитуда изменилась с 0,142 В до 0,021 В, а задержка сигнала возросла с 1,4 нс до 2,5 нс. Для анализа воздействия СШП помех на РЭА применялись N -нормы. В табл. 1 представлены исследуемые нормы и их характеристики, описанные в работе [14]. Эти нормы позволяют оценить вероятность возникновения электрического пробоя, повреждения электронных компонентов и других подобных эффектов. Метод расчета N -норм основан на использовании математических операторов, применяемых ко всей временной форме временных откликов.

Таблица 1. N -нормы и их характеристики.

№	Формула	Название	Применение
N_1	$N_1 = U(t) _{max}$	Пиковое (абсолютное) значение	Сбой схемы / электрический пробой / дуговые эффекты
N_2	$N_2 = \left \frac{\delta U(t)}{\delta t} \right $	Пиковая (абсолютная) производная	Искрение компонента / сбой схемы
N_3	$N_3 = \left \int_0^t U(t) \right _{max}$	Пиковый (абсолютный) импульс	Диэлектрический пробой
N_4	$N_4 = \int_0^\infty U(t) dt$	Выпрямленный общий импульс	Повреждение оборудования
N_5	$N_5 = \left\{ \int_0^\infty R(t) ^2 dt \right\}^{\frac{1}{2}}$	Квадратный корень интеграла действия	Выгорание компонента

В табл. 2 представлены нормы, рассчитанные на входе (узлы 1 и 3) и выходе (узлы 2 и 4) исследуемой структуры.

Таблица 2. Значения N -норм для дифференциальной ЛП без ЭП и с ним.

Без ЭП					
	N_1	$N_2 \cdot 10^9$	$N_3 \cdot 10^{-12}$	$N_4 \cdot 10^{-11}$	$N_5 \cdot 10^6$
Вход	0,298	6,13	3,86	6,82	3,32
Выход	0,142	2,87	3,55	3,3	1,63
С ЭП					
Вход	0,258	5,32	4,01	5,37	2,87
Выход	0,021	0,31	3,31	0,97	0,36

Проведенный анализ показал, что при добавлении ЭП улучшаются помехоподавляющие свойства. Применение ЭП в дифференциальной ЛП снижает амплитуду выходного сигнала и увеличивает его задержку, что способствует повышению устойчивости к ЭМП.

3 Анализ в частотной области

Для исследования ЛП в частотной области выполнен анализ: коэффициентов передачи от входа к выходу ($|S_{21}|$), отражения от входа ($|S_{11}|$) и выхода ($|S_{22}|$). На рис. 4 представлены графики частотной зависимости $|S_{11}|$ и $|S_{21}|$ для исследуемой структуры с ЭП и без. Так как структура имеет симметрию по входу и выходу, то график частотных зависимостей $|S_{11}|$ и $|S_{22}|$ одинаковый.

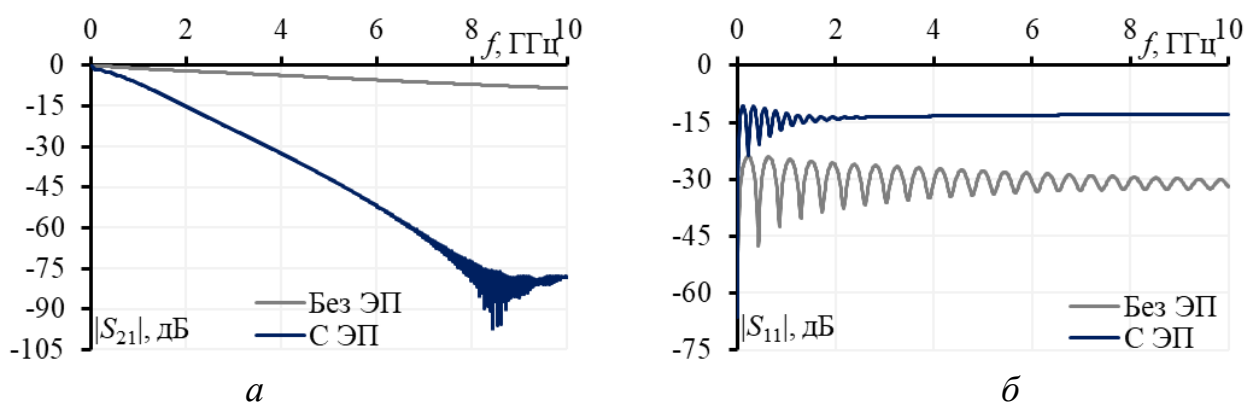


Рис. 4. Частотные зависимости $|S_{11}|$ (а) и $|S_{21}|$ (б) для исследуемой структуры без ЭП и с ним.

Из рис. 4 видно, что при добавлении ЭП значения $|S_{11}|$ уменьшаются примерно на 15 дБ, а амплитуда колебания становится меньше. Полоса пропускания по уровню минус 3 дБ для исследуемой структуры без ЭП составила 3,1 ГГц, а с ЭП – 470 МГц, а значения в полосе заграждения стали меньше, что говорит о более лучшем помехоподавлении в этом диапазоне частот.

4 Анализ целостности полезного сигнала

Для исследования целостности полезного сигнала выполнен анализ: группового времени запаздывания (ГВЗ), фазы S_{21} и глазковых диаграмм. На рис. 5 представлены фаза S_{21} и ГВЗ.

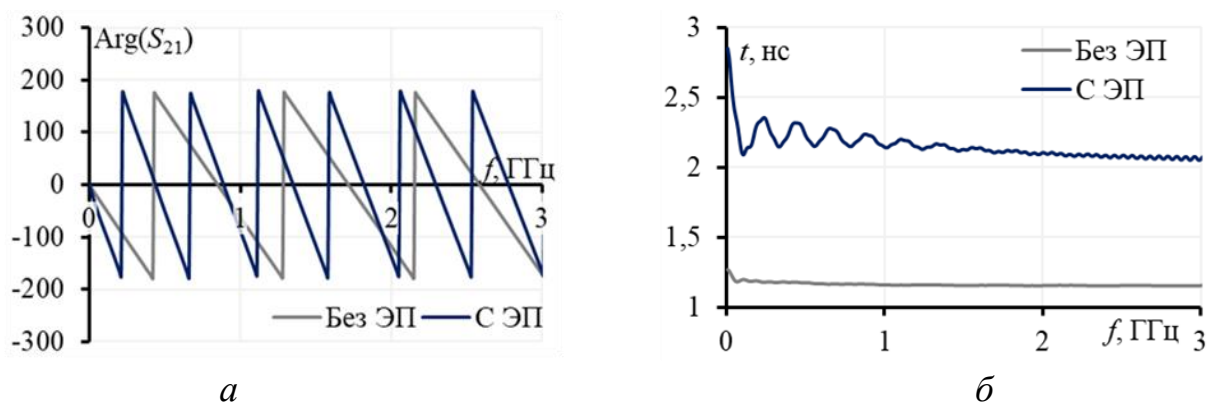


Рис. 5. Фаза S_{21} (а) и ГВЗ (б) исследуемой структуры без ЭП и с ним.

Фаза S_{21} отражает изменения в фазе сигнала при его прохождении через ЛП, ГВЗ позволяет оценить временные различия между разными частотными составляющими сигнала. При построении глазковых диаграмм на вход исследуемой структуры подавалась псевдослучайная битовая последовательность размерностью 10000 бит. Исходя из полосы пропускания анализируемой структуры без применения ЭП, так и с ним в работе использованы две скорости передачи данных: 3 Гбит/с и 500 Мбит/с. Основная часть спектра сигнала с битовой скоростью 3 Гбит/с охватывает частотный диапазон от 0 до 3 ГГц, а для скорости 500 Мбит/с – от 0 до 500 МГц. На рис. 6 представлены глазковые диаграммы для двух скоростей передачи данных для исследуемой структуры без ЭП и с ним.

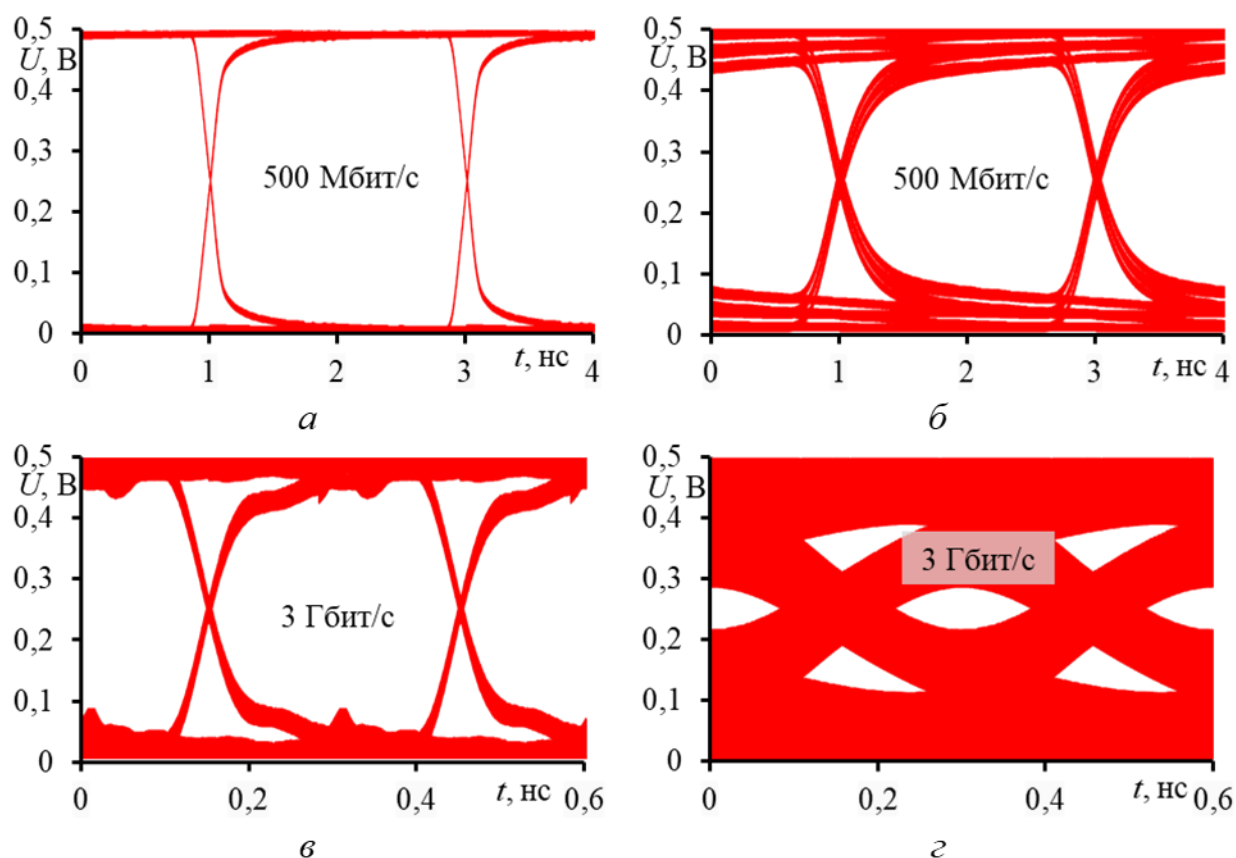


Рис. 6. Глазковые диаграммы для исследуемой структуры без ЭП (а, в) и с ЭП (б, г).

В табл. 3 представлены основные параметры глазковых диаграмм.

Таблица 3. Основные параметры глазковых диаграмм.

Скорость	Отношения сигнал/шум		Среднеквадратичное фазовое отклонение, 10^{-12} (нс)		Пиковое фазовое отклонение, 10^{-12} (нс)		Высота открытия «глаза», (В)	
	С ЭП	Без ЭП	С ЭП	Без ЭП	С ЭП	Без ЭП	С ЭП	Без ЭП
500 Мбит/с	10,5	88,2	16,62	4,93	50	1	0,35	0,48
3 Гбит/с	2,92	12,4	24,9	1,54	90	5	0,11	0,37

Из таблицы видно, что при добавлении ЭП к исследуемой структуре ухудшается целостность полезного сигнала. Отношение сигнал/шум снизилось более чем в 4 раза, также, как и высота открытия «глаза», а среднеквадратичное и пиковое фазовые отклонения возросли более чем в 3 раза. При проектировании дифференциальных ЛП с ЭП нужно обращать внимание на то, что при добавлении ЭП полоса пропускания уменьшается, но увеличивается помехоподавляющие свойства.

Заключение

В данной работе проведено исследование влияния ЭП на временные и частотные характеристики дифференциальной ЛП. Выполнен анализ во временной и частотной областях, а также оценка целостности полезного сигнала. Временной анализ с использованием СШП помехи показал, что при добавлении ЭП уровень помех снижается более чем в 23,8 раза. Частотный анализ выявил уменьшение значения $|S_{21}|$ и увеличение $|S_{11}|$ при использовании ЭП. Оценка целостности сигнала продемонстрировала снижение максимальной скорости передачи данных при использовании ЭП.

Результаты показывают, что проектирования дифференциальные ЛП с ЭП можно, но нужно учитывать влияние ЭП на полосу пропускания для исследуемой структуры.

Перспективы дальнейших исследований включают проведение лабораторных экспериментов и изучение влияния различных типов ЭП на характеристики дифференциальных ЛП.

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00486, <https://rscf.ru/project/23-29-00486/>.

Литература

1. Третьяков С.Д. Современные технологии производства радиоэлектронной аппаратуры //Учебное пособие – СПб: Университет ИТМО. – 2016.
2. Газизов Т.Р. Электромагнитная совместимость и безопасность радиоэлектронной аппаратуры. Томск: ТМЛ-Пресс, 2007.
3. Суанов Т.А. Моделирование высокоскоростных линий передачи в многослойных печатных платах //Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2013. – №. 11 (148). – С. 186-194.
4. Медведев А.М., Можаров В.А. Плотность межсоединений электронных компонентов //Печатный монтаж (приложение к журналу «Электроника. НТБ»). – 2011. – №. 3. – С. 140-145.

5. Самарин А. Новый цифровой дисплейный интерфейс-эволюция или революция? //Компоненты и технологии. – 2006. – №. 58. – С. 14-23.
6. Демьяненко А.В., Топалов Ф.С., Ильин И.В. USB радиомодем //Инженерный вестник Дона. – 2015. – Т. 33. – №. 1-1. – С. 45.
7. Кечиев Л.Э. Экранирование радиоэлектронной аппаратуры. Инженерное пособие. М.: Грифон, 2017. 720 с.
8. Идиатуллов З.Р. Конструирование электронных устройств телекоммуникационных систем с учетом обеспечения электромагнитной совместимости // II Научный форум телекоммуникации: теория и технологии ТТТ-2017. Проблемы техники и технологий телекоммуникаций ПТиТТ-2017: материалы XVIII Международной научно-технической конференции, Казань, 20–24 ноября 2017 года. Том 2. – Казань: Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева, 2017. С. 265–266.
9. Zhechev Y.S., Adnan A.H., Malygin K.P. New technique for improving modal filter performance by using an electromagnetic absorber //IEEE Access. – 2022. – Т. 10. – С. 86663-86670.
10. Трубченинов В.А. Применение радиопоглощающего материала в четырехслойной зеркально-симметричной структуре с модальным резервированием / В.А. Трубченинов, Е.С. Жечев // Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. – 2022. – № 1-1. – С. 324-326.
11. Официальный сайт компании «Зипсил» [Электрон. ресурс]. (<https://www.zipsil.ru/high-loss-microwave-absorber-silicone-sheets/?ysclid=m1f1f5hm8p863136803>) (дата обращения: 30.09.2024).
12. Кечиев Л.Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры. – 2007.
13. Electromagnetic Compatibility (EMC). Part 1–5: High Power Electromagnetic (НРЕМ) Effects on Civil Systems, IEC. 61000 1 5, Ed: IEC, 2004.

14. Baum C.E. Norms of time-domain functions and convolution operators //Recent Advances in Electromagnetic Theory. – New York, NY: Springer New York, 1990. – С. 31-55.

Для цитирования:

Трубченинов В.А., Власов С.В., Жечев Е.С. Исследование влияния электромагнитного поглотителя на временные и частотные характеристики дифференциальной линии передачи. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №. 1. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.1.7>