

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.5.10>

УДК: 621.396.669

АНАЛИЗ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ И ЦЕЛОСТНОСТИ СИГНАЛА ДЛЯ ДВУХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ С ФНЧ НЕОТРАЖАЮЩЕГО ТИПА

С.В. Власов, Е.С. Жечев

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

Статья поступила в редакцию 27 декабря 2024 г.

Аннотация. Быстрое развитие цифровых технологий и уменьшение размеров устройств усиливают проблему электромагнитной совместимости (ЭМС) в условиях высоких частот и плотного размещения компонентов. Дифференциальные линии передачи (ДЛП) требуют эффективных решений для подавления электромагнитных помех без ущерба для целостности полезного сигнала. В данной работе проанализировано влияние ФНЧ поглощающего типа на помехоустойчивость и характеристики сигнала в микрополосковых ДЛП. Структура ДЛП была спроектирована с учетом согласования на 100 Ом в дифференциальном режиме и проведено моделирование во временной и частотной областях. Добавление ФНЧ позволило увеличить ослабление сверхширокополосных и узкополосных помех в 6,69 и 7,41 раз, соответственно, сохраняя полосу пропускания. Коэффициент отражения от выхода уменьшился в полосе заграждения, а глазковые диаграммы показали минимальное влияние ФНЧ на целостность полезного сигнала. Результаты подтверждают эффективность предложенного метода в повышении ЭМС ДЛП, что делает его перспективным для применения в высокоскоростных интерфейсах.

Ключевые слова: дифференциальная режим, кондуктивные электромагнитные помехи, электромагнитная совместимость, фильтр нижних частот, взаимовлияние.

Финансирование: исследование выполнено за счет проекта «Методология автоматизированного проектирования радиоэлектронной аппаратуры, функционирующей в условиях деструктивных воздействий», госзадание FEWM-2024-0005.

Автор для переписки: Власов Сергей Владиславович, sergei.v.vlasov@tusur.ru

Введение

Быстрое развитие высокоскоростных цифровых технологий и уменьшение размеров современных электронных устройств вызывают обострение проблемы электромагнитной совместимости (ЭМС) [1,2]. Это связано с тем, что высокая плотность размещения компонентов и уменьшение физических размеров элементов схемы приводят к росту уровня электромагнитных помех (ЭМП) и увеличению чувствительности линий передачи к внешним воздействиям. Особую опасность представляют кондуктивные ЭМП, которые могут приводить к значительным искажениям сигналов и сбоям в работе дифференциальных линий передачи (ДЛП) – ключевых элементов современных высокоскоростных интерфейсов, таких как USB, HDMI, LVDS и прочих [3-6]. Подобные сбои особенно критичны для приложений, где требуется высокая надежность и устойчивость передачи данных.

Традиционные методы борьбы с ЭМП, включая экранирование и фильтрацию [7,8], часто демонстрируют недостаточную эффективность, особенно в условиях работы на высоких частотах. При этом ограничения на размер и площадь печатной платы еще больше усложняют реализацию этих методов, что делает поиск новых решений особенно актуальным. В связи с этим возникает необходимость в разработке новых решений, которые бы обеспечивали высокую помехоустойчивость и целостность сигнала в условиях плотного размещения компонентов и ограниченного пространства. Одним из таких подходов является использование определенной трассировки

и интеграции фильтра низких частот (ФНЧ) неотражающего типа. Применение такого фильтра позволяет значительно снизить уровень ЭМП, передающихся по ДПП, без ухудшения характеристик передачи сигнала. Цель работы – провести анализ помехоустойчивости и целостности полезного сигнала для двух ДПП с применением ФНЧ поглощающего типа

1. Описание подходов и методов исследования

В качестве базовой конструкции для проектирования ДПП выбрана микрополосковая линия передачи, описанная в [9], так как она наиболее проста в реализации. На рисунке 1 показаны поперечное сечение и трёхмерный вид анализируемой структуры.

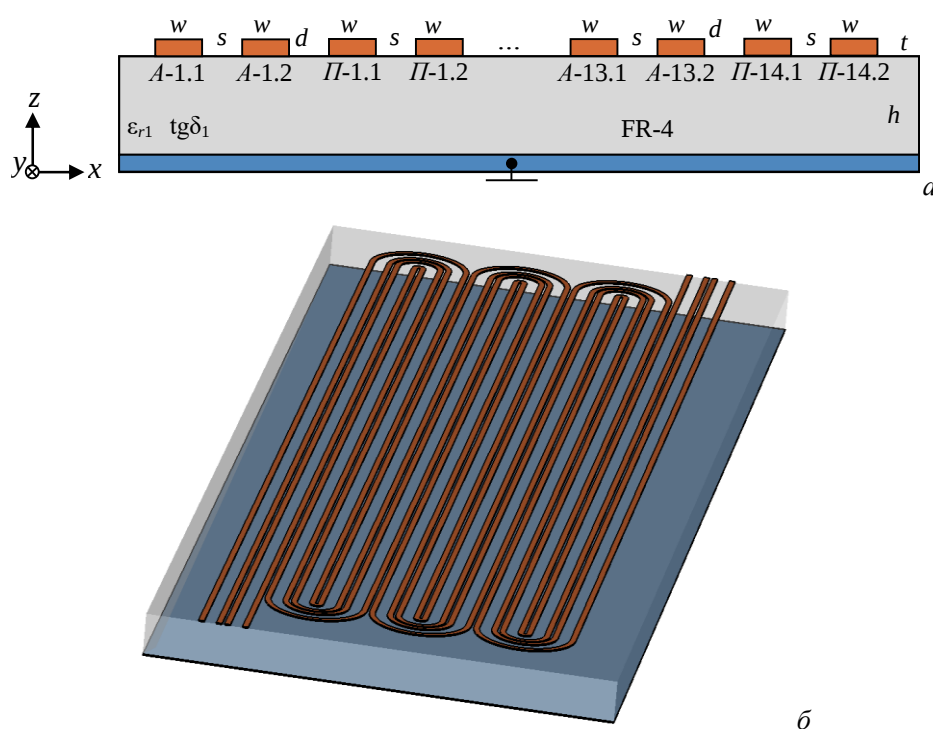


Рис. 1. Поперечное сечение (а) и 3-D вид (б) исследуемой структуры.

Структура спроектирована в ПО Taltat [10], рассчитанная на сопротивление согласование 100 Ом в дифференциальном режиме включения проводников. Геометрические параметры структуры: общая длина дифференциальных пар $l = 200$ мм, ширина проводников $w = 170$ мкм, расстояние между проводниками $s = 350$ мкм, расстояние между витками $d = 70$ мкм, толщина

подложки $h = 100$ мкм, толщина проводников $t = 35$ мкм. Относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь подложки $\epsilon_r = 4,5$ и $\text{tg}\delta = 0,025$ [9]. При проектировании печатной платы, сигнальные проводники располагают близко друг к другу, чтобы увеличить электромагнитную связь между проводниками в дифференциальном режиме. А разные ДЛП располагают далеко друг от друга для того, чтобы уменьшить влияние одной ДЛП на другую, то есть уменьшить перекрёстные помехи одной ДЛП на другую. Также, если две дорожки, образующие ДЛП, расположены близко друг к другу, то между ними существует определенная перекрестная связь. В данной работе этот принцип используется для подавления кондуктивных ЭМП. Путем оптимального выбора расстояния между проводниками и правильной конфигурации трассировки удастся повысить устойчивость дифференциальных линий к внешним воздействиям. Это решение не только улучшает ЭМС, но и сохраняет высокую целостность сигнала, что особенно важно для современных цифровых систем с жесткими требованиями к качеству передачи данных. Для улучшения помехоподавляющих свойств был добавлен ФНЧ неотражающего типа. На рис. 2 представлено эквивалентная схема включения двух ДЛП с ФНЧ неотражающего типа.

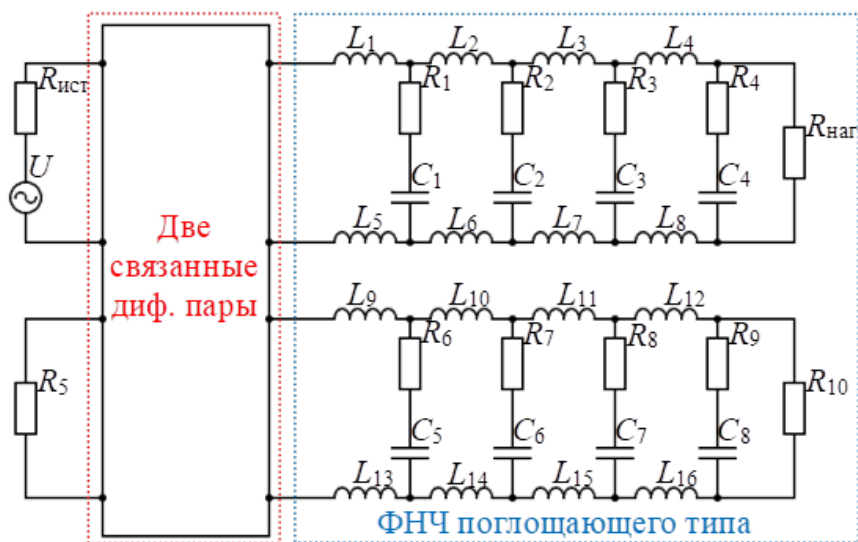


Рис. 2. Эквивалентная схема включения двух ДЛП и ФНЧ поглощающего типа.

Параметры ФНЧ поглощающего типа следующие: $R_{\text{ист}} = R_{\text{наг}} = R_5 = R_{10} = 50$ Ом, $R_1 = R_6 = 5,36$ Ом, $R_2 = R_7 = 11,5$ Ом, $R_3 = R_8 = 4,7$ Ом, $R_4 = R_9 = 100$ Ом,

$L_1 = L_5 = L_9 = L_{13} = 1$ нГн, $L_2 = L_6 = L_{10} = L_{14} = 4,7$ нГн, $L_3 = L_7 = L_{11} = L_{15} = 4,1$ нГн, $L_4 = L_8 = L_{12} = L_{16} = 5,6$ нГн, $C_1 = C_5 = 1,2$ пФ, $C_2 = C_6 = 0,1$ пФ, $C_3 = C_7 = 2,4$ пФ, $C_4 = C_8 = 0,5$ пФ. Так как ДЛП две, то ко второй ДЛП также был добавлен ФНЧ поглощающего типа. Вторую ДЛП также можно использовать для передачи сигнала.

2. Анализ во временной области

Для анализа полученных структур во временной области были выбраны два сигнала: Гауссов импульс с шириной спектра от 0,1 до 6 ГГц (рис. 3 (а)). Такое возбуждение соответствует определению широкополосного импульса из стандарта МЭК [11]. Для оценки возможности применения такой структуры для защиты от узкополосных помех рассматривалась затухающая синусоида (рис. 3 (б)) [12]. Амплитуда сигналов Э.Д.С составляет 1 В.

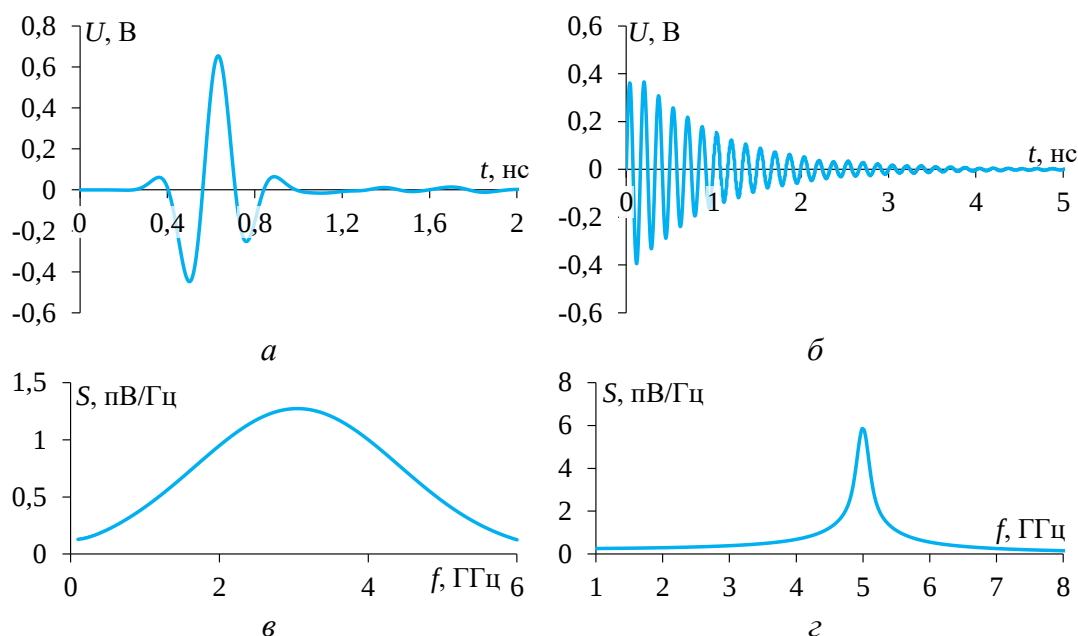


Рис. 3. Форма сигнала и их спектральные составляющие Гауссова импульса (а и в) и затухающей синусоиды (б и г).

Для анализа влияния помех на аппаратуру используют N -нормы. В табл. 1 приведены анализируемые нормы и их характеристики, представленные в [13]. Их можно использовать для оценки возможности электрического пробоя,

выгорания электронных компонентов и т.д. Расчет N -норм основан на применении математических операторов ко всей форме волны.

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	$N_3 = \left \int_0^t U(t) dt \right _{max}$	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

Первым этапом проведен анализ возможности ослабления сверхширокополосная (СШП) и узкополосная (УП) помех двух ДЛП без ФНЧ поглощающего типа и с ним. На рис. 4 представлены результаты ослабления СШП и УП помех при воздействии на ДЛП без ФНЧ поглощающего типа и с ним.

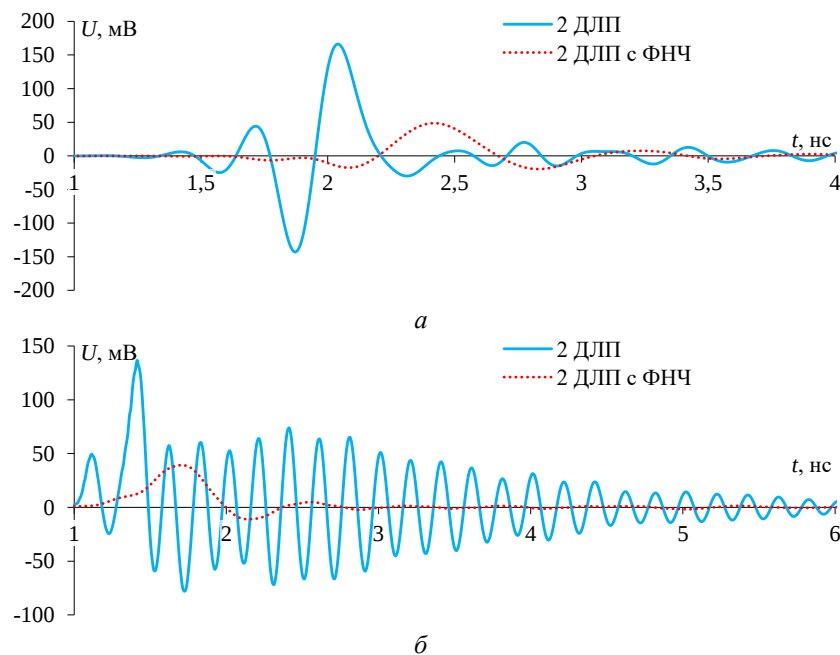
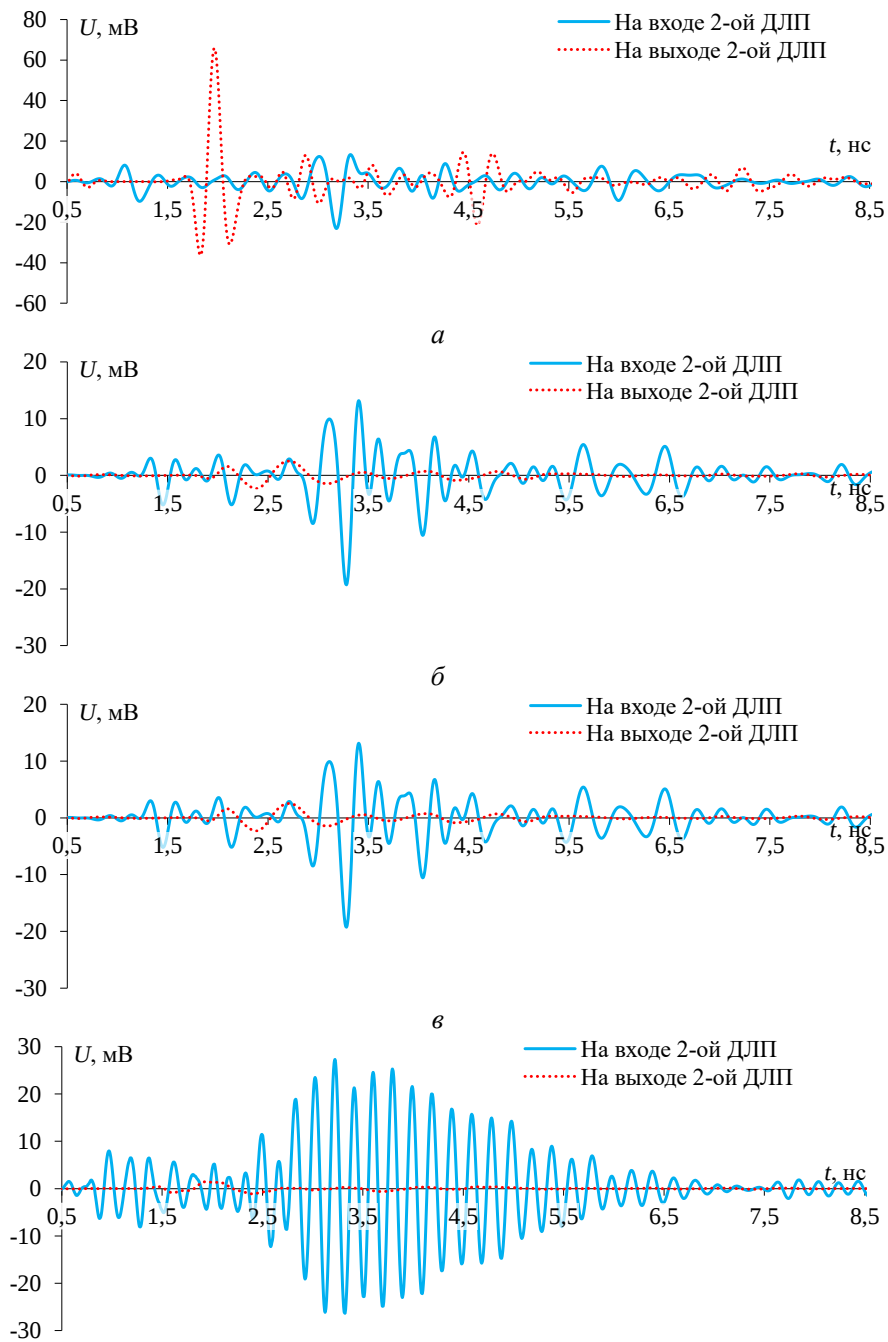


Рис. 4. Временной отклик на СШП (а) и УП (б) помехи без ФНЧ и с ним.

Из рис. 4 видно, что благодаря добавления ФНЧ поглощающего типа получилось улучшить помехоподавляющие свойства для СШП в 6,69 раза, а для УП в 7,41 раза. Так ослабление стали больше в более чем 3 раза, уменьшилось число импульсов, как для СШП, так и для УП помех. На задержку сигнала ФНЧ поглощающего типа практически не повлиял. На рис. 5 представлены перекрестные помехи на второй ДЛП для СШП и УП помех, как без ФНЧ поглощающего типа, так и с ним.



2

Рис. 5. Перекрестные помехи на второй ДЛП для СШП (а, в) и УП (б, г) помех без ФНЧ и с ним.

Также в табл. 2 были сведены N -нормы, который были получены в начале и в конце двух ДЛП без ФНЧ и с ним. Для уменьшения размеров таблицы были использованы следующие сокращения: для двух ДЛП без ФНЧ поглощающего типа – С1, для двух ДЛП с ФНЧ поглощающего типа – С2.

Таблица 2. Значение N -норм для двух ДЛП с ФНЧ и без него.

	$N_1 \cdot 10^3$		$N_2 \cdot 10^9$		$N_3 \cdot 10^{-12}$		$N_4 \cdot 10^{-11}$		$N_5 \cdot 10^{-6}$	
	Гауссово воздействие									
	C1	C2	C1	C2	C1	C2	C1	C2	C1	C2
Вход	335	328	6,29	6,27	7,26	7,45	11,53	17,6	4,06	4,32
Выход	166	49	2,97	0,31	7,06	7,08	7,31	3,07	2,25	0,81
	Затухающая синусоида									
Вход	289	289	10,17	10,18	15,73	15,87	21,41	2,35	4,24	4,33
Выход	137	39	2,89	0,19	15,55	15,67	13,19	2,39	2,42	0,71

Для Гауссова воздействия в случае С1 на выходе ДЛП наблюдается уменьшение N_1 , N_2 , N_4 и N_5 в 2,02, 2,07, 1,46 и 1.8 раза соответственно, в то время как N_3 практически не меняется (уменьшение в 1,03 раза). В случае С2 на выходе ДЛП также наблюдается уменьшение N_1 , N_2 , N_4 и N_5 , но значительно более сильное: в 6,84, 66,1, 5,63 и 5,21 раза соответственно, при этом N_3 незначительно увеличивается (в 1,02 раза). Сравнивая случай С1 и С2 на выходе, видим, что ФНЧ приводит к дополнительному уменьшению N_1 , N_2 , N_4 и N_5 в 3,39, 31,9, 3,86 и 1,95 раза соответственно. Для затухающей синусоиды в системе С1 на выходе ДЛП N_1 , N_2 , N_4 и N_5 уменьшаются в 2,11, 3,65, 1,62 и 1,83 раза соответственно, а N_3 практически не меняется (уменьшение в 1,01 раза). В системе С2 на выходе ДЛП аналогично уменьшаются N_1 , N_2 , N_4 и N_5 в 7,41, 265,1, 2,37 и 6,01 раза соответственно, а N_3 практически не меняется. Сравнивая системы С1 и С2 на выходе при затухающей синусоиде, видим, что ФНЧ приводит к дополнительному уменьшению N_1 , N_2 , N_4 и N_5 в 3,51, 72,6, 1,46 и 3,28 раза соответственно. Таким образом, ФНЧ значительно усиливает подавление помех, после прохождения ДЛП как для гауссова воздействия, так и для затухающей синусоиды, при этом N_3 остается стабильной вне зависимости от наличия ФНЧ и типа сигнала.

3. Анализ в частотной области

Далее производится оценка частотных характеристик для двух ДЛП вместе с ФНЧ поглощающего типа. Осуществляется анализ частотных характеристик сигнала с целью выявления эффективности фильтрации и подавления помех. На рис. 6 представлены частотные зависимости коэффициента передачи от частоты для двух ДЛП без ФНЧ и с ним.

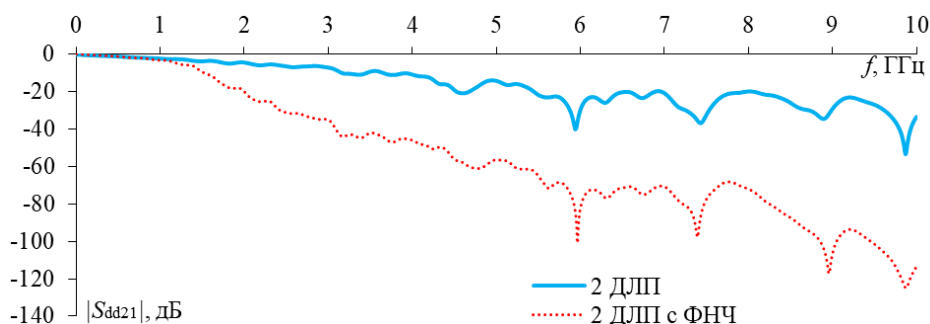


Рис. 6. Коэффициент передачи для двух ДЛП без ФНЧ и с ним.

Из рис. 6 видно, что при добавлении ФНЧ ослабления в полосе заграждения стало больше, так на частоте 5 ГГц ослабление без ФНЧ было минус 15 дБ, а при добавлении ФНЧ минус 58 дБ, при этом не изменив полосу пропускания. Для анализа отражений от входа и выхода представлены коэффициенты отражения от входа ($|S_{dd11}|$) и выхода ($|S_{dd22}|$) без ФНЧ и с ним на рис. 7.

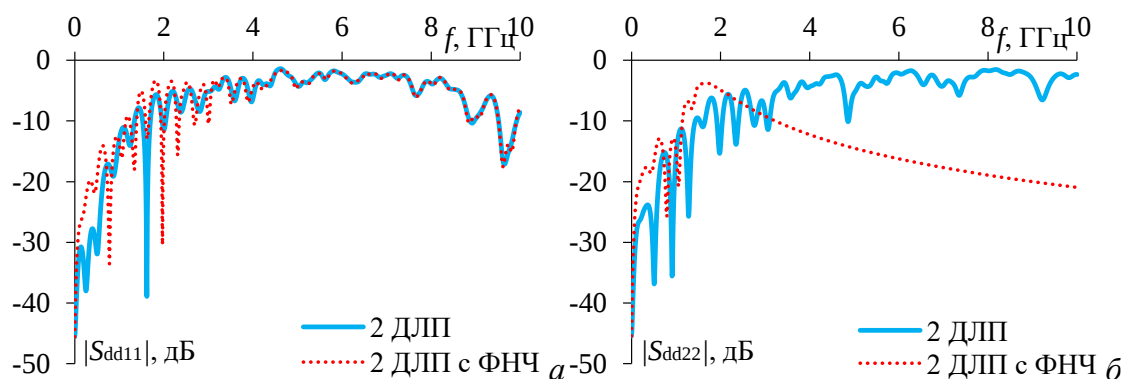


Рис. 7. Коэффициент отражения от входа (а) и выхода (б) для двух ДЛП без ФНЧ и с ним.

Как видно из графиков, добавление ФНЧ поглощающего типа приводит к снижению уровня отражённого сигнала на выходе ДЛП. Однако на входе ДЛП

уровень отражения остаётся практически неизменным. Это объясняется расположением ФНЧ, он установлен только на выходе ДЛП и, следовательно, влияет только на отражения, возникающие после прохождения сигнала через ДЛП. Для анализа перекрестных помех от входа первой к выходу второй ДЛП ($|S_{dd41}|$) и от выхода первой к входу второй ДЛП ($|S_{dd32}|$), также представлены графики частотной зависимостей на рис. 8.

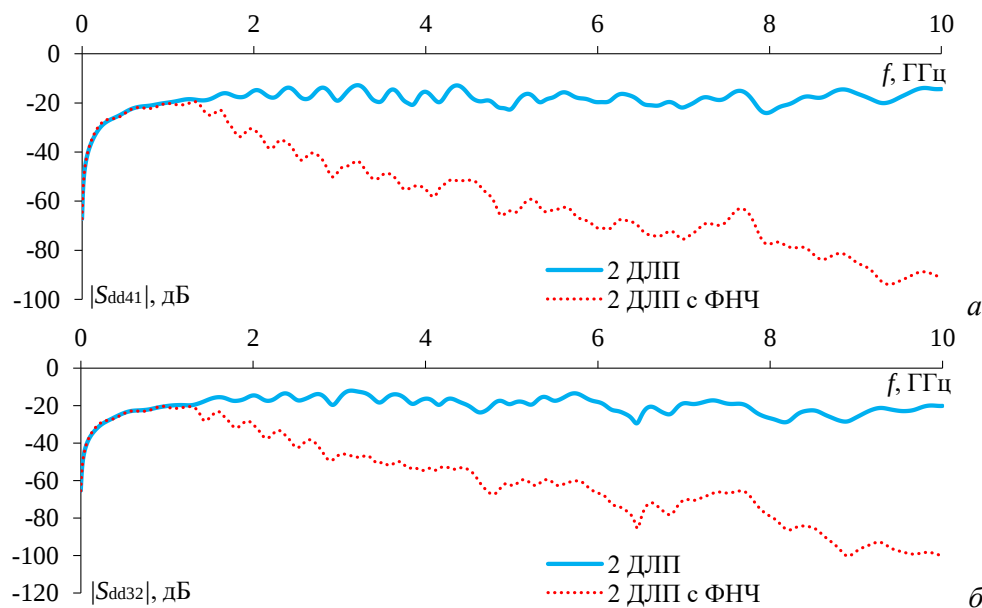


Рис. 8. График зависимостей $|S_{dd41}|$ (а) и $|S_{dd32}|$ (б).

Анализируя график можно сказать, что без ФНЧ на всем частотном диапазоне не превышает минус 15 дБ, как для $|S_{dd41}|$, так и для $|S_{dd32}|$. При добавлении ФНЧ, значения ослабления перекрестных помех увеличились, так на частоте 5 ГГц было ослабление минус 21 дБ, стало минус 64 дБ для $|S_{dd41}|$, а для $|S_{dd32}|$ было минус 18 дБ, а стало минус 61 дБ, однако ФНЧ не повлиял на частотные характеристики в полосе пропускания.

4. Анализ целостности полезного сигнала

В данном разделе приводится оценка целостности передаваемого полезного сигнала для двух ДЛП с использованием ФНЧ поглощающего типа. Для этого проведен анализ искажений и потерь данных в процессе фильтрации. Для анализа глазковых диаграмм были выбраны две скорости передачи данных 0,5 и 1 Гбит/с. Спектр первой скорости лежит в полосе пропускания

ДЛП, а спектр второй лежит на границе полосы пропускания. Для построения глазковых диаграмм подавалась псевдослучайная битовая последовательность размерностью 10000 бит. На рис. 9 представлены глазковые диаграммы для ДЛП без ФНЧ и с ним.

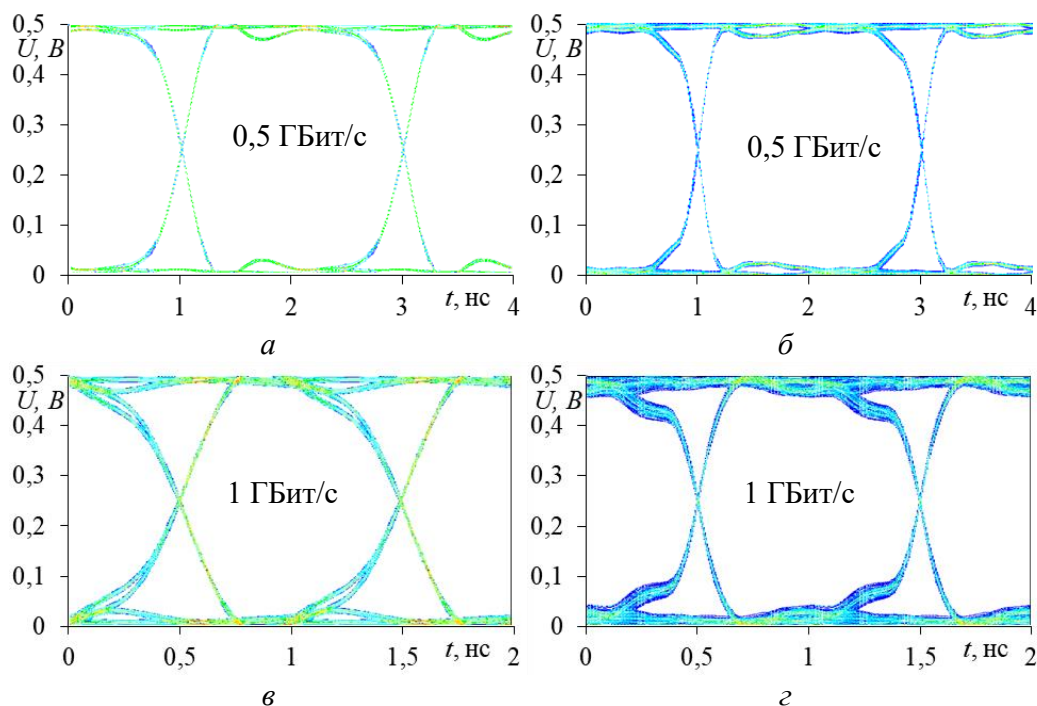


Рис. 9. Глазковые диаграммы для ДЛП без ФНЧ (а, б) и с ним (в, г).

Для скорости передачи данных со скоростью 0,5 Гбит/с «глаз» открыт хорошо, практически нет джиттера, а для скорости 1 Гбит/с появляются небольшие искажения сигнала в виде джиттера. Среднеквадратичный джиттер для дифференциальных ЛП без ФНЧ составляет 2,26 пс, для дифференциальных ЛП с ФНЧ – 3,17 пс. Отношения сигнал шум для скорости 0,5 Гбит/с – 37,2 и 31,15, а для скорости 1 Гбит/с – 23,22 и 21,7, соответственно. Видно, что ФНЧ поглощающего типа практически не влияет на целостность полезного сигнала, но увеличивает помехоподавляющие свойства.

5. Сравнение с другими фильтрами

Для оценки эффективности предложенного подхода был выполнен сравнительный анализ с несколькими альтернативными устройствами,

функционирующими в дифференциальном режиме. В табл. 3 представлено сравнение разработанного устройства с известными фильтрами.

Таблица 3. Сравнение с другими фильтрами.

Лит.	ПП (ГГц)	Средний уровень подавления в ПЗ (дБ)	Материал	Геометрические размеры (мм)	Ключевые выводы
[14]	3	~30	Ni-Zn феррит	Не указаны	Высокая эффективность, низкая стоимость, отсутствие данных о размере
[15]	0,9	~27	Подложка с $\epsilon_r = 4,4$	$\sim 30 \times 15$ (расчет на частоте 1 ГГц)	Простота дизайна, ограниченная полоса подавления
[16]	0,2	~20	Полосковая	$335 \times 25 \times 22$	Эффективная защита от высокочастотных помех
[17]	0,012	~15	RC-фильтр	Не указано	Простота конструкции и надежность
Эта работа	1	~48	Комбинированный	$40 \times 20 \times 1$	Простота, можно использовать, как для защиты, так и в качестве линии задержки (длина проводников 200 мм)

В работе [14] рассмотрен многослойный фильтр на основе Ni-Zn ферритовой подложки, который обеспечивает подавление сигнала на уровне 30 дБ на частоте более 3 ГГц. Однако для улучшения передачи сигналов в полосе пропускания (ПП) требуется оптимизация согласования импедансов. В работе [15] представлен низкочастотный дифференциальный фильтр на основе CPS и G-CPS, обеспечивающий эффективное подавление сигнала и расширенную полосу подавления. Фильтр отличается компактностью, но требует точного подбора параметров из-за сложности конструкции. В работе [16] исследован двухкаскадный экранированный модальный фильтр, который улучшает подавление помех на 8-10 дБ по сравнению с однокаскадным вариантом. Добавление каскада снижает частоту среза и увеличивает потери, что сопровождается ростом габаритов устройства. В работе [17] разработан активный RC-фильтр Чебышева с частотой среза 12 кГц. Устройство не требует индуктивных элементов, имеет простую настройку и подходит для обработки

аналоговых сигналов, но требует точного математического или программного моделирования.

Заключение

В работе представлены результаты моделирования двух ДЛП без ФНЧ поглощающего типа и с ним. Результаты показали, что при добавлении ФНЧ поглощающего типа, улучшаются помехоподавляющие свойства с сохранением полосы пропускания. Так, ослабление СШП помехи было 2,02 раза, а стало 6,69 раза, а УП – 2,11 и 7,41 раза, соответственно. Добавление ФНЧ поглощающего типа практически никак не повлияло на коэффициент отражения от входа, но повлияло на коэффициент отражения от выхода и перекрестные помехи на ближнем и дальнем концах. Из глазковых диаграмм видно, что добавление ФНЧ слабо влияет на характеристики глаза.

К дальнейшим перспективам можно отнести исследования возможности использовать вторую дифференциальную линию передачи в качестве резервной, а также проведение лабораторного эксперимента.

Финансирование: исследование выполнено за счет проекта «Методология автоматизированного проектирования радиоэлектронной аппаратуры, функционирующей в условиях деструктивных воздействий», госзадание FEWM-2024-0005.

Литература

1. Вагин Г.Я., Лоскутов А.Б., Севостьянов А.А. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике //М.: Издательский центр «Академия. – 2010.
2. Дмитриков В.Ф., Шушпанов Д.В. Устойчивость и электромагнитная совместимость устройств и систем электропитания. – 2018.
3. Терентьев Д.Е., Сторожук Н.Л. Защита оборудования и объектов связи от опасных электромагнитных влияний //Информация и космос. – 2004. – №. 3. – С. 38-45.

4. Рентюк В. Линии связи и проблемы электромагнитной совместимости на примере USB-интерфейса //Компоненты и технологии. – 2016. – №. 10. – С. 25-32.
5. Byun J., Lee H. Y. Analysis and improvement of electromagnetic susceptibility on high speed LVDS I/O system //2010 Asia-Pacific Microwave Conference. – IEEE, 2010. – С. 175-178.
6. 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.
7. Самоквасова Ю.Н., Ромащенко М.А. Обзор материалов применяемых при экранировании РЭС для решения задач обеспечения ЭМС и эму //Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». – 2012. – Т. 2. – С. 214-215.
8. Андреев В.Г., Нгуен Т.Ф., Нарбеков А.Ю. Адаптивная фильтрация комбинированных помех //Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2013. – №. 45. – С. 38-41.
9. Vlasov S.V., Zhechev Y.S. Characteristics of Coupled Differential Pairs from the Perspective of Increasing their Immunity to Intentional Electromagnetic Interference //2024 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – IEEE, 2024. – С. 623-627.
10. 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. – Т. 560. – №. 1. – С. 012110.
11. Electromagnetic Compatibility (EMC). Part 1–5: High Power Electromagnetic (HPEM) Effects on Civil Systems, IEC. 61000 1 5, Ed: IEC, 2004.
12. Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment, MIL-STD-461F, Interface Standard, 2007.

13. Baum C.E. «Norms of time-domain functions and convolution operators» in Recent Advances in Electromagnetic Theory. New York, NY, USA: Springer, 1990, P. 31–55.
14. Sato T. et al. A new multilayered common-mode filter on Ni-Zn ferrite substrate //IEEE transactions on magnetics. – 2001. – Т. 37. – №. 4. – С. 2900-2902.
15. Feng L. P., Zhu L., Zhang S. Differential-mode low-pass filter using hybrid CPS and G-CPS with intrinsic common-mode rejection //IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2019. – Т. 67. – №. 5. – С. 1836-1843.
16. Костелецкий В.П., Заболоцкий А.М., Лакоза А.М. Двухкаскадный экранированный модальный фильтр для работы в дифференциальном и синфазном режимах //Проблемы разработки перспективных микро-и наноэлектронных систем (МЭС). – 2021. – №. 4. – С. 127-133.
17. Горовенко Т.А., Еремин А. В. РАЗРАБОТКА АКТИВНОГО РС-ФИЛЬТРА НА ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЯХ //Теория и практика современной науки. – 2016. – №. 1 (7). – С. 72-76.

Для цитирования:

Власов С.В., Жечев Е.С. Анализ помехоустойчивости и целостности сигнала для двух дифференциальных линий передачи с ФНЧ неотражающего типа. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №.5. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.5.10>