

УДК 621.391.825

Устройство защиты от импульсных сигналов с опорным проводником в виде боковых полигонов и наличием комбинационных импульсов во временном отклике

Черникова Е. Б.

Постановка задачи: в условиях усложнения электромагнитной обстановки, увеличения рабочих частот, повышения чувствительности радиоэлектронных средств (РЭС) и высокой плотности их компоновки возрастает актуальность обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС). Одной из ключевых задач ЭМС является повышение помехоустойчивости и защита РЭС от помеховых электромагнитных воздействий. Особую опасность представляют сверхкороткие импульсы (СКИ), включая преднамеренные электромагнитные воздействия, способные вызывать сбои в функционировании РЭС или выводить из строя их отдельные элементы. Малая длительность и широкий спектр СКИ значительно затрудняют их подавление традиционными средствами защиты. В связи с этим возникает необходимость в разработке новых устройств защиты, способных эффективно противодействовать СКИ и обеспечивать устойчивую работу РЭС. **Цель работы** – представить новое устройство защиты от импульсных сигналов на основе полосковой структуры с опорным проводником в виде боковых полигонов и наличием комбинационных импульсов во временном отклике. **Используемые методы:** в процессе разработки нового устройства защиты применено модальное разложение СКИ на последовательность импульсов меньшей амплитуды за счет различия погонных задержек мод, распространяющихся в полосковой линии передачи с неоднородным диэлектрическим заполнением. Для подтверждения работоспособности предложенного решения выполнено квазистатическое моделирование временного отклика устройства на воздействие СКИ. Расчет матриц первичных и вторичных погонных параметров осуществлялся методом моментов. **Новизна:** предложено устройство защиты с опорным проводником в виде боковых полигонов, отличающееся схемной асимметрией, реализуемой путем соединения двух проводников перемычкой на дальнем конце тремя различными способами, что приводит к формированию витка меандровой линии, состоящего из двух последовательно соединенных полувитков. В результате этого, во временном отклике устройства появляются комбинационные импульсы с задержками, не кратными задержками мод, которые служат новым ресурсом для повышения эффективности защиты, так как позволяют эффективнее снижать амплитуду помехового воздействия и перераспределять энергию во времени, улучшая защитные характеристики. **Результат:** разработано новое устройство защиты, обеспечивающее разложение СКИ на последовательность импульсов меньшей амплитуды, включая комбинационные. В предлагаемом устройстве достигается выравнивание временных интервалов между импульсами разложения, что приводит к увеличению минимального временного интервала и, как следствие, общей длительности СКИ, который будет разлагаться полностью. **Практическая значимость:** разработанное устройство может быть применено в критически важных радиоэлектронных системах, включая авиационные, космические и телекоммуникационные комплексы, где надежность работы в условиях электромагнитных помех имеет первостепенное значение.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, преднамеренные помехи, сверхкороткий импульс, устройство защиты, модальная фильтрация, комбинационные импульсы.

Библиографическая ссылка на статью:

Черникова Е. Б. Устройство защиты от импульсных сигналов с опорным проводником в виде боковых полигонов и наличием комбинационных импульсов во временном отклике // Системы управления, связи и безопасности. 2025. № 2. С. 105-118. DOI: 10.24412/2410-9916-2025-2-105-118

Reference for citation:

Chernikova E. B. Protection device against pulse signals with a reference conductor in the form of side polygons and the presence of combinational pulses in the time response. *Systems of Control, Communication and Security*, 2025, no. 2, pp. 105-118 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2025-2-105-118

Актуальность

Одной из ключевых задач при разработке радиоэлектронных средств (РЭС) является обеспечение их электромагнитной совместимости (ЭМС), что обусловлено критической важностью бесперебойного функционирования радиоэлектронных устройств, внедренных практически во все сферы человеческой деятельности [1]. Современное развитие РЭС характеризуется ростом количества радиоэлектронных устройств (РЭУ), усложнением конструктивных решений, расширением функциональных возможностей, а также увеличением числа одновременно функционирующих РЭУ. Кроме того, повышается плотность размещения электронных компонентов РЭУ, тем самым, возрастает чувствительность к электромагнитным воздействиям. В совокупности эти факторы способствуют снижению помехоустойчивости РЭС и увеличению их восприимчивости к электромагнитным помехам [2]. Кроме того, существует угроза преднамеренных электромагнитных воздействий, что делает защиту РЭС от помех особенно актуальной [3]. По способу распространения помехи делятся на кондуктивные и излучаемые [4]. В случае кондуктивных помех, которые попадают в РЭУ по проводам, необходимо предусматривать защиту цепей питания, управления, синхронизации и других критичных элементов системы. Одним из наиболее опасных видов кондуктивных помех являются сверхкороткие импульсы (СКИ), имеющие длительность в субнаносекундном и наносекундном диапазонах [5]. При воздействии СКИ с амплитудой, превышающей допустимые пороговые значения, возникает риск изменения параметров или выхода из строя систем, из-за повреждения элементов и узлов [6]. Когда амплитуда наведенного СКИ достигает уровня информационных сигналов (низковольтные помехи), может произойти разрушение обрабатываемой информации [7]. Таким образом, разработка и совершенствование устройств защиты от СКИ представляет собой актуальную задачу для обеспечения надежности и устойчивости современных РЭС.

Постановка задачи

Существует несколько методов защиты от электромагнитных помех, включая экранирование, фильтрацию и заземление [8]. Наиболее подходящим средством для подавления кондуктивных помех является использование фильтров [9]. Между тем они имеют ряд ограничений, существенно затрудняющих их применение для защиты от СКИ [10]. СКИ характеризуются малой длительностью и обладают широким спектром, охватывающим диапазон от низких до сверхвысоких частот. Стандартные фильтры предназначены для подавления сигналов в определенном частотном диапазоне, как следствие, они не могут эффективно подавлять широкополосные помехи. СКИ обладают малым временем нарастания, что приводит к возникновению переходных процессов в фильтрах, которые не успевают отреагировать на такие быстрые изменения сигнала. Это особенно критично для пассивных фильтров, чьи реактивные элементы (конденсаторы, индуктивности) не могут мгновенно компенсировать воздействие СКИ. Кроме того, в реальных условиях каждый элемент имеет паразитные индуктивности и емкости [11]. Для более эффективной защиты требуются

специализированные решения, например, нелинейные элементы (TVS-диоды, варисторы, газоразрядники). Между тем газоразрядники имеют большое время срабатывания, которое значительно превышает длительность СКИ. TVS-диоды характеризуются медленной реакцией носителей заряда в p-n переходе, что делает их неспособными эффективно подавлять импульсы с пикосекундным временем нарастания [12]. Варисторы, обладая высокой емкостью, способны поглощать полезные сигналы высоких частот [13]. Кроме того, нелинейные элементы имеют ограничения по пороговому напряжению срабатывания, подвержены деградации и чувствительны к радиационным воздействиям, что снижает их надежность и ограничивает применимость в системах защиты от СКИ.

Для защиты РЭС от СКИ перспективно является использование устройств защиты на основе полосковых структур, реализующих модальное разложение [14]. Такие устройства представляют собой многопроводные линии передачи с неоднородным диэлектрическим заполнением [15]. Ослабление СКИ достигается за счёт его разложения на последовательность импульсов с меньшей амплитудой, что обусловлено различием погонных задержек распространяющихся мод. Полное разложение СКИ в отрезке линии передачи длиной l возможно, если его общая длительность t_{Σ} не превышает минимальный модуль разности погонных задержек распространяющихся мод [16]:

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

где τ_i – погонная задержка i -й моды отрезка линии передачи.

Ключевыми преимуществами таких устройств защиты являются высокая радиационная стойкость, долговечность, низкая стоимость реализации, возможность работы при значительных уровнях напряжения и тока, а также гибкость конструкции, позволяющая адаптировать их под конкретные требования защищаемого оборудования.

Для повышения эффективности устройств защиты на основе модального разложения используется их параметрическая и структурная оптимизация [17]. Модификация геометрической конфигурации таких устройств позволяет создать оптимальные условия для эффективного подавления СКИ. Выявлено, что соблюдение симметрии в таких структурах повышает их помехозащитные характеристики за счет выравнивания амплитуд импульсов разложения [18]. Наиболее ярко преимущества симметричной конфигурации проявляются в устройствах с зеркальной симметрией, где равномерное распределение электромагнитных параметров обеспечивает более эффективное ослабление помех [19]. Так, известна четырехпроводная зеркально-симметричная структура, обеспечивающая защиту от СКИ [20]. Техническим результатом является ослабление СКИ в 4 раза относительно половины ЭДС за счет его разложения на 4 импульса меньшей амплитуды. Недостатком данного устройства является недостаточное ослабление СКИ, а также малое значение интервалов времени между импульсами разложения. Предложено устройство [21], состоящее из сигнальных проводников, которые выполняются за счет зазоров в опорной проводящей пластине и прокладываются двумя парами, параллельно друг другу на верхнем и нижнем слоях подложки, причем пара верхнего слоя расположена зеркально нижнему слою (рис. 1).

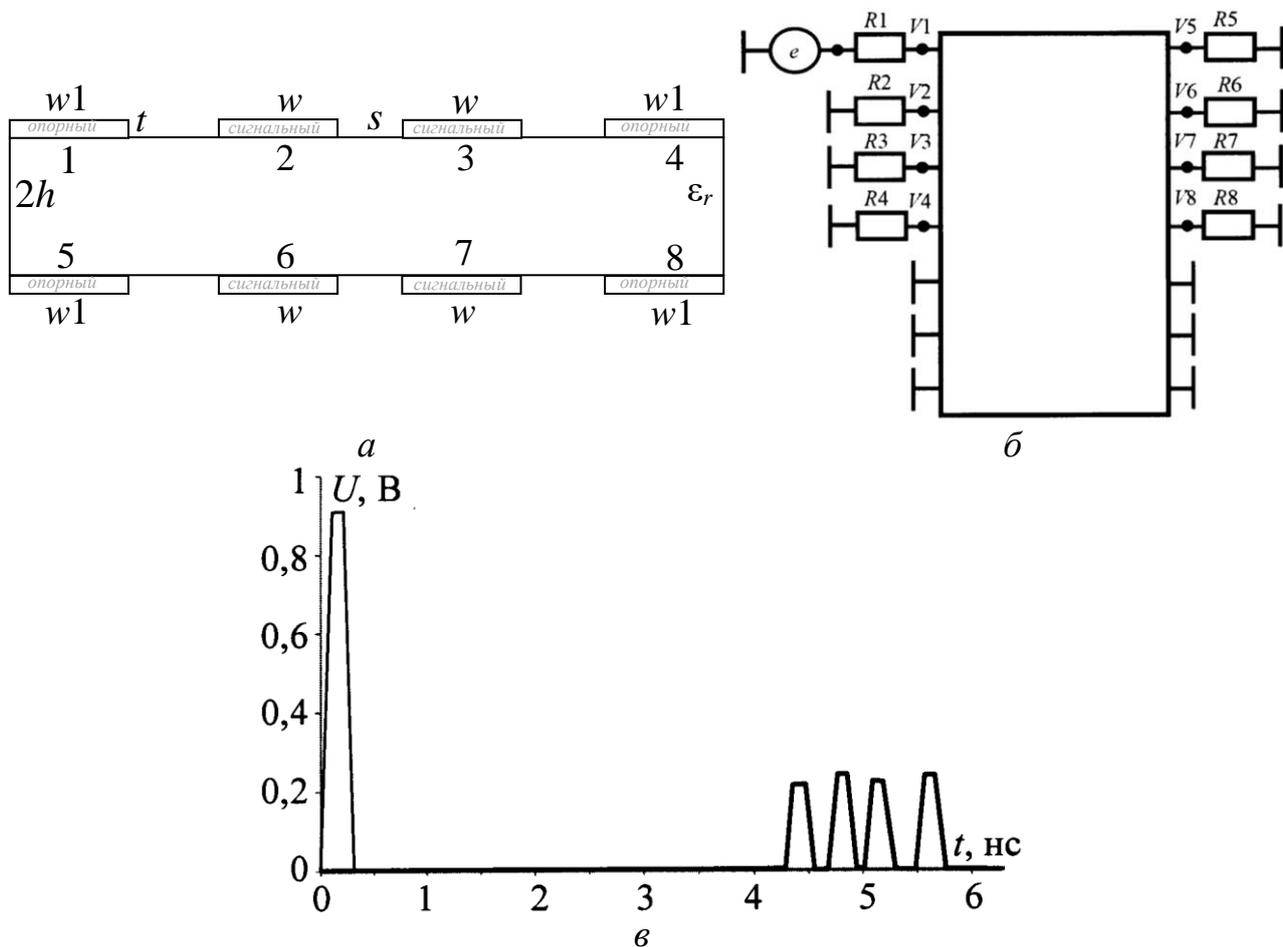


Рис. 1. Поперечное сечение (а), схема соединений (б) и форма напряжения на входе (—) и выходе (—) (в) структуры с опорными проводниками в виде боковых полигонов

Техническим результатом является разложение СКИ на импульсы с амплитудами около 0,25 В, что соответствует ослаблению в 4 раза по отношению к половине ЭДС. Недостатками данного устройства являются недостаточное ослабление помеховых импульсных сигналов, малые значения временных интервалов между импульсами разложения, малое значение общей длительности импульсного сигнала, который может быть разложен, а также отсутствие комбинационных импульсов во временном отклике. Таким образом, актуальной задачей является разработка новых устройств защиты, способных устранить указанные недостатки.

Разработка устройства защиты

Несмотря на очевидные преимущества симметрии, остается открытым вопрос о возможностях асимметрии для устранения описанных выше недостатков. Для анализа влияния асимметрии на характеристики помехозащитных устройств целесообразно изучить её влияние на структуры с исходно симметричными поперечными сечениями. Это позволит оценить изменения в модальном разложении и выявить потенциальные преимущества.

Предлагается устройство защиты от импульсных сигналов с опорным проводником в виде боковых полигонов, состоящее из четырех сигнальных

проводников, которые выполняются за счет зазоров в опорной проводящей пластине и прокладываются двумя парами, параллельно друг другу на верхнем и нижнем слоях подложки, причем пара верхнего слоя расположена зеркально нижнему слою, отличающееся тем, что два сигнальных проводника в конце линии соединены между собой перемычкой на одном слое или на разных слоях параллельно или на разных слоях диагонально, образуя виток меандровой линии из двух последовательно соединенных полувитков, который на одном конце устройства электрически соединен с источником помех, а на другом – с защищаемой цепью, при этом два оставшихся сигнальных проводника соединены через резисторы с опорными проводниками [22].

Поперечное сечение устройства идентично исходной структуре с опорными проводниками в виде боковых полигонов (рис. 1а), где w – ширина проводников, w_1 – ширина опорных проводников, s – расстояние между проводниками, t – толщина проводников, h – толщина диэлектрика, ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость подложки. Проводники 2 и 3 расположены на одной стороне диэлектрического слоя, а проводники 6 и 7 – зеркально на обратной, при этом два проводника соединены между собой на дальнем конце перемычкой тремя вариантами: на одном слое (2-3), на разных слоях (2-6), диагонально (2-7). Проводники 1, 5, 4 и 8 – опорные и выполнены в виде боковых полигонов. Схемы соединений разработанного устройства защиты, демонстрирующие три варианта соединения двух сигнальных проводников, представлены на рис. 2.

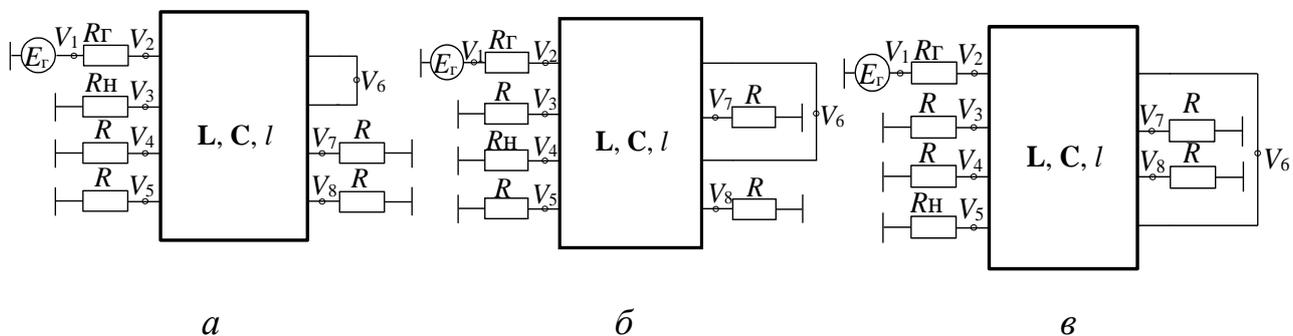


Рис. 2. Схемы соединения разрабатываемого устройства защиты,

где два сигнальных проводника в конце линии соединены перемычкой на одном слое (а), разных слоях параллельно (б) и разных слоях диагонально (в)

Из рис. 2 видно, что первый проводник является активным и соединен на ближнем конце с источником СКИ, представленным на схеме идеальным источником э.д.с. E_T и внутренним сопротивлением R_T . На дальнем конце первый проводник линии соединен с помощью перемычки с другим проводником, образуя меандровую линию из двух полувитков, а ее конец соединен с защищаемой цепью, представленной сопротивлением R_H . Пассивные проводники через резисторы R соединяются с опорными проводниками. Значения резисторов равны волновому сопротивлению тракта. Длина проводников $l=1$ м каждый.

Уникальность устройства заключается в применении схемной асимметрии, которая приводит к возникновению комбинационных импульсов во временном отклике линий передачи [23] с задержками, определяющимися комбинациями задержек мод [24]. Появление комбинационных импульсов во временном отклике имеет важное значение для совершенствования устройств защиты от СКИ. Увеличение количества импульсов позволяет снизить амплитуду за счёт более равномерного распределения энергии между ними [25]. Техническим результатом устройства защиты является разложение СКИ на импульсы меньшей, относительно входного помехового импульса, амплитуды, включая комбинационные, с выравненными интервалами времени, значения которых увеличены, а также увеличенным значением общей длительности импульсного сигнала, по сравнению с прототипом. Технический результат достигается за счёт схемной асимметрии, использования ресурса комбинационных импульсов, а также выбором параметров поперечного сечения, обеспечивающим равенство временных интервалов между всеми, включая комбинационные, импульсами разложения.

Результаты моделирования

Для подтверждения технического результата выполнено квазистатическое моделирование в ПО TUSUR.EMC [26]. Воздействующий СКИ имеет форму трапеции с ЭДС 5 В и длительностями фронта, спада и плоской вершины по 50 пс. На рис. 2 узлами V_2 - V_7 пронумерованы по порядку узлы на ближнем и дальнем концах каждого проводника, в которых могут быть вычислены формы напряжения. В узле V_1 вычисляется форма ЭДС, узле V_2 – напряжение на входе активного проводника, узлах V_3 , V_4 и V_5 (рис. 2а, б и в, соответственно) – на выходе активного проводника.

Значения параметров, которые обеспечивают равенство временных интервалов между всеми импульсами разложения, включая комбинационные, получены в результате оптимизации по критерию минимизации суммы квадратов отклонений временных интервалов от их среднего значения [27]. Для схемы 1 выбраны следующие параметры (мм) при $\epsilon_r=4,5$, $t=105$ мкм: $s=0,534$, $w=0,497$, $h=0,502$, $w_1=2,035$ и $d=4,552$; для схемы 2 – $s=0,548$, $w=0,316$, $h=0,461$, $w_1=1,117$ и $d=2,176$; для схемы 3 – $s=0,738$, $w=0,868$, $h=0,272$, $w_1=1,384$ и $d=3,023$. Выбор параметров имеет важное значение для достижения технического результата, поскольку они влияют на погонные матрицы первичных параметров (**C** и **L**), на основе которых вычисляются матрицы погонных задержек **τ** , определяющие времена прихода импульсов.

На рис. 3 представлены результаты моделирования форм напряжения в узлах V_3 , V_4 и V_5 из рис. 2а, б и в, соответственно. Временной отклик содержит 7 импульсов, в отличие от прототипа, где импульсов 4 (см. рис 1в).

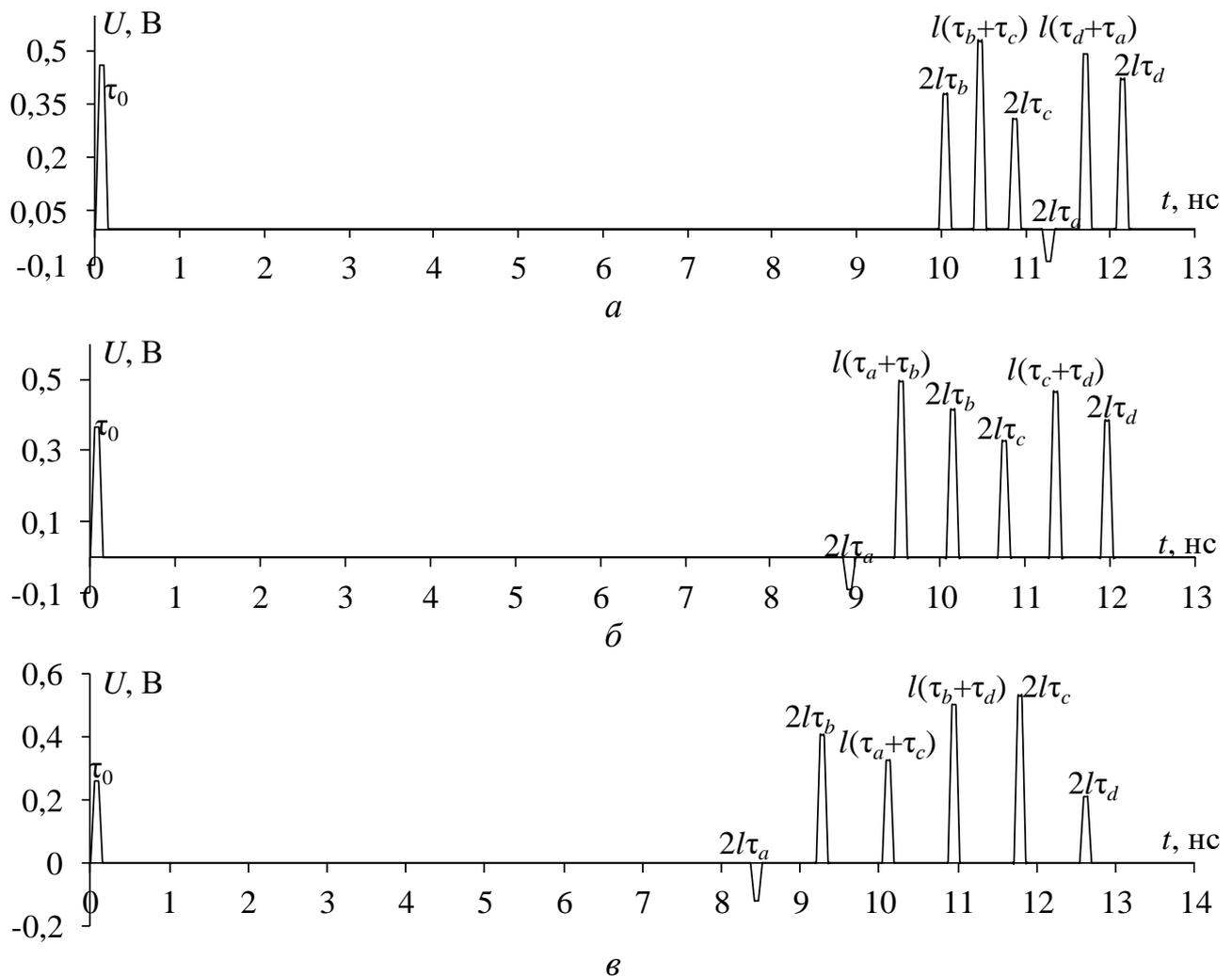


Рис. 3. Формы напряжения на выходе устройства защиты, где два сигнальных проводника в конце линии соединены перемычкой на одном слое (а), разных слоях параллельно (б) и разных слоях диагонально (в)

На рис. 3 наблюдается импульс перекрестной наводки (τ_0), импульсы четырех основных мод с погонными задержками τ_a , τ_b , τ_c и τ_d , умноженными на $2l$, а также комбинационные импульсы с задержками, состоящими из комбинаций погонных задержек основных мод, умноженных на l (для схемы 1 – $\tau_b+\tau_c$ и $\tau_d+\tau_a$, для схемы 2 – $\tau_a+\tau_b$ и $\tau_c+\tau_d$, для схемы 3 – $\tau_a+\tau_c$ и $\tau_b+\tau_d$). В результате моделирования получено, что временные интервалы (нс) между импульсами разложения для схемы 1 равны $\Delta t_1=0,411$, $\Delta t_2=0,411$, $\Delta t_3=0,398$, $\Delta t_4=0,438$ и $\Delta t_5=0,438$; для схемы 2 – $\Delta t_1=0,608$, $\Delta t_2=0,608$, $\Delta t_3=0,607$, $\Delta t_4=0,605$ и $\Delta t_5=0,605$; для схемы 3 – $\Delta t_1=0,834$, $\Delta t_2=0,837$, $\Delta t_3=0,834$, $\Delta t_4=0,837$ и $\Delta t_5=0,834$. Максимальная амплитуда на выходе схемы 1 равна 0,53 В, схемы 2 – 0,497 В, схемы 3 – 0,536 В, что в 4,7, 5 и 4,6 раз меньше относительно половины ЭДС, соответственно, тогда как в прототипе ослабление относительно половины ЭДС равняется 4 (рис. 1в).

Сравнительный анализ форм напряжения на выходе разработанного устройства защиты (рис. 3) и устройства-прототипа (рис. 1в) показал увеличение минимального временного интервала между импульсами разложения

(Δt_{min}). Для схемы 1 Δt_{min} равняется 0,398 нс, для схемы 2 – $\Delta t_{min}=0,605$ нс, для схемы 3 – $\Delta t_{min}=0,834$ нс, а в прототипе $\Delta t_{min}=0,2$ нс. Этого удалось достичь за счет выравнивания и увеличения значений временных интервалов между основными и комбинационными импульсами. Как следствие, это позволило увеличить длительность входного СКИ (t_{Σ}), который будет испытывать полное разложение в линии по условию (1). В результате обеспечивается защита от СКИ с увеличенным значением его общей длительности, за счет его разложения на импульсы меньшей амплитуды, включая комбинационные, с выравненными временными интервалами, значения которых увеличены. Таким образом, показан технический результат, на достижение которого направлено заявленное устройство.

Выводы

Разработанное устройство позволяет эффективно защищать РЭС от помеховых СКИ за счёт модального разложения в многопроводных линиях передачи с неоднородным диэлектрическим заполнением. В отличие от традиционных методов защиты, таких как фильтры и нелинейные элементы, представленное устройство демонстрирует высокую эффективность в ослаблении помехи короткой длительности и широкого спектра за счёт разложения СКИ на последовательность импульсов с меньшей амплитудой, что снижает вероятность выхода из строя критических элементов системы и повышает устойчивость РЭС к электромагнитным воздействиям.

Элементами новизны представленного решения являются:

- 1) использование 4-проводной структуры, в которой два проводника соединены перемычкой на дальнем конце, формируя меандровую линию из двух последовательно соединенных полувитков, при этом на концах двух оставшихся проводников подключены резисторы, что обеспечивает дополнительное ослабление СКИ за счёт увеличения временного интервала между импульсами разложения, обусловленного двукратным удлинением пути распространения помехи от генератора к нагрузке;
- 2) использование схемной асимметрии в структуре с симметричным поперечным сечением, что приводит к формированию комбинационных импульсов во временном отклике, позволяющих более равномерно распределить энергию помехи, что, в свою очередь, снижает ее максимальную амплитуду, а также способствует увеличению числа переменных для оптимизации временных интервалов, обеспечивая более эффективный результат;
- 3) три варианта реализации соединения сигнальных проводников (на одном слое, на разных слоях параллельно, на разных слоях диагонально), что позволяет адаптировать устройство под различные условия эксплуатации;
- 4) использование оптимизированных геометрических параметров поперечного сечения, обеспечивающих равенство временных интервалов между всеми, включая комбинационные, импульсами разложения, что

в результате приводит к увеличению минимального временного интервала и, как следствие, увеличению общей длительности СКИ, который может быть разложен полностью.

Разработанное устройство защиты с опорными проводниками в виде боковых полигонов и наличием комбинационных импульсов во временном отклике может быть эффективно использовано в критически важных РЭС, таких как авиационные, космические и телекоммуникационные комплексы, где надежность работы в условиях электромагнитных помех имеет первостепенное значение. Устройство обеспечит защиту от СКИ, минимизируя риск повреждения чувствительных компонентов и поддерживая стабильную работу систем в условиях сильных внешних воздействий. При реализации устройства виток меандровой линии из двух последовательно соединенных полувитков на практике можно выполнить путем добавления перемычки из проводящего материала (металла) между указанными проводниками в исходную структуру прототипа для всех схем из рис. 2. Альтернативный подход заключается в продлении проводника с последующим изгибом к проводнику на одном слое (для схемы 1 из рис. 2а) или с помощью переходного отверстия, обеспечивающего соединение необходимых проводников на различных слоях (для схем 2 и 3 из рис. 2б и в), если устройство проектируется с нуля. В дальнейшем планируется выполнить оптимизацию по массогабаритному критерию для миниатюризации устройства.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №25-29-00419, <https://rscf.ru/project/25-29-00419/> в ТУСУРе.

Литература

1. Li E. P., Wei X. C., Cangellaris A. C., Liu E. X., Zhang Y. J., D'Amore M. Progress review of electromagnetic compatibility analysis technologies for packages, printed circuit boards, and novel interconnects // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2010. Vol. 52. № 2. P. 248–265.
2. Pissort D., Lannoo J., Van Waes J., Degraeve A., Boydens J. Techniques and measures to achieve EMI resilience in mission- or safety-critical systems // IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine. 2017. Vol. 6. № 4. P. 107–114.
3. Radasky W. A., Hoad R. Recent developments in high power EM (HPEM) standards with emphasis on high altitude electromagnetic pulse (HEMP) and intentional electromagnetic interference (IEMI) // IEEE Letters on Electromagnetic Compatibility Practice and Applications. 2020. Vol. 2. № 3. P. 62–66.
4. Гизатуллин З. М. Помехоустойчивость средств вычислительной техники внутри зданий при широкополосных электромагнитных воздействиях: Монография. – Казань: Издательство Казанского государственного технического университета, 2012. – 254 с.
5. Mora N., Vega F., Lugin G., Rachidi F., Rubinstein M. Study and classification of potential IEMI sources // System and assessment notes. 8 July 2014. Note 41. 92 p.

6. Mojert C. UWB and EMP susceptibility of microprocessors and networks. 14th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility. 2001. P. 47–52.

7. Баталов Л. В., Жуковский М. И., Киричек Р. В., Лазарев Б. Н. Механизмы и последствия преднамеренных электромагнитных воздействий на передачу данных // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 2 (78). С. 103–108.

8. Газизов Т. Р. Электромагнитная совместимость и безопасность радиоэлектронной аппаратуры: Учебное пособие. – Томск: ТМЛ-Пресс, 2007. – 256 с.

9. Hong J. S. Microstrip filters for RF/microwave applications. – New York: Wiley, 2011. – 477 p.

10. Weber T., Krzikalla R., ter Haseborg J. L. Linear and nonlinear filters suppressing UWB pulses // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2004. Vol. 46. № 3. P. 423–430.

11. Wang S., Lee F. C., Chen D. Y., Odenaal W. G. Effects of parasitic parameters on EMI filter performance // IEEE Transactions on Power Electronics. 2004. Vol. 19. № 3. P. 869–877.

12. Han S. M., Huh C. S., Choi J. S. A validation of conventional protection devices in protecting emp threats // Progress in Electromagnetics Research. 2011. Vol. 119. P. 253–263.

13. Cooray V. Lightning protection. – UK: Institution of Engineering and Technology, 2010. – 1072 p.

14. Gazizov T. R., Zabolotsky A. M. New approach to EMC protection. 18th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility. 2007. P. 273–276.

15. 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.

16. Газизов Т. Р., Заболоцкий А. М. Модальное разложение импульса в отрезках связанных линий как новый принцип защиты от коротких импульсов // Технологии ЭМС. 2006. № 4. С. 40–44.

17. Belousov A. O., Gazizov T. R. Systematic approach to optimization for protection against intentional ultrashort pulses based on multiconductor modal filters // Complexity. 2018. № 2018. P. 1–15.

18. Самотин И. Е. Ослабление импульсных сигналов в модальных фильтрах с сильной лицевой связью // Доклады ТУСУР. 2010. № 2-2 (22). С. 169–171.

19. Chernikova E. V., Belousov A. O., Gazizov T.R., Zabolotsky A.M. Using reflection symmetry to improve the protection of radio-electronic equipment from ultrashort pulses // Symmetry. 2019. Vol. 11(7). № 883. P. 1–25.

20. Заболоцкий А. М., Газизов Т. Р., Куксенко С. П. Четырехпроводная зеркально-симметричная структура, защищающая от сверхкоротких импульсов // Патент на изобретение № 2624465, опубл. 04.07.2017, бюл. № 7.

21. Шарафутдинов В. Р., Газизов Т. Р., Медведев А. В. Способ трёхкратного резервирования межсоединений // Патент РФ на изобретение № 2738955, опубл. 21.12.2020, бюл. № 36.

22. Черникова Е. Б., Клюкин Д. В. Устройство защиты от импульсных сигналов с опорным проводником в виде боковых полигонов и наличием комбинационных импульсов во временном отклике // Патент РФ на изобретение № 2834342, опубл. 07.02.2025, бюл. №4.

23. Красноперкин В. М., Самохин Г. С., Силин Р. А. Импульсные сигналы в связанных линиях передачи // Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника. 1983. Т. 7. № 355. С. 3–8.

24. Belousov A. O., Chernikova E. B., Samoylichenko M. A., Nosov A. V., Gazizov T. R., Zabolotsky A. M. From symmetry to asymmetry: the use of additional pulses to improve protection against ultrashort pulses based on modal filtration // *Symmetry*. 2020. Vol. 12. № 7. P. 1–38.

25. Chernikova E. B. The Influence of asymmetry on the appearance of combinational pulses in transmission lines with inhomogeneous dielectric filling // International conference on industrial engineering, applications and manufacturing (ICIEAM). – Sochi, Russian Federation, 20–24 May, 2024. – P. 368–373.

26. Система TUSUR.EMC [Электронный ресурс]. 01.06.2016. – URL: <https://emc.tusur.ru/talgat-software/> (дата обращения 24.01.2025).

27. Черникова Е. Б. Параметрическая оптимизация асимметричных многопроводных линий передачи с учетом комбинационных импульсов // Журнал радиоэлектроники. 2024. № 6. С. 1–23.

References

1. Li E. P., Wei X. C., Cangellaris A. C., Liu E. X., Zhang Y. J., D'Amore M. Progress review of electromagnetic compatibility analysis technologies for packages, printed circuit boards, and novel interconnects. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2010, vol. 52, no. 2, pp. 248–265.

2. Pissoort D., Lannoo J., Van Waes J., Degraeve A., Boydens J. Techniques and measures to achieve EMI resilience in mission- or safety-critical systems. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, 2017, vol. 6, no. 4, pp. 107–114.

3. Radasky W. A., Hoad R. Recent developments in high power EM (HPEM) standards with emphasis on high altitude electromagnetic pulse (HEMP) and intentional electromagnetic interference (IEMI). *IEEE Letters on Electromagnetic Compatibility Practice and Applications*, 2020, vol. 2, no. 3, pp. 62–66.

4. Gizatullin Z. M. *Pomekhoustojchivost' sredstv vychislitel'noj tekhniki vnutri zdaniy pri shirokopolosnyh elektromagnitnyh vozdeystviyah. Monografija* [The Immunity of Computer Equipment inside Buildings with Broadband Electromagnetic Effects. Monography]. Kazan, Kazan State Technical University Publ., 2012. 254 p. (in Russian).

5. Mora N., Vega F., Lugin G., Rachidi F., Rubinstein M. Study and Classification of Potential IEMI Sources. *System and Assessment Notes*, 8 July 2014, note 41, 92 p.

6. Mojert C. UWB and EMP susceptibility of microprocessors and networks. *14th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 2001, pp. 47–52.

7. Batalov L. V., Zhukovsky M. I., Kirichek R. V., Lazarev B. N. Information protection against intentional electromagnetic influences. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2012, no. 2 (78), pp. 103–108 (in Russian).

8. Gazizov T. R. *Elektromagnitnaya sovmestimost' i bezopasnost' radioelektronnoj apparatury* [Electromagnetic Compatibility and Safety of Radioelectronic Equipment]. Tomsk, TML-Press, 2007. 256 p. (in Russian).

9. Hong J. S. *Microstrip filters for RF/microwave applications*. Wiley, New York, 2011. 477 p.

10. Weber T., Krzikalla R., ter Haseborg J. L. Linear and nonlinear filters suppressing UWB pulses. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2004, vol. 46, no. 3, pp. 423–430.

11. Wang S., Lee F. C., Chen D. Y., Odendaal W. G. Effects of parasitic parameters on EMI filter performance. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2004, vol. 19, no. 3, pp. 869–877.

12. Han S. M., Huh C. S., Choi J. S. A validation of conventional protection devices in protecting emp threats. *Progress in Electromagnetics Research*, 2011, vol. 119, pp. 253–263.

13. Cooray V. *Lightning protection*. UK: Institution of Engineering and Technology, 2010. 1072 p.

14. Gazizov T. R., Zabolotsky A. M. New approach to EMC protection. *18th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 2007, pp. 273–276.

15. Gazizov A. T., Zabolotsky A. M., Gazizov T. R. UWB Pulse Decomposition in Simple Printed Structures. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2016, vol. 58, no 4, pp. 1136–1142.

16. Gazizov A. T., Zabolotsky A. M. Modal'noe razlozhenie impul'sa v otrezkah svyazannyh linij kak novyj princip zashchity ot korotkih impul'sov [Modal Pulse Decomposition in Segments of Coupling Lines as a New Principle of Protection Against Short Pulses]. *Technologies of Electromagnetic Compatibility*, 2006, vol. 18, no. 4, pp. 40–44 (in Russian).

17. Belousov A. O., Gazizov T. R. Systematic approach to optimization for protection against intentional ultrashort pulses based on multiconductor modal filters. *Complexity*, 2018, no. 2018, pp. 1–15.

18. Samotin I. E. Damping of pulse signals in modal filters with high face coupling. *Proceedings of TUSUR University*, 2010, no. 2-2 (22), pp. 169–171 (in Russian).

19. Chernikova E. B., Belousov A. O., Gazizov T.R., Zabolotsky A.M. Using reflection symmetry to improve the protection of radio-electronic equipment from ultrashort pulses. *Symmetry*, 2019, vol. 11 (7), no. 883, pp. 1–25.

20. Zabolotsky A. M., Gazizov T. R., Kuksenko S. P. Four-way mirror-symmetrically structure, protecting from ultrashort impulses. Patent Russia, no. 2624465. 2017.

21. Sharafutdinov V. R., Gazizov T. R., Medvedev A. V. Method of triple backup of interconnections. Patent Russia, no. 2738955, 2020.

22. Chernikova E. B., Klyukin D. V. Protection device against pulse signals with a reference conductor in the form of side polygons and the presence of combinational pulses in the time response. Patent Russia, no. 2834342, 2025.

23. Krasnoperkin V. M., Samokhin G. S., Silin R. A. Impul'snye signaly v svyazannyh liniyah peredachi [Impulse Signals in Coupled Transmission Lines]. *Elektronnaya tekhnika. Ser. Elektronika SVCh*, 1983, vol. 7, no. 355, pp. 3–8 (in Russian).

24. Belousov A. O., Chernikova E. B., Samoylichenko M. A., Nosov A. V., Gazizov T. R., Zabolotsky A. M. From symmetry to asymmetry: the use of additional pulses to improve protection against ultrashort pulses based on modal filtration. *Symmetry*, 2020, vol. 12, no. 7, pp. 1–38.

25. Chernikova E. B. The Influence of asymmetry on the appearance of combinational pulses in transmission lines with inhomogeneous dielectric filling. *International conference on industrial engineering, applications and manufacturing (ICIEAM)*, Sochi, Russia, 20–24 May, 2024, pp. 368–373.

26. Sistema TUSUR.EMC [TUSUR.EMC System]. 24.01.2025. Available at: <https://emc.tusur.ru/talgat-software/> (accessed 24.01.2025) (in Russian).

27. Chernikova E. B. Parametric optimization of asymmetric multiconductor transmission lines taking into account combinational pulses. *Journal of Radio Electronics*, 2024, no. 6, pp. 1–23 (in Russian).

Статья поступила 12 марта 2025 г.

Информация об авторе

Черникова Евгения Борисовна – кандидат технических наук. Доцент кафедры сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: электромагнитная совместимость, устройства защиты на основе модальной фильтрации, аналитические модели для линий передачи. E-mail: evgeniia.b.chernikova@tusur.ru.

Адрес: 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 40.

Protection Device against Pulse Signals with a Reference Conductor in the Form of Side Polygons and the Presence of Combinational Pulses in the Time Response

E. B. Chernikova

Problem statement. In conditions of increasing complexity of electromagnetic environment, increasing operating frequencies, increasing sensitivity of radio-electronic means (REM) and high density of their layout, the urgency of ensuring electromagnetic compatibility is growing. One of the key tasks of EMC is to improve interference immunity and protection of REM from interfering electromagnetic influences. A special danger is posed by ultra-short pulses (USP), including pre-designed electromagnetic effects, which can cause malfunctions in REM functioning or disable their separate elements. Short duration of the impact and a wide band of the USPs spectrum make their suppression by traditional protection devices much more difficult. In this connection there is a necessity to develop new protection devices capable to effectively counteract USP and ensure stable operation of REM. **Purpose** is to present a new device for protection against impulse signals based on a strip structure with a reference conductor in the form of side polygons and the presence of combinational pulses in the time response. **Methods.** In the process of development of the new protection device, the principle of modal decomposition of USP into a sequence of pulses of smaller amplitude was applied due to the difference of modal delays propagating in a strip transmission line with inhomogeneous dielectric filling. To confirm the operability of the proposed solution, quasi-static simulation of the time response of the device to the USP excitation has been performed. The calculation of the primary and secondary per-unit-length parameter matrices was carried out using the method of moments. **Novelty.** A protection device with a reference conductor in the form of side polygons is proposed, differing in diagram asymmetry, realised by connecting two conductors by a bridge at the far end in three different ways, which leads to the formation of a meander line turn consisting of two cascaded half-turns. As a result, in the time response of the device appear combinational pulses with delays that are not multiples of per-unit-length mode delays, which are a new resource for improving the efficiency of protection, as they allow to reduce the amplitude of interference and redistribute the energy in time, improving the protective characteristics of the device. **Results.** A new protection device is developed that provides decomposition of USP into a sequence of pulses of smaller amplitude, including combinational pulses. The proposed device achieves equalisation of time intervals between decomposition pulses, which leads to an increase in the minimum value of the time interval and, as a consequence, in the total duration of the input pulse signal subject to full decomposition. **Practical relevance.** The developed device can be applied in critical radio-electronic systems, including aviation, space and telecommunication complexes, where reliability of operation in the conditions of electromagnetic interference is of paramount importance.

Key words: electromagnetic compatibility, intentional interference, ultrashort pulse, protection device, modal filtration, combinational pulses.

Information about Author

Evgeniya Borisovna Chernikova – Ph.D. of Engineering Sciences. Associate Professor at the Department of microwave and quantum radio engineering, senior researcher of the Research laboratory of fundamental research on electromagnetic compatibility of Tomsk state university of control systems and radioelectronics. Field of research: electromagnetic compatibility, protection devices based on modal filtration, analytical models for transmission lines. E-mail: evgeniia.b.chernikova@tusur.ru

Address: Russia, 634050, Tomsk, Lenina prospekt, 40.