

А.К. Нестеренко, В.П. Костелецкий

Разработка полоскового устройства защиты от сверхкоротких импульсов, работающего в синфазном и дифференциальном режимах

Разработано полосковое устройство защиты от сверхкоротких импульсов, способное работать как в синфазном, так и в дифференциальном режимах. Получены его временные и частотные характеристики. Во временной области устройство показало коэффициент ослабления в 5,26 раза относительно половины ЭДС в синфазном режиме и 5 раз в дифференциальном режиме. В частотной области частота среза составила 308 МГц в синфазном, 312 МГц в дифференциальном режимах.

Ключевые слова: устройство защиты, импульсная помеха, многопроводная линия передачи, синфазный режим, дифференциальный режим.

В настоящее время радиоэлектронные средства (РЭС) часто подвергаются влиянию импульсных помех, таких как сверхширокополосные помехи, включая сверхкороткие импульсы (СКИ) [1]. Компоненты спектра этих сигналов преодолевают традиционные средства защиты с незначительными потерями энергии импульсов [2]. Стандарт ИЕС 61000-2-13 [3] регулирует уровни таких помеховых воздействий. Помехи обычно разделяют на дифференциальные и синфазные [4], а уровни таких помех регулируются стандартом EN 55022 [5].

Для достижения требуемых уровней помехозащиты можно использовать устройства, такие как модальные фильтры, которые ослабляют помехи в обоих режимах воздействия, а также меандровые линии задержки [6, 7]. Традиционные полосковые устройства защиты одновременно неэффективны в синфазном и дифференциальном режимах. Однако есть разработки, которые позволяют ослаблять помеховый сигнал в этих режимах [8]. Таким образом, требуется разработка новых, более эффективных устройств защиты.

Цель работы – разработать полосковое устройство защиты с новым предлагаемым поперечным сечением, работающее в синфазном и дифференциальном режимах.

Параметры защитного устройства и подходы к моделированию

Предлагаемое поперечное сечение защитного устройств изображено на рис. 1. Оно характеризуется следующими параметрами: ширина проводников (w); расстояние между проводниками (s); толщина диэлектрических слоев (h_1); толщина воздушного зазора между слоями (h_2); толщина проводников (t); относительная диэлектрическая проницаемость слоев (ϵ_{r1}); относительная диэлектрическая проницаемость воздушного зазора (ϵ_{r2}). В данной работе используются следующие значения геометрических параметров (мкм): $w = 3000$, $s = 2000$, $h_1 = 350$, $h_2 = 960$, $t = 105$. Значения ϵ_{r1} и ϵ_{r2} равны 10 и 1 соответственно. Параметры поперечного сечения выбраны путем предварительной оптимизации с использованием эвристического поиска. В качестве входного сигнала используется трапецевидный импульс с

амплитудой $E = 1$ В и длительностями фронта, спада и плоской вершины по 100 пс.

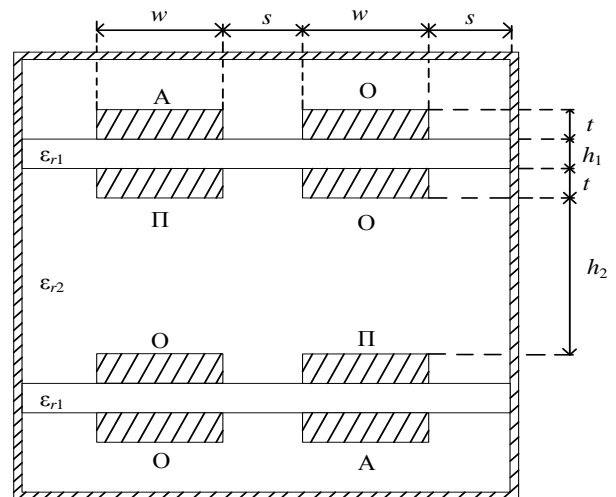


Рис. 1. Поперечное сечение защитного устройства

На рис. 2 показана схема электрических соединений защитного устройства.

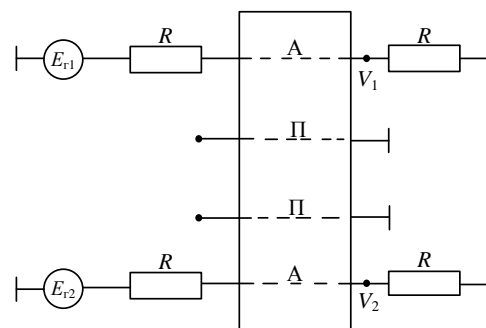


Рис. 2. Схема электрических соединений защитного устройства, где А – активные, П – пассивные проводники

Для моделирования использовалась система TALGAT [9] с применением квазистатического подхода [10], при этом не учитывались потери в проводниках и диэлектриках. В процессе моделирования приняты следующие значения номиналов оконечных нагрузок: сопротивление $R = 50$ Ом, короткое замыкание (КЗ) – 1 мОм, холостой ход (ХХ) 1 МОм. Для создания дифференциального и синфаз-

ного воздействия в схеме используется два источника ЭДС: E_{r1} и E_{r2} . В дифференциальном режиме значение E_{r1} равно $0,5E$, а $E_{r2} = -0,5E$. В синфазном режиме значения E_{r1} и E_{r2} равны E . Напряжения на выходе защитного устройства вычисляются как сумма напряжений в узлах V_1 и V_2 в дифференциальном режиме и как полусумма в синфазном режиме.

Результаты моделирования

Вычисленные матрицы коэффициентов электромагнитной (**L**), электростатической (**C**) индукций, а также матрица характеристического импеданса (**Z**) и задержки (τ) мод имеют вид

$$C = \begin{bmatrix} 822 & -798 & -1,33 & -0,74 \\ -798 & 843 & -1,35 & -1,33 \\ -1,33 & -1,35 & 843 & -798 \\ -0,74 & -1,33 & -798 & 822 \end{bmatrix}, \text{ (пФ/м)},$$

$$L = \begin{bmatrix} 394 & 322 & 0,33 & 0,36 \\ 322 & 372 & 29,8 & 0,33 \\ 0,33 & 29,8 & 372 & 323 \\ 0,36 & 0,33 & 323 & 394 \end{bmatrix}, \text{ (нГн/м)},$$

$$Z = \begin{bmatrix} 76,4 & 68,9 & 5,8 & 6,1 \\ 68,9 & 73 & 5,5 & 5,8 \\ 5,8 & 5,5 & 73 & 68 \\ 6,1 & 5,8 & 68 & 76,4 \end{bmatrix}, \text{ (Ом)},$$

$$\tau = \begin{bmatrix} 4,8 \\ 10 \\ 9,96 \\ 4,9 \end{bmatrix}, \text{ (нс/м)}.$$

Временные отклики на выходе защитного устройства в синфазном и дифференциальном режимах представлены на рис. 3.

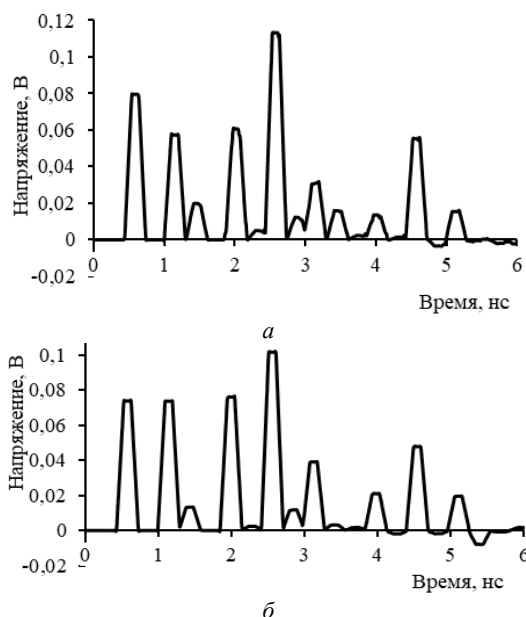


Рис. 3. Формы напряжения на выходе защитного устройства в синфазном режиме – а и в дифференциальном режиме – б

В синфазном режиме на выходе защитного устройства достигнуто максимальное напряжение в 95 мВ, а в дифференциальном режиме выходное напряжение составило 100 мВ. Это соответствует коэффициенту ослабления 5,26 и 5 раз соответственно.

На рис. 4 представлена частотная характеристика защитного устройства в синфазном и дифференциальном режимах. В синфазном режиме защитное устройство имеет частоту среза 308 МГц, а в дифференциальном – 312 МГц.

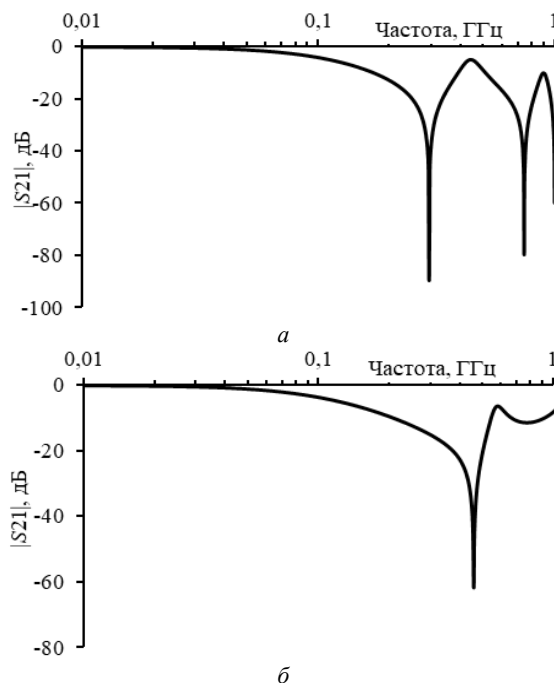


Рис. 4. Частотные характеристики защитного устройства в синфазном режиме – а и в дифференциальном режиме – б

Заключение

Разработано полосковое устройство защиты с новым поперечным сечением, позволяющим снизить влияние помех как в синфазном, так и в дифференциальном режимах. В ходе исследования вычислены временные отклики на выходе полоскового защитного устройства в синфазном и дифференциальном режимах. Максимальное напряжение на выходе защитного устройства составило 95 мВ в синфазном и 100 мВ в дифференциальном режимах при амплитуде входного воздействия 1 В. Это соответствует коэффициенту ослабления 5,26 и 5 раз соответственно. Также вычислены частоты среза защитного устройства, которые составили 308 и 312 МГц в синфазном и дифференциальном режимах.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-01216, <https://rscf.ru/project/23-79-01216>.

Литература

1. Opperman I. UWB Theory and applications / I. Opperman, M. Namalainen, J. Linatti. – Finland, university of Oula, 2004. – 250 p.

2. Weber T. Linear and nonlinear filters suppressing UWB pulses / T. Weber, R. Krzikalla, J.L. Haseborg. // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2004. – Vol. 46, No. 3. – PP. 423–430.

3. МЭК 61000-2-13. Электромагнитная совместимость. – Ч. 2–13: Окружающая среда. Электромагнитные среды высокой мощности (НРЕМ). Излучаемые и проводимые, 2005. – 44 с.

4. Балюк Н.В. Электромагнитная совместимость технических средств подвижных объектов / Н.В. Балюк, В.Г. Болдырев, В.П. Булеков. – М.: МАИ, 2004. – 648 с.

5. СТБ EN 55022. Электромагнитная совместимость. Радиопомехи от оборудования информационных технологий. Нормы и методы измерений, 2012. – 70 с.

6. Газизов Т.Р. Сравнительный анализ двух видов новых устройств для защиты от электромагнитного терроризма // Матер. VII регион. науч.-практ. конф. «Наука и практика: проектная деятельность – от идеи до внедрения». – Томск: ТУСУР, 2018. – С. 623–625.

7. Заболоцкий А.М. Теоретические основы модальной фильтрации / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов // Техника радиосвязи. – 2014. – № 3. – С. 79–83.

8. Костелецкий В.П. Двухкаскадный экранированный модальный фильтр для работы в дифференциальном и синфазном режимах / В.П. Костелецкий, А.М. Заболоцкий, А.М. Лакоза // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). – 2021. – № 4. – С. 127–133.

9. Разработка программного обеспечения для моделирования радиоэлектронных средств с учетом электромагнитной совместимости в ТУСУР / С.П. Куксенко, Т.Р. Газизов, А.А. Квасников и др. // Наноиндустрия, 2023. – Т. 16, № S9-1 (119). – С. 170–178.

10. Куксенко С.П. Усовершенствование алгоритма вычисления методом моментов емкостных матриц структуры проводников и диэлектриков в диапазоне значений диэлектрической проницаемости / С.П. Куксенко, Т.Р. Газизов // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2012. – Т. 17, № 10. – С. 13–21.

Нестеренко Алексей Константинович

Магистрант каф. передовой инженерной школы (ПИШ) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Эл. почта: alex27.11.01@mail.ru

Костелецкий Валерий Павлович

Канд техн. наук, ст. преп. каф. сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники (СВЧиКр) ТУСУРа
Эл. почта: cyanogendone@gmail.com