

УДК 621.391.825

Е.Б. Черникова

Зеркально-симметричная меандровая линия из двух отдельных витков с перемычкой на разных концах линии

Анализируется временной отклик зеркально-симметричных меандровых линий из двух отдельных витков с перемычкой на разных концах линии на воздействие сверхкороткого импульса (СКИ). Выполнено моделирование 3 схем соединения полувитков длиной 1 м. Выявлена возможность появления дополнительных импульсов во временном отклике на выходе. Показано, что значения задержек дополнительных импульсов равны умноженной на длину полувитка сумме двух погонных задержек мод линии. Результаты работы полезны для дальнейшего исследования дополнительных импульсов во временном отклике и установления природы их возникновения.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, устройства защиты, сверхкороткий импульс, модальная фильтрация, меандровая линия, зеркальная симметрия, дополнительные импульсы.

Электромагнитная совместимость (ЭМС) приобретает все большее значение при разработке радиоэлектронных средств (РЭС). Это связано с увеличением числа электронных компонентов на все меньшей площади, повышением верхних частот сигналов и развитием возможностей генераторов преднамеренных электромагнитных воздействий. В этой связи повышается опасность взаимного влияния, что впоследствии может привести к нарушению нормальной работы РЭС, что является недопустимым, особенно для критичных систем. Одним из направлений ЭМС является защита от кондуктивных воздействий, попадающих в РЭС по проводникам [1]. Одним из опасных видов кондуктивных помех являются сверхкороткие импульсы (СКИ) [2].

Для защиты от СКИ можно использовать устройства, которые защищают от импульсных помех. К ним относят пассивные LC- и RC-фильтры, ограничители напряжения, разрядники, варисторы. Между тем из-за ряда недостатков (паразитные параметры, радиационная нестойкость, отказ в функционировании при больших напряжениях, недостаточное быстродействие, дороговизна и т.д.) защита от мощных СКИ может быть затруднительна. Для решения этой задачи предложена новая технология, названная модальной фильтрацией. Ее работа основана на разложении входного импульса (помехи) на последовательность импульсов меньшей амплитуды [3].

Она реализуется с помощью соответствующих устройств защиты: модальных фильтров (МФ) и меандровых линий (МЛ) [4]. Предложен новый подход к повышению характеристик МФ защиты за счет использования зеркальной симметрии в поперечном сечении структур [5]. Представителем таких структур является зеркально-симметричный МФ, который способен уменьшить амплитуду СКИ в 4 раза. При этом обеспечиваются выравненные амплитуды импульсов разложения и временных интервалов между ними [6]. Поперечное сечение и принципиальная схема такого МФ представлены на рис. 1.

Схема зеркально-симметричного МФ дает возможность соединения полувитков перемычками в виде меандровых линий (МЛ) [7]. В результате получается зеркально-симметричная МЛ, состоящая из

2, 3 и 4 полувитков, из 2 отдельных витков с перемычкой на одном конце линии [8] и МЛ, в которой 4 проводника [9] соединены на одном конце.

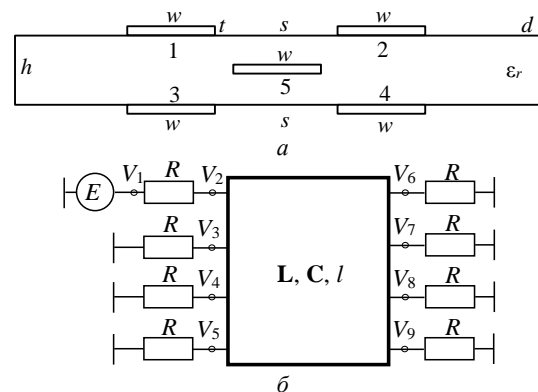


Рис. 1. Поперечное сечение (а) и принципиальная схема (б) зеркально-симметричного МФ

Между тем анализ зеркально-симметричных МЛ позволяет выделить в отдельную группу схемы из двух отдельных витков, где каждый виток состоит из двух проводников (полувитков), соединенных между собой перемычкой на разных концах МЛ. Таким образом, цель работы – исследовать возможность разложения СКИ в таких структурах.

Структуры и схема исследуемых МФ

На ранних этапах исследования новых структур целесообразно использовать моделирование с помощью квазистатического подхода. Оно реализовано в программном комплексе TALGAT [10]. Волновые процессы при этом описываются посредством телеграфных уравнений. Решение их занимает меньше времени, чем решение уравнений Максвелла, при этом точность достаточна даже для моделирования сложных задач [11]. Для этого сначала выполнялось построение поперечных сечений исследуемых структур, вычислялись матрицы погонных коэффициентов электростатической (C) и электромагнитной (L) индукций, затем – матрицы характеристического импеданса (Z) и погонных задержек (τ). Составлялись принципиальные схемы, определялись значения нагрузок и параметры воздействия, затем вычислялся отклик. Потери в диэлектриках и про-

водниках не учитывались (матрицы погонных проводимостей G и сопротивлений R равны нулю), чтобы устранить их влияние.

Исследуются МЛ, где каждый виток состоит из двух проводников (полувитков), соединенных между собой перемычкой на разных концах МЛ. В таком случае проводники могут быть попарно соединены между собой на конце тремя способами (см. поперечное сечение, рис. 1, а): на одном слое (1-2 на дальнем конце и 3-4 на ближнем конце); на разных слоях (1-3 на дальнем конце и 2-4 на ближнем конце); диагонально (1-4 на дальнем конце и 2-3 на ближнем конце). Моделирование выполнялось при оптимальных параметрах поперечного сечения на рис. 1, а, полученных ранее для зеркально-симметричного МФ ($s=510$ мкм, $w=1600$ мкм, $t=18$ мкм, $h=500$ мкм, $\epsilon_r=4,5$). Длина линии $l=1$ м, а значение всех сопротивлений $R=50$ Ом. В качестве воздействия использовался источник ЭДС трапецеидальной формы (амплитуда – 5 В, общая длительность – 150 пс, фронт, спад и плоская вершина по 50 пс).

Результаты моделирования

Полученные формы напряжений на выходе (V_3 на рис. 2, а; V_4 на рис. 2, б и в) представлены на рис. 3.

На полученных формах напряжения наблюдается группа импульсов с задержками равными удвоенным задержкам мод. Помимо этого, обнаружены дополнительные импульсы с отличающимися значениями задержек. Однако это видно только во временном отклике схемы 1 (см. рис. 3, а). Между тем возможно, что дополнительные импульсы присутствуют и во временных откликах схем 2 и 3, но приходят почти одновременно с основными. Для схемы 2 это подтверждается возрастанием суммарной амплитуды импульса между импульсами мод 2 и 3, а для схемы 3 – самого импульса моды 2. Для допол-

нительного подтверждения данного предположения, для схем 2 и 3 введем асимметрию посредством уменьшения лицевой связи между проводниками. Для этого увеличим значение h с 500 до 1000 мкм.

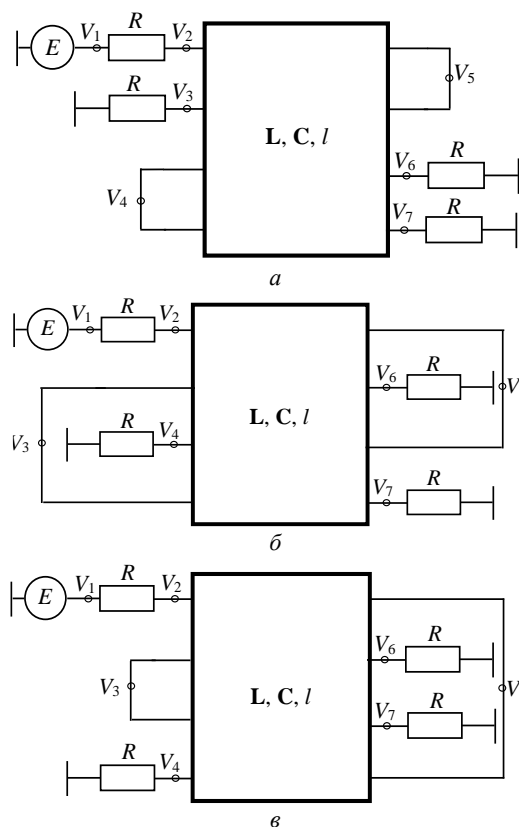


Рис. 2. Схемы соединения из 2 отдельных витков: 1 (а), 2 (б) и 3 (в)

Фрагменты временных откликов на выходе схем 2 и 3 представлены на рис. 4.

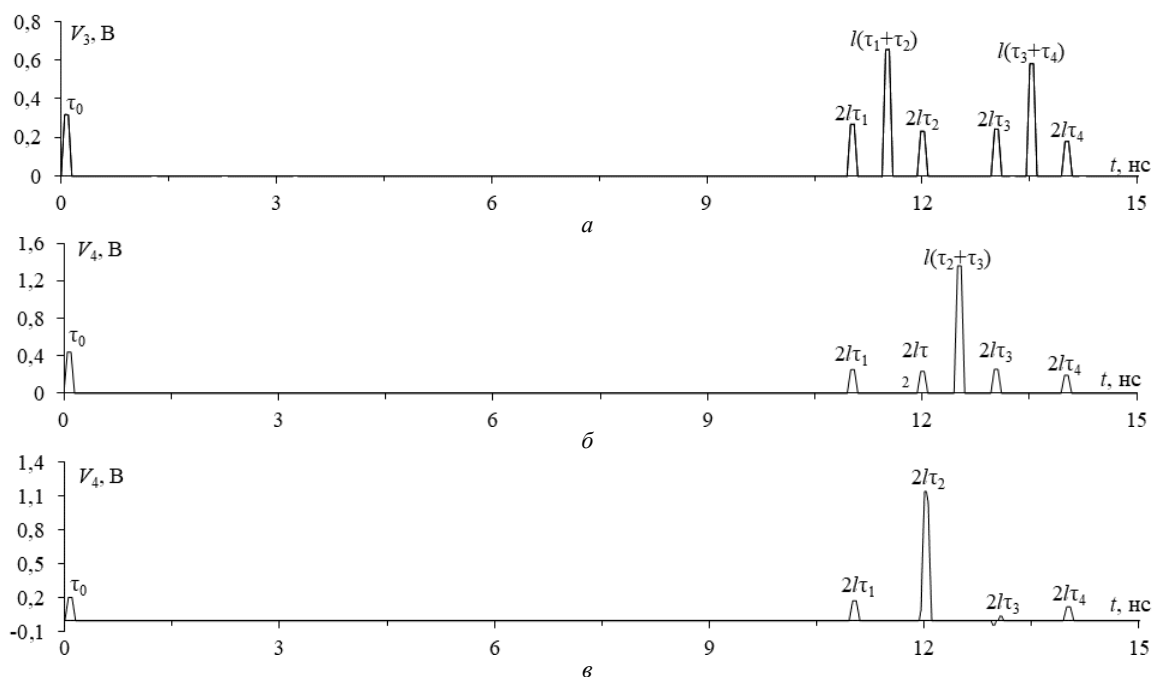


Рис. 3. Формы напряжения на выходе схем 1 (а), 2 (б) и 3 (в) при $l=1$ м

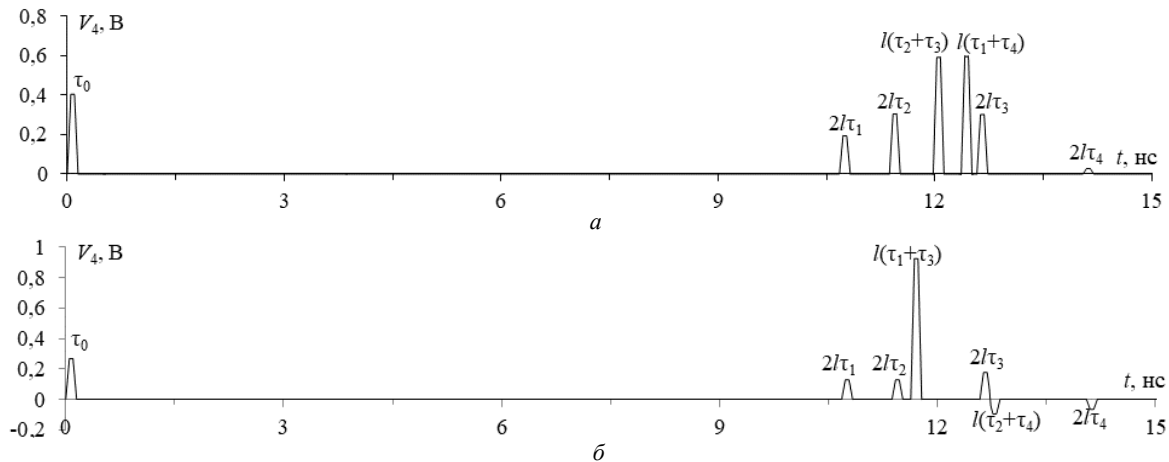


Рис. 4. Формы напряжения на выходе схем 2 (а) и 3 (б) при $h=1000$ мкм

В таблице приведены значения погонных задержек мод 1–4, умноженные на 1 и 2, так как задержки импульсов на входе и выходе зеркально-симметричной МЛ кратны двум погонным задержкам для $l = 1$ м и $h = 500$ и 1000 мкм.

**Значения погонных задержек импульсов (нс/м)
для мод 1–4, умноженные на 1 и 2**

Множитель	1	2	3	4
1	5,47587	5,96472	6,47973	6,97027
2	10,9517	11,9294	12,9595	13,9405
2 ($h = 1000$ мкм)	10,6792	11,3705	12,5805	14,047

Из анализа таблицы и рис. 3, 4 видно, что задержки дополнительных импульсов равны умноженной на l сумме погонных задержек мод в различных вариантах. Задержки равны для схем:

- 1 – $l(\tau_1 + \tau_2) = 11,44$ нс и $l(\tau_3 + \tau_4) = 13,45$ нс;
- 2 – $l(\tau_2 + \tau_3) = 11,97$ нс и $l(\tau_1 + \tau_4) = 12,36$ нс;
- 3 – $l(\tau_1 + \tau_3) = 11,62$ нс и $l(\tau_2 + \tau_4) = 12,72$ нс.

Но из-за симметрии задержки дополнительных импульсов могут совпадать между собой (как в схеме 2) или с основными (как в схеме 3).

Заключение

Таким образом, показана возможность разложения СКИ в зеркально-симметричной МЛ из двух отдельных витков с перемычкой на разных концах линии. Такая конфигурация устройства защиты позволяет разложить СКИ на 7 импульсов меньшей амплитуды: импульс 1 с задержкой τ_0 – перекрестная наводка на ближнем конце линии, импульсы 2–5 с задержками $2l\tau_1$ – $2l\tau_4$ – последовательность из основных 4 импульсов ($2l\tau_1$, $2l\tau_2$, $2l\tau_3$, $2l\tau_4$) и еще 2 дополнительных импульса со значениями задержек, которые равны умноженной на l сумме двух погонных задержек мод линии. Максимальное значение амплитуд импульсов во временном отклике зеркально-симметричной МЛ для каждой схемы определяется именно значением амплитуды дополнительных импульсов. Этот факт можно использовать при оптимизации.

Примечательна схема 1, на выходе которой получена последовательность импульсов с почти та-

кими же значениями максимальной амплитуды (0,6573 В) и временных интервалов ($\approx 0,488$ нс/м), как у зеркально-симметричного МФ (0,625 В и 0,5 нс/м соответственно). Что касается длительности разлагаемого входного сигнала (или его части), которая должна быть не больше минимальной разности задержек мод МФ, а с учетом дополнительных импульсов – даже половины этого значения (так как между основными импульсами появляется дополнительный), то в данной схеме минимальный временной интервал между импульсами разложения равен 0,48 нс/м, из чего ясно, что СКИ длительностью t_{Σ} в линии передачи длиной $l = 1$ м полностью разложится при таком же условии, как и у зеркально-симметричного МФ. Между тем здесь требуется не 6 резисторов, а лишь 2.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-19-00424).

Литература

1. Gizatullin Z.M. Investigation of the immunity of computer equipment to the power-line electromagnetic interference / Z.M. Gizatullin, R.M. Gizatullin // J. of Communications Technology and Electronics. – 2016. – No. 5. – P. 546–550.
2. Mora N. Study and classification of potential IEMI sources / N. Mora, F. Vega, G. Lugrin, F. Rachidi, M. Rubinstein // System and assessment notes. – 8 July 2014. – № 41. – 92 с.
3. Самотин И.Е. Условие выравнивания амплитуд импульсов на выходе модального фильтра // Технологии ЭМС. – 2010. – № 4 (35). – С. 31–34.
4. Gazizov A.T. UWB pulse decomposition in simple printed structures / A.T. Gazizov, A.M. Zabolotsky, T.R. Gazizov // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2016. – Vol. 58, № 4. – P. 1136–1142.
5. Chernikova, E.B. Using reflection symmetry to improve the protection of radio-electronic equipment from ultrashort pulses / E.B. Chernikova, A.O. Belousov, T.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky // Symmetry. – 2019. – Vol. 11 (7), No. 883. – P. 1–25.
6. Заболоцкий А.М. Использование зеркальной симметрии для совершенствования модальной фильтрации / А.М. Заболоцкий // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 2(36). – С. 41–44.
7. Belousov A.O. From symmetry to asymmetry: the use of additional pulses to improve protection against ultrashort

pulses based on modal filtration / A.O. Belousov, E.B. Chernikova, M.A. Samoylichenko, A.V. Medvedev, A.V. Nosov, T.R. Gazizov and A.M. Zabolotsky // *Symmetry*. – 2020. – Vol. 12 (7), No. 1117. – P. 1–38.

8. Черникова Е.Б. Зеркально-симметричная меандровая линия, защищающая от сверхкоротких импульсов // Системы управления, связи и безопасности. – 2020. – № 2. – С. 280–293.

9. Chernikova E.B. Modal decomposition of an ultrashort pulse in the reflection symmetric meander line with conductors connected at one end // Сб. избран. статей междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2020». – Томск, Россия, 13–30 мая, 2020. – Ч. 2. – С. 317–320.

10. Kuksenko S.P. Preliminary results of TUSUR University project for design of spacecraft power distribution network: EMC simulation // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – Vol. 560. – № 012110. – P. 1–7.

11. Orlov P.E. Quasistatic and electromagnetic simulation of interconnects of printed circuit boards with modal resonance / P.E. Orlov, E.N. Buichkin / 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. – Erlagol, Altai, June 29–July 3. – 2017. – P. 54–58.

Черникова Евгения Борисовна

Аспирант каф. телевидения и управления (ТУ)
Томского государственного ун-та
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0003-1964-7616
Тел.: +7-923-407-47-23
Эл. почта: chiernikova96@mail.ru