

## Анализ разложения сверхкороткого импульса в зеркально-симметричной меандровой линии из двух последовательно соединенных полувитков

**Черникова Евгения Борисовна**

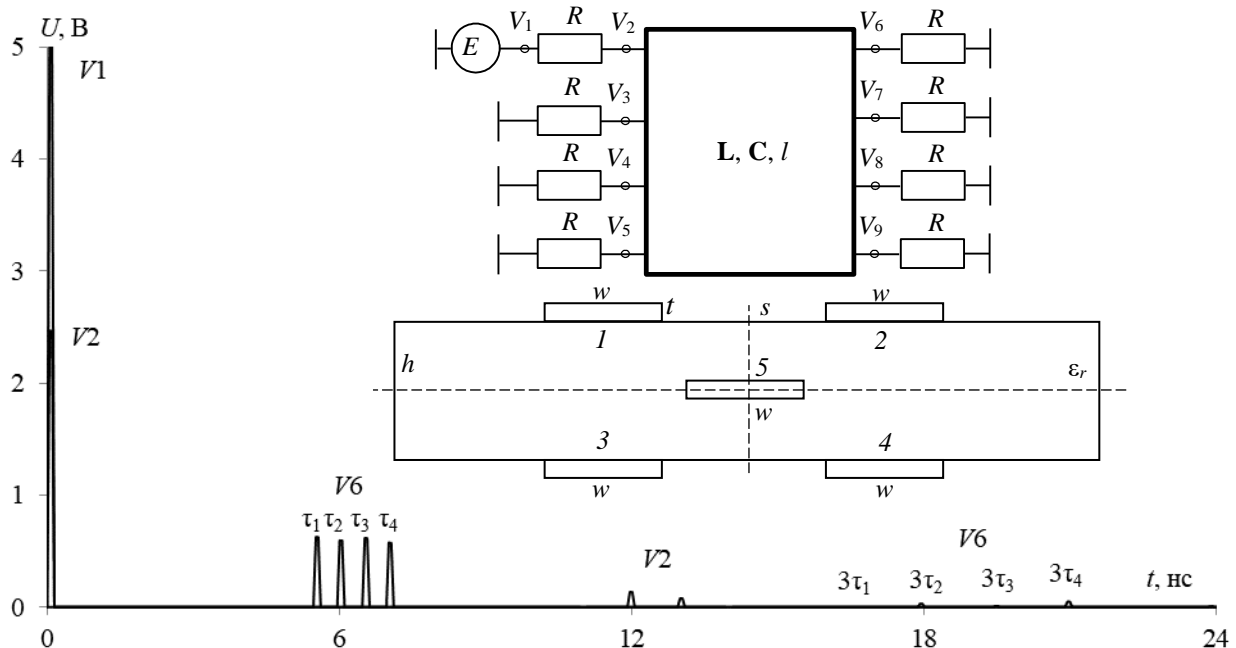
Белусов Антон Олегович, Газизов Тальгат Рашитович

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

E-mail: [chiernikova96@mail.ru](mailto:chiernikova96@mail.ru)

В последние годы наблюдается массовое применение радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) практически во всех областях жизнедеятельности человека. Однако уязвимость РЭА к электромагнитным воздействиям может повлечь за собой нежелательные последствия, например, периодические сбои в работе важных установок. Одной из причин нарушения работы РЭА могут являться кондуктивные помехи, которые проникают в аппаратуру непосредственно по проводникам [1]. Типовым примером опасного кондуктивного воздействия является сверхкороткий импульс (СКИ) [2]. Это сверхширокополосный импульс малой длительности, имеющий как естественное, так и искусственное происхождение, воздействие которого может быть опасно для РЭА, особенно для критичной. Известные технические решения не дают эффективной защиты РЭА от подобной угрозы. Для защиты РЭА от СКИ предложена технология модальной фильтрации, основанная на модальном разложении импульса на импульсы меньшей амплитуды из-за разницы задержек мод. Эта технология может быть реализована на основе модальных фильтров (МФ) и меандровых линий (МЛ) [3].

Кроме того, известен подход к совершенствованию модальной фильтрации за счет использования зеркальной симметрии. Такой подход реализован в устройстве, названном зеркально-симметричным МФ. Он представляет собой 5 в поперечном сечении одинаковых и прямоугольных проводников на диэлектрическом слое (см. поперечное сечение на *рис. 1*), причем проводники 1 и 2 расположены на одной его стороне, два дополнительных проводника расположены зеркально-симметрично относительно проводников 1 и 2 на обратной стороне диэлектрического слоя, а опорный проводник 5 расположен в диэлектрическом слое на равном расстоянии от внешних проводников [4] (*рис. 1*). Зеркально-симметричный МФ примечателен тем, что за счет обеспечения одновременно лицевой и торцевой связей между проводниками при определенных параметрах позволяет получить разложение СКИ на выходе линии с близкими значениями амплитуд импульсов и временных интервалов между импульсами разложения (*рис. 1*).



*Рис. 1* Принципиальная схема, поперечное сечение и разложение СКИ в зеркально-симметричном МФ

Таким образом, представляется возможным исследование МЛ на основе зеркально-симметричного МФ. До сих пор в качестве устройства защиты такая конфигурация не рассматривалась. Между тем анализ позволяет выделить несколько вариантов ее схемного исполнения (*рис. 2*) в зависимости от соединения полувитков длиной  $l$ . Целью данной работы является исследование возможности разложения СКИ в зеркально-симметричных МЛ, в которых сигнал проходит путь от генератора до нагрузки длиной  $2l$ , т.е. по 2 последовательно соединенным полувиткам.

Таким образом, рассматриваются 3 варианта витка МЛ: когда полувитками являются пары проводников, расположенных сверху, сбоку и диагонально (см. поперечное сечение на рис. 1). На концах 2 оставшихся пассивных проводников подключены резисторы. В результате, исследуются структуры со схемами, показанными на рис. 2.

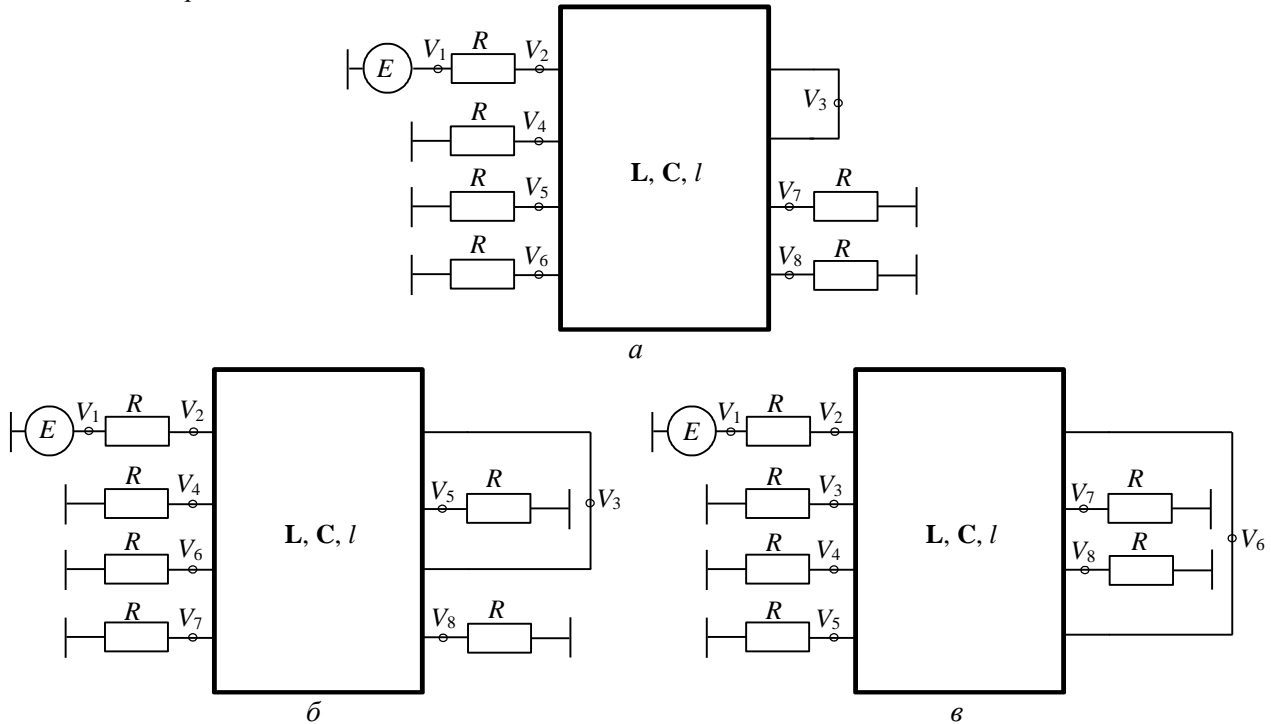
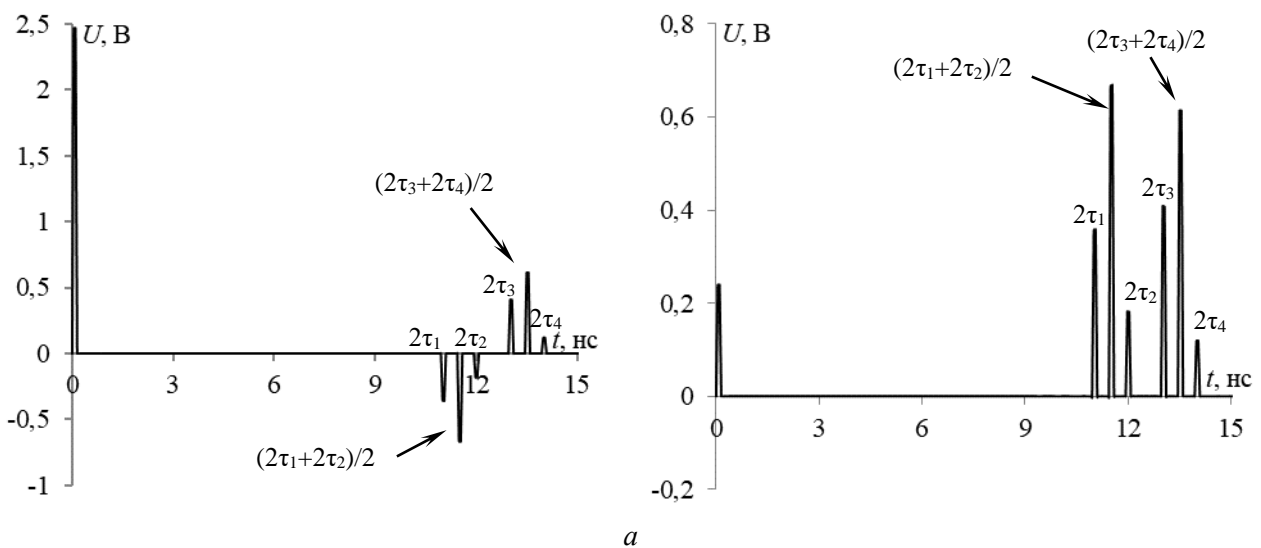


Рис.2 Принципиальные схемы соединения полувитков: 1 (а), 2 (б) и 3 (в)

Выполним квазистатическое моделирование при  $l=1$  м и  $R=50$  Ом в программном продукте TALGAT [5], который дает приемлемую точность и не требует высоких вычислительных затрат [6]. Потери в проводниках и диэлектриках на данном этапе исследования не учитывались. В качестве воздействия использовался источник ЭДС в форме трапеции с амплитудой 5 В с длительностями фронта, спада и плоской вершины по 50 пс, так что общая длительность составила 150 пс ( $V_1$  на рис. 1). Поперечное сечение указанных структур представлено на рис. 1, где  $w$  – ширина проводников,  $s$  – расстояние между проводниками,  $t$  – толщина проводников,  $h$  – толщина диэлектрика,  $\epsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость подложки. Моделирование выполнялось при  $s=510$  мкм,  $w=1600$  мкм,  $t=18$  мкм,  $h=500$  мкм,  $\epsilon_r=4,5$ .

Полученные формы напряжений на входе (узлы  $V_2$  на рис. 2 а, б и в) и выходе (узлы  $V_4$  на рис. 2 а,  $V_6$  на рис. 2 б и  $V_5$  на рис. 2 в), представлены на рис. 3.



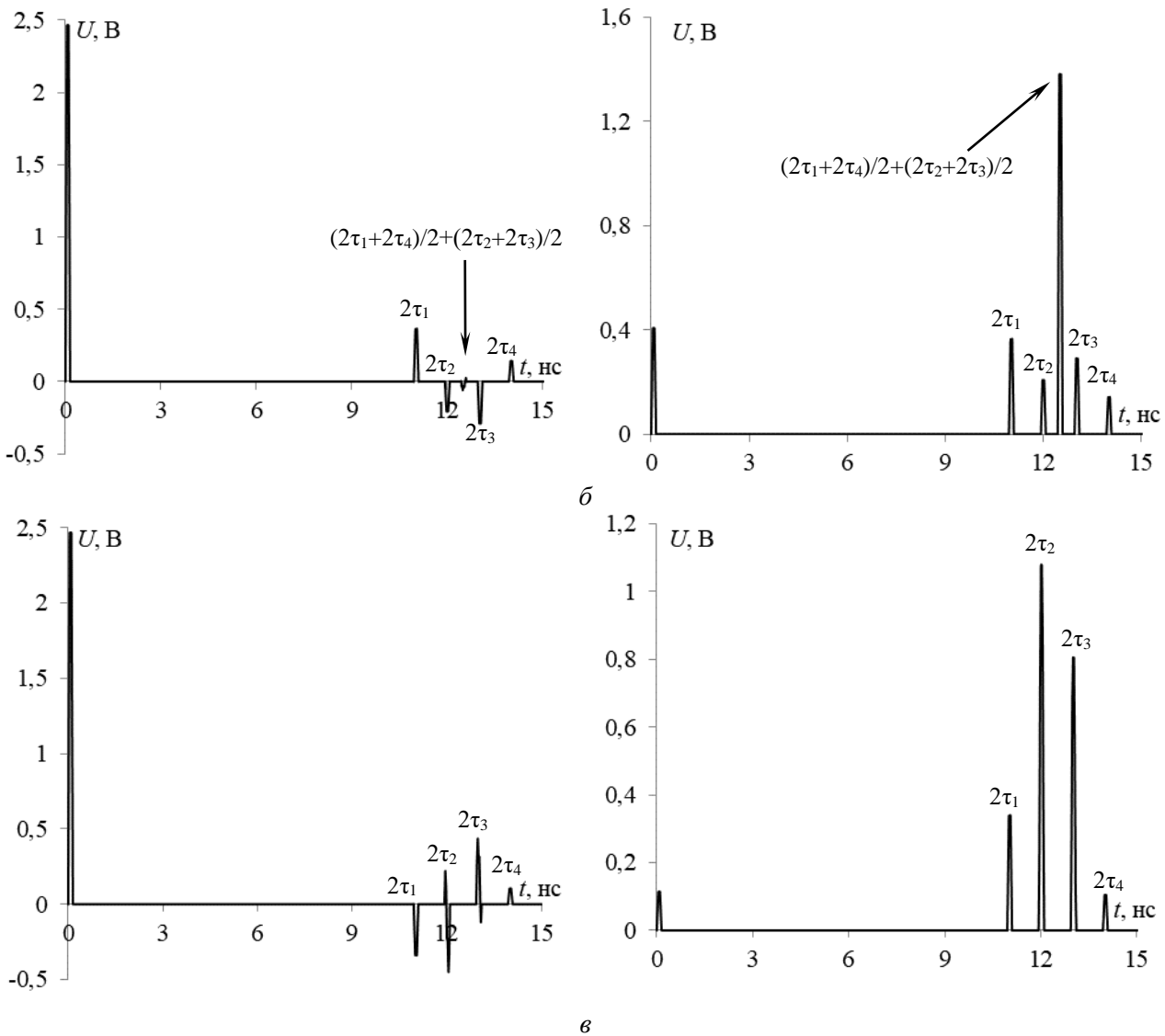


Рис.3 Формы напряжения на входе (слева) и выходе (справа) схем: 1 (а), 2 (б) и 3 (в)

На полученных формах напряжений наблюдается группа импульсов, задержки которых кратны 2 погонным задержкам. На входе всех схем наблюдаются импульсы отрицательной полярности. Для схемы 1 это основные импульсы мод 1 и 2, а для схемы 2 это основные импульсы мод 2 и 3, в то время как для схемы 3 оценка импульсов затруднительна ввиду их частичного наложения. Между тем на выходе импульсы отрицательной полярности не наблюдаются. Наличие таких импульсов можно объяснить отражениями от перемычки. В зеркально-симметричном МФ на всех концах проводников расположены резисторы, улучшающие согласование всех мод, тогда как перемычка в зеркально-симметричной МЛ ухудшает согласование мод. Таким образом, рассматриваемые схемы являются гибридом МФ и МЛ.

Важной особенностью временных откликов является наличие среди импульсов с задержками, кратными 2 погонным задержкам мод, дополнительных импульсов с задержками не кратными погонным. В явном виде это показано только для схем 1 и 2. Однако можно предположить, что такие импульсы существуют и для схемы 3. Об этом можно судить по возрастанию суммарной амплитуды импульсов мод 2 и 3.

Из анализа рис. 3 видно, что задержки дополнительных импульсов равны среднеарифметическому значению двух погонных задержек мод в разных вариантах. Так, для схемы 1 эти задержки равны  $(2\tau_1+2\tau_2)/2$  и  $(2\tau_3+2\tau_4)/2$ , для схемы 2 –  $(2\tau_1+2\tau_4)/2$  и  $(2\tau_2+2\tau_3)/2$ , а для схемы 3 –  $(2\tau_1+2\tau_3)/2$  и  $(2\tau_2+2\tau_4)/2$ . В схеме 2 на входе и выходе наблюдаются дополнительные импульсы, пришедшие в одно время, так что их задержка принимает вид  $(2\tau_1+2\tau_4)/2+(2\tau_2+2\tau_3)/2$ .

Максимальная амплитуда на выходе зеркально-симметричной МЛ для всех схем определяется именно амплитудой дополнительных импульсов, что является новым ресурсом для оптимизации. Исходя из этого полезно оптимизировать зеркально-симметричную МЛ по критериям выравнивания временных интервалов между всеми импульсами разложения (в том числе между дополнительными) и минимизации максимальной

амплитуды на выходе МЛ для увеличения ослабления СКИ. Что касается ослабления в рассмотренных случаях, то наименьшее пиковое значение напряжения (около 0,66 В) получено для схемы 1, и оно почти такое же, как у зеркально-симметричного МФ.

Подобное разложение возможно и для других сигналов, например, для Гауссова импульса, а также для более сложных видов импульсов, таких как электростатический разряд [7]. Однако следует учитывать, что длительность разлагаемой части входного сигнала должна быть не больше разности задержек мод МФ.

Таким образом, в работе показана возможность разложения СКИ в зеркально-симметричной МЛ из 2 последовательно соединенных полувитков. Более детальный анализ результатов моделирования временного отклика полезен и будет выполнен в дальнейшем.

#### Список публикаций:

- [1] Gizatullin Z. M., Gizatullin R. M. // *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2016. № 61(5). С. 546–550.
- [2] Mora N., Vega F., Lugrin G., Rachidi F., Rubinstein M. // *System and assessment notes*. 2014. № 41.
- [3] Gazizov A. T., Zabolotsky A. M., Gazizov T. R. // *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2016. № 58(4). С. 1136–1142.
- [4] Zabolotsky A. M., Gazizov T. R., Kuksenko S. P. *Four-way mirror-symmetrically structure, protecting from ultrashort impulses*. Patent RF. No 2624465. 2017.
- [5] Kuksenko S. P., Gazizov T. R., Zabolotsky A. M., Ahunov R. R., Surovtsev R. S., Salov V. K., Lezhnin Eg. V. // *Proc. of the 2015 Int. Conf. on Modeling, Simulation and Applied Mathematics (MSAM2015)*. P. 293–301.
- [6] Orlov P. E., Buichkin E. N. // *18th International conference on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM-2017)* P. 54–58.
- [7] Nosov A. V., Surovtsev R. S., Gazizov T. R. *Investigation of possibility of protection against electrostatic discharge using meander microstrip line* // *Journal of physics: conference series [Electronic resources]*. 2018. Vol. 1015, no. 2. P. 1–6.