

УДК 621.3

С. Карри, Р.С. Суворцев

## Анализ влияния потерь в проводниках и диэлектрике на форму и амплитуду сверхкороткого импульса в защитной меандровой линии

Представлены результаты квазистатического и электродинамического анализов влияния потерь в проводниках и диэлектрике на форму и амплитуду сверхкороткого импульса (СКИ) в витке микрополосковой линии с сильной торцевой связью, свернутом в 19 витков со слабой связью. Выявлено, что влияние потерь на форму импульсов незначительно, а их амплитуда уменьшается на 26,1% при квазистатическом и на 28,4% при электродинамическом анализе. Потери в проводниках оказывают более существенное влияние на уменьшение амплитуды импульсов разложения СКИ (до 24% при квазистатическом и 26,9% при электродинамическом анализе). Совместное влияние потерь приводит к уменьшению амплитуды СКИ в 1,4 раза. Сделаны предположения о возможных причинах незначительных различий результатов (не более 2,5% по амплитуде) двух использованных подходов к моделированию.

**Ключевые слова:** электромагнитная совместимость, меандровая линия, сверхкороткий импульс, потери в линиях передачи, рассеяние мощности.

Стремительное развитие современных радиоэлектронных средств (РЭС) не только позволяет проектировать компактные и многофункциональные устройства, работающие на повышенных частотах, но также и приводит к ужесточению требований по обеспечению их электромагнитной совместимости (ЭМС). Несоблюдение требований ЭМС может привести к сбоям в работе и даже полному выходу РЭС из строя [1]. Одной из задач ЭМС является обеспечение защиты от электромагнитных воздействий, среди которых к наиболее опасным относится сверхкороткий импульс (СКИ). Такие импульсы за счет широкой полосы могут проникать внутрь РЭС, минуя его средства защиты, а за счет высокой амплитуды мгновенно выводить чувствительные цепи из строя. Для предотвращения отказа РЭС зачастую приходится прибегать к применению сложных многоуровневых и дорогостоящих систем защиты, которые зачастую часто не эффективны из-за малого быстродействия, недостаточной рассеиваемой мощности или ограниченного ресурса срабатывания их компонент [2]. Между тем поиск новых устройств и подходов для защиты РЭС от СКИ по-прежнему актуален. В связи с этим примечателен подход, основанный на явлении модального разложения сигнала на последовательность импульсов в полосковых структурах в форме меандровой линии (МЛ) [3].

Применение МЛ в качестве устройств защиты требует детального исследования влияния различных факторов на искажение формы сигнала на выходе линии. Наибольшее влияние на форму и амплитуду сигнала оказывают потери в линии. В общем случае в линии существуют три вида потерь: в проводниках, диэлектрике и на излучение. Влияние потерь в защитной МЛ исследовано ранее, но лишь на примере одного витка МЛ [4, 5]. Выявлено, что на форму и амплитуду импульсов разложения в конце МЛ наибольшее влияние оказывают потери в диэлектрике [4]. Между тем влияние потерь на искажение сигнала может существенно различаться в линиях с равной общей длиной, но разной конфигурацией проводника и

изготовленной на основе других материалов подложки. Примером является случай, когда необходимо уместить виток МЛ в заданной площади при неизменной общей длине линии. Тогда прибегают к сворачиванию исходного витка МЛ с сильной торцевой связью в меандр из  $N$  витков со слабой связью. Анализ влияния потерь на искажение формы сигнала в такой структуре ранее не выполнялся. Поэтому цель данной работы – выполнить анализ влияния потерь в проводниках и диэлектрике на форму и амплитуду сигнала в конце МЛ с витками со слабой связью. Для достоверности результатов целесообразно выполнить моделирование квазистатическим и электродинамическим подходами.

### Параметры исследуемой МЛ

Исходная линия состоит из двух сигнальных проводников, соединенных на одном конце и лежащих на диэлектрической подложке, и опорного проводника в виде идеально проводящей плоскости (рис. 1, а). Основа линии выполнена из двустороннего фольгированного материала Rogers 4003С с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r = 3,38 \pm 0,05$ , измеренной на частоте 10 ГГц (при  $T = 23$  °С), с толщинами диэлектрика 0,508 мм и фольги 35 мкм. Ближний конец первого проводника линии длиной  $l$  соединен с источником сигнала, представленным на схеме идеальным источником ЭДС с внутренним сопротивлением  $R_1$ , а ближний конец второго – с приемным устройством, представленным сопротивлением  $R_2$  (см. рис. 1, б). Значения сопротивлений приняты по 50 Ом.

Значения  $w = 300$  мкм и  $s = 100$  мкм обеспечивают погонные задержки четной и нечетной мод 5,41 и 4,81 нс/м соответственно, что позволяет разложить при длине  $l = 1$  м СКИ с длительностью 1,2 нс, без учета влияния потерь и дисперсии [6].

Рассмотрена аналогичная линия длиной 1 м на плате с размером  $80 \times 80$  мм<sup>2</sup>. Для размещения исходной МЛ на плате сформирован меандр из  $N$  витков со слабой связью между ними для минимизации перекрестных связей. Поперечное сечение и схема соединения приведены на рис. 2.

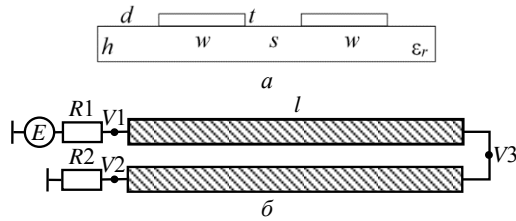


Рис. 1. Поперечное сечение (а) и схема соединения (б) исходной МЛ

Для минимизации перекрестных связей принято  $s_2=10w$ . Для возможности проведения измерений такой линии необходим монтаж соединителей для подключения измерительной аппаратуры. Поэтому из исходного витка МЛ сформирована линия с  $N=19$  и длиной полувитка  $l_{\pi}=65,86$  мм (без учета скруглений на конце). При этом общая длина проводника линии составила 2502,68 мм.

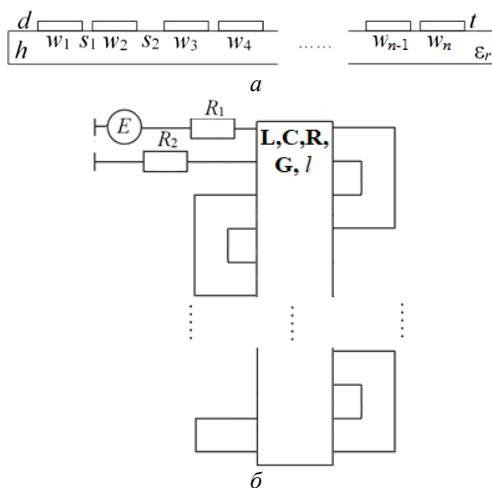


Рис. 2. Поперечное сечение (а) и схема соединений (б) МЛ с витками со слабой связью

### Результаты моделирования

В качестве воздействующего сигнала принят импульс трапецеидальной формы с общей длительностью 900 пс (длительности фронта, плоской вершины и спада по 300 пс). Для учёта потерь при квазистатическом анализе вычислены погонные матрицы  $\mathbf{R}$  (потерь в проводниках) и  $\mathbf{G}$  (потерь в диэлектрике), которые затем использованы для вычисления временного отклика. Вычисление матрицы  $\mathbf{G}$  выполнено с учетом тангенса угла диэлектрических потерь материала  $\tan\delta=0,0027$ , а матрицы  $\mathbf{R}$  – скин-эффекта, эффекта близости и потерь в плоскости земли [7].

На рис. 3 представлены результаты, полученные при квазистатическом и электродинамическом анализе. Из результатов видно, что полученные формы сигнала хорошо согласуются качественно и количественно для всех рассматриваемых случаев учета потерь. Так, в конце линии наблюдаются три основных импульса, а учет потерь приводит к характерному сглаживанию (из-за затягивания фронта и спада) форм сигнала. Из результатов также видно, что потери в диэлектрике лишь несущественно влияют на форму сигнала. Очевидно, что это связано с малыми потерями в проводниках в связи с малым значением  $\tan\delta$ . Максимальное уменьшение амплитуды по результатам квазистатического анализа составило 7 мВ (2,8% от максимальной амплитуды), а электродинамического – 6 мВ (2,5%). Потери в проводниках оказывают более существенное влияние на форму сигнала: максимальная амплитуда сигнала по результатам квазистатического анализа уменьшается с 251 до 191 мВ (24% от максимальной амплитуды), а электродинамического – с 257 до 188 мВ (26,9%).

Для наглядности в таблицу сведены вычисленные амплитуды первого ( $V1$ ), второго ( $V2$ ) и третьего ( $V3$ ) импульсов разложения.

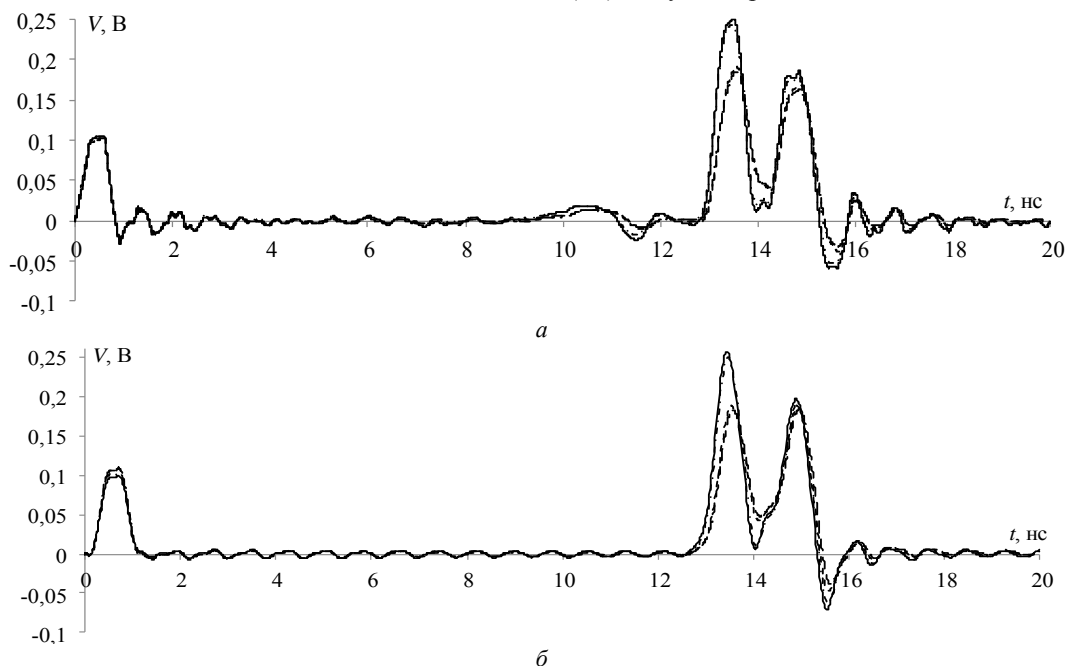


Рис. 3. Формы напряжения в конце линии без учёта потерь (—), с учётом потерь в проводниках (---), диэлектрике (-.-), в проводниках и диэлектрике (-.-), полученные при квазистатическом (а) и электродинамическом (б) анализах

В таблице потери в проводниках обозначены как I, в диэлектрике – II, на излучение – III. При электродинамическом анализе учитываются все типы волн. Поэтому в результатах моделирования всегда учитываются потери на излучение.

**Вычисленные амплитуды импульсов разложения (V, мВ)**

Вид потерь			V1	V2	V3
I	II	III			
Квазистатистический анализ					
-	-	-	105	251	187
+	-	-	102	191	169
-	+	-	105	244	179
+	+	-	102	186	163
Электродинамический анализ					
-	-	+	99	257	197
+	-	+	106	188	188
-	+	+	103	251	193
+	+	+	110	183	184

Из таблицы видно, что при электродинамическом анализе учёт потерь приводит к увеличению амплитуды первого импульса V1 (перекрёстной наводки) и уменьшению амплитуды импульсов разложения (четной V2 и нечетной V3 мод). В результате потери оказывают наибольшее влияние на второй импульс (нечетную моду), тогда как амплитуда третьего импульса (четной моды) при учёте всех потерь уменьшается на 13 и 6,7% по результатам квазистатистического и электродинамического анализов соответственно. Причиной незначительных различий между формами и амплитудами сигнала (не более 2,5%), вероятно, является учёт потерь на излучение при электродинамическом анализе.

**Заключение**

Представлены результаты квазистатистического и электродинамического анализов влияния потерь на форму и амплитуду СКИ в витке МЛ с сильной торцевой связью, свернутом в N = 19 витков со слабой связью для размещения на печатной плате размером 80×80 мм<sup>2</sup>. В результате выявлено, что потери в диэлектрике оказывают влияние лишь на изменение формы и амплитуды второго и третьего импульсов разложения СКИ в конце витка МЛ, однако это влияние не существенно (не более 2,8%). Столь слабое влияние потерь в диэлектрике обусловлено малым тангенсом угла диэлектрических потерь материала. Потери в проводниках оказывают более существенное влияние на уменьшение амплитуды импульсов разложения (до 26,9%). Наибольшее влияние потери в линии оказывают на изменение амплитуды второго импульса, в результате чего ослабление СКИ в линии

увеличивается в 1,35 раза, поскольку амплитуда второго импульса является максимальной. Причиной незначительных (не более 2,5% по амплитуде) различий результатов квазистатистического и электродинамического анализов, вероятнее всего, является учёт потерь на излучение при электродинамическом анализе.

Исследование поддержано Российским фондом фундаментальных исследований (проект №19-37-51017).

*Литература*

1. Электромагнитный терроризм на рубеже тысячелетий: сборник / М. Бакстром, К.И. Баум, Р. Борисов и др.; ред. Т.Р. Газизов. – Томск: ТГУ, 2002. – 206 с.
2. Гизатуллин Р.М. Помехоустойчивость и информационная безопасность вычислительной техники при электромагнитных воздействиях по сети электропитания / Р.М. Гизатуллин, З.М. Гизатуллин. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2014. – 142 с.
3. Possibility of protection against uwb pulses based on a turn of a meander microstrip line / R.S. Surovtsev, A.V. Nosov, A.M. Zabolotsky, T.R. Gazizov // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2017. – Vol. 59, No. 6. – P. 1864–1871.
4. Surovtsev R.S. Influence of losses on ultrashort pulse decomposition in a turn of meander microstrip line / R.S. Surovtsev, A.V. Nosov, T.T. Gazizov // 17th International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices. – June 30 – July 4, 2016. – P. 151–154.
5. Карри С.Х. Анализ рассеяния мощности сверхкороткого импульса в витке меандровой линии задержки // Матер. докл. XIV Междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления». – Томск, 28–30 ноября, 2018. – С. 283–286.
6. Носов А.В. Анализ влияния количества витков со слабой связью на форму напряжения в конце витка защитной меандровой линии / А.В. Носов, С. Карри, Р.С. Суровцев // Вторая Междунар. науч. конф. ведущих научных школ в области радиолокации, радионавигации и радиоэлектронных систем передачи информации (Шарыгинские чтения). – 2021 [принята к печати].
7. Matthaei G.L. Approximate calculation of the high-frequency resistance matrix for multiple coupled lines / G.L. Matthaei, G.C. Chinn // IEEE MTT-S Microwave symposium digest. – 1992. – P. 1353–1354.

**Карри Салим**

Аспирант каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: karrisalim.h@gmail.com

**Суровцев Роман Сергеевич**

Канд. техн. наук, доцент, каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: surovtsvrs@gmail.com