

РУСТАМ Р. ГАЗИЗОВ, студент, каф. БИС, ТУСУР, Томск  
РУСЛАН Р. ГАЗИЗОВ, мл. науч. сотрудник, аспирант каф. ТУ,  
ТУСУР, Томск

### **ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ ПРОВОДНИКАМИ С-СЕКЦИИ НА ЭКСТРЕМУМЫ СВЕРХКОРОТКОГО ИМПУЛЬСА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ С УЧЕТОМ ПОТЕРЬ**

Исследовано распространение сверхкороткого импульса вдоль проводников С-секции при моделировании без учета и с учетом потерь в проводниках и диэлектриках. Выявлены и локализованы максимумы сигнала при использовании 10 расстояний между проводниками С-секции. Показано, что потери изменяют амплитуды на 1,3–2,4 %, но локализация максимумов остается прежней.

В настоящее время радиоэлектронная аппаратура подвержена высокому риску влияния на нее помеховыми сигналами. В связи с этим повышаются требования к обеспечению электромагнитной совместимости. В данном вопросе следует обратить внимание на выявление и локализацию экстремумов сигнала, поскольку эти результаты могут быть использованы при определении возможных мест с низким уровнем помехозащищенности. Теоретические основы квазистатического вычисления временного отклика вдоль проводников приведены в [1, 2]. Исследованы экстремумы сверхкороткого импульса (СКИ) в двухвитковой меандровой линии [3], С-секции при изменении ее геометрических параметров [4], а также шине печатной платы системы автономной навигации [5]. В связи с тем что потери в проводниках и диэлектриках учитывались только в двухвитковой меандровой линии [6], целесообразно исследовать и другие структуры с изменением геометрических параметров проводников, с целью сравнения результатов.

Цель работы – исследовать влияние учета потерь в проводниках и диэлектрике на экстремумы сигнала при изменении расстояния ( $s$ ) между проводниками С-секции.

В качестве исследуемой структуры выбрана одновитковая меандровая микрополосковая линия (С-секция) с такими же параметрами, как в [4]. На рисунке 1,а представлена ее принципиальная схема, а на рисунке 1,б – поперечное сечение.

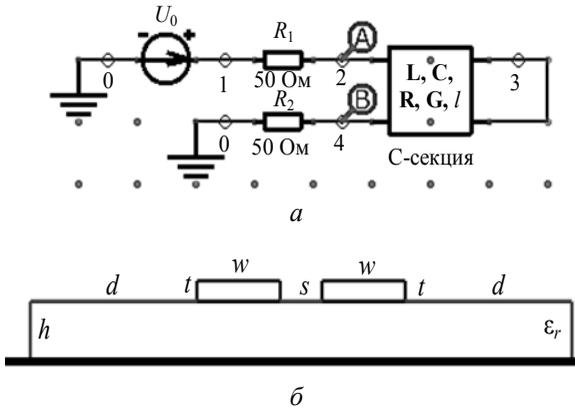


Рисунок 1. Схема включения (а) и поперечное сечение (б) С-секции

Каждый полувиток С-секции разделен на 50 сегментов, в каждом из которых вычислены формы напряжения. Моделировалось распространение СКИ с формой трапеции (ЭДС = 1 В, время нарастания плоской вершины и спада – по 0,1 нс) при  $s = 400, 200, 100, 80, 40, 20, 10, 5, 2,5$  и 1 мкм. При моделировании используются матрицы погонных сопротивлений ( $\mathbf{R}$ ), учитывающих потери в проводниках, и проводимостей ( $\mathbf{G}$ ), учитывающих потери в диэлектриках. При учете потерь в проводниках (при вычислении элементов  $\mathbf{R}$ ) учитывались: скин-эффект, эффект близости и потерь в плоскости земли по методике [7]. При учете потерь в диэлектриках (при вычислении элементов матрицы  $\mathbf{G}$ ) использована модель частотной зависимости относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь материалов FR-4 [8].

Вдоль каждого полувитка вычислено по 50 форм напряжений, однако показаны только формы сигнала на входе ( $U_b$ ) и выходе ( $U_e$ ) С-секции, а также с максимальным значением: ( $U_{\max}$ ) – без учета потерь, а ( $U_{\max\text{loss}}$ ) – с учетом потерь. Кроме того, приведены результаты не для всех  $s$ , а лишь наиболее показательные. Результаты моделирования распространения

сигнала вдоль проводников С-секции при  $s = 400$  мкм приведены на рисунке 2. Аналогичные результаты для 40 мкм и 1 мкм приведены на рисунках 3 и 4 соответственно.

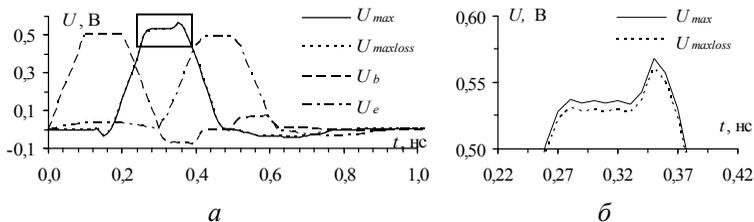


Рисунок 2. Формы сигнала (а) и увеличенный фрагмент (б) при  $s = 400$  мкм

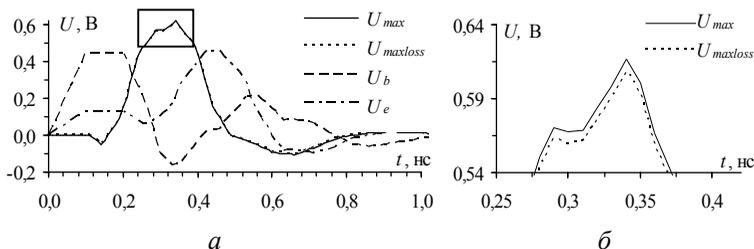


Рисунок 3. Формы сигнала (а) и увеличенный фрагмент (б) при  $s = 40$  мкм

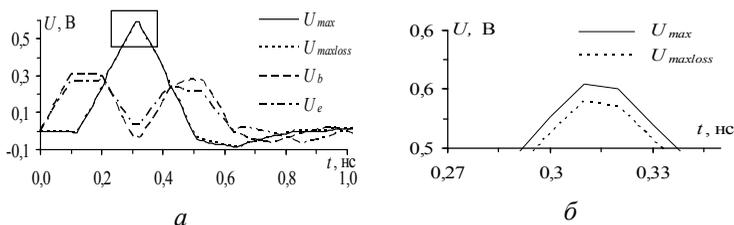


Рисунок 4. Формы сигнала (а) и увеличенный фрагмент (б) при  $s = 1$  мкм

В таблице приведены результаты моделирования:  $k$  – номер полувитка,  $n$  – номер сегмента, в котором локализован максимум,  $U_{\max}$  – амплитуда максимума без учета потерь  $U_{\maxloss}$  – амплитуда максимума с учетом потерь,  $d$  – разница амплитуд, % – разница амплитуд в процентах.

## Результаты моделирования

| $s$ , мкм | Без учета потерь |                | С учетом потерь |                     | $d$ , В | %    |
|-----------|------------------|----------------|-----------------|---------------------|---------|------|
|           | $k(n)$           | $U_{\max}$ , В | $k(n)$          | $U_{\max/loss}$ , В |         |      |
| 400       | 2 (47)           | 0,568          | 2 (47)          | 0,561               | 0,007   | 1,26 |
| 200       | 2 (46)           | 0,598          | 2 (46)          | 0,569               | 0,029   | 1,21 |
| 100       | 2 (46)           | 0,606          | 2 (46)          | 0,598               | 0,008   | 1,29 |
| 80        | 2 (46)           | 0,608          | 2 (46)          | 0,600               | 0,008   | 1,29 |
| 40        | 2 (44)           | 0,617          | 2 (44)          | 0,609               | 0,008   | 1,33 |
| 20        | 2 (43)           | 0,617          | 2 (43)          | 0,608               | 0,009   | 1,40 |
| 10        | 2 (41)           | 0,626          | 2 (41)          | 0,616               | 0,010   | 1,61 |
| 5         | 2 (38)           | 0,620          | 2 (38)          | 0,608               | 0,012   | 1,93 |
| 2,5       | 2 (38)           | 0,610          | 2 (38)          | 0,597               | 0,013   | 2,21 |
| 1         | 2 (37)           | 0,595          | 2 (37)          | 0,580               | 0,014   | 2,38 |

Из таблицы видно, что во всех случаях, как без учета потерь, так и при их учете, максимум напряжения локализован во втором полувитке. Кроме того, с уменьшением значения  $s$  (от 400 мкм до 1 мкм):

- локализация максимума напряжения стремится ближе к центру полувитка (от сегмента 47, к сегменту 37);
- амплитуда максимума возрастает на 11,6 % при  $s = 10$  мкм и уменьшается на 6,2 % при  $s = 1$  мкм;
- увеличивается разность между амплитудами максимумов с учетом потерь и без их учета от 0,00718 В до 0,01415 В (от 1,26 % до 2,38 %, соответственно).

Таким образом, в работе исследовано распространение СКИ вдоль проводников С-секции, при изменении расстояния между ними при моделировании с учетом и без учета потерь. Показано, что при уменьшении расстояния между проводниками в обоих случаях (при учете потерь и без их учета) амплитуда максимума сначала увеличивается, а затем уменьшается. Кроме того, выявлено, что потери слабо влияют на амплитуды напряжения (1,3–2,4 %), однако не влияют на локализацию максимумов напряжения. В связи с этим целесообразно исследовать влияние изменения других параметров структуры на экстремумы сигнала.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по проекту RFMEFI57417X0172.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Achar R., Nakhla M.S. Simulation of high-speed interconnects // Proc. IEEE. 2001. Vol. 89, No 5. P. 693–728.
2. Заболоцкий А.М., Газизов Т.Р. Временной отклик многопроводных линий передачи. Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2007. 152 с.
3. Газизов Р.Р., Заболоцкий А.М., Орлов П.Е. Локализация максимумов сигнала в многопроводных линиях передачи печатных плат с помощью системы TALGAT // Доклады ТУСУР. 2015. № 4(38). С. 147–150.
4. Газизов Р.Р., Заболоцкий А.М., Газизов Т.Т. Исследование распространения сверхкороткого импульса в микрополосковой С-секции при изменении зазора между связанными проводниками // Доклады ТУСУР. 2016. № 1(19). С. 79–82.
5. Газизов Р.Р., Газизов Т.Т. Исследование локализации пиковых значений сигнала в печатной плате системы автономной навигации // Инфокоммуникационные технологии. 2017. Т. 15, № 2. С. 170–178.
6. Газизов Рустам Р., Газизов Руслан Р. Выявление и локализация экстремумов сигнала в двухвитковой меандровой линии с учетом потерь // Сб. избранных ст. научной сессии ТУСУР: по материалам Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2018». Томск : В-Спектр, 2018. Ч. 2. С. 246–249.
7. Matthaei G.L., Chinn G.C. Approximate calculation of the high-frequency resistance matrix for multiple coupled lines // Microwave Symposium Digest. 1992. P. 1353–1354.
8. Bilje R.M., Likar-Smiljanic V.D., Sarkar T.K. Wideband frequency-domain characterization of FR-4 and time-domain causality // IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility. 2001. Vol. 43, No 4, Nov. P. 662–666.

Rustam R. Gazizov, Ruslan R. Gazizov

### **Influence of the separation variation between the conductors of the C-section on extreme points of the ultrashort pulse when losses are taken into account**

The propagation of the ultrashort pulse along the C-section conductors is considered with simulation taking losses in conductors and dielectric into account and without them. Signal extreme points were detected and localized with usage of 10 values of the separation between C-section conductors. It is shown that the losses change the amplitudes by 1.3–2.4%, but the localization of the extreme points remains the same.

**gazizovtsk@yandex.ru**