

УДК 621.37

Н.В. Богданов, Р.С. Суровцев, А.В. Носов

## Влияние изменения параметров меандровой микрополосковой линии с пассивным проводником на форму и амплитуду сверхкороткого импульса

Выполнена оценка влияния изменения параметров поперечного сечения меандровой линии с пассивным проводником на форму и амплитуду СКИ. Выявлено, что в исследуемой линии, помимо импульсов перекрестной наводки и основных мод присутствуют дополнительные импульсы, которые являются дополнительным ресурсом при минимизации амплитуды помехового СКИ. Определены задержки каждого импульса разложения и сформулированы условия разложения СКИ в меандровой микрополосковой линии с пассивным проводником на последовательность из шести импульсов.

**Ключевые слова:** меандровая линия, сверхкороткий импульс, дополнительный импульс.

Одной из актуальных задач электромагнитной совместимости (ЭМС) является обеспечение защиты радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) от различных электромагнитных воздействий (ЭМВ), которые могут быть как природными (электростатический разряд, вторичные проявления разряда молнии), так и преднамеренными (электромагнитное оружие) [1]. Опасными для РЭА являются сверхкороткие импульсы (СКИ) наносекундного и субнаносекундного диапазонов из-за своей амплитуды, малого времени нарастания и широкого спектра [2]. Известные средства защиты от таких СКИ (ограничители напряжения, варисторы, пассивные RC- и LC-фильтры) имеют ряд недостатков, основными из которых являются малые мощность и быстродействие, а также низкая радиационная стойкость и как следствие малый срок службы [3]. Все это затрудняет должную защиту РЭА. В этой связи примечателен подход к защите РЭА, основанный на использовании модальных искажений в витке меандровой микрополосковой линии (МПЛ) [4]. Подход основан на разложении СКИ в витке меандровой МПЛ на последовательность импульсов меньшей амплитуды (перекрестную наводку на ближнем конце, нечетную и четную моды) за счет обеспечения ряда простых условий, связывающих длительность воздействия с задержками мод линии. Однако возможно совершенствование этого подхода. Например, даже за счет введения одного дополнительного пассивного проводника рядом с витком меандровой МПЛ можно предположить разложение СКИ уже на 4 импульса из-за распространения в такой структуре уже трех мод. Для проверки этого предположения целесообразно оценить влияние изменения геометрических параметров меандровой МПЛ с пассивным проводником на форму и амплитуду СКИ. Цель работы – выполнить такую оценку.

### Исходные данные

Поперечное сечение и схема соединений меандровой МПЛ с пассивным проводником представлены на рис. 1.

Исходные параметры исследуемой линии следующие: ширина и толщина проводников  $w=300$  мкм

и  $t=18$  мкм соответственно, расстояние между проводниками  $s_1=50$  мкм,  $s_2=50$  мкм, относительная диэлектрическая проницаемость подложки  $\epsilon_r=5,4$ , толщина подложки  $h=300$  мкм, расстояние от края структуры до проводника  $d=3w$ , длина линии  $l=100$  мм. Сопротивления  $R1-R4$  приняты равными по 50 Ом. В качестве воздействия выбран СКИ в форме трапеции со следующими параметрами: амплитуда ЭДС 1 В, длительность плоской вершины 100 пс, а фронта и спада – по 50 пс.

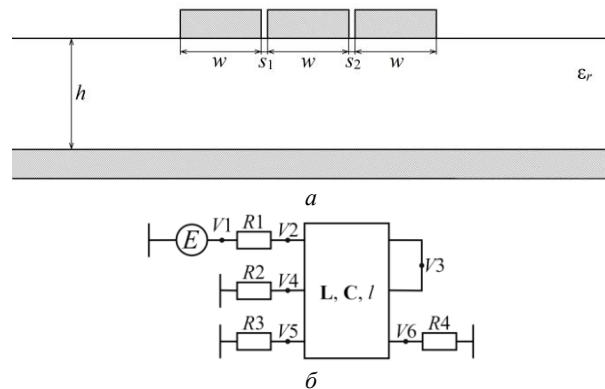


Рис. 1. Поперечное сечение (а) и схема соединений (б) меандровой МПЛ с пассивным проводником

### Результаты моделирования

Выполнено квазистатическое моделирование в системе TALGAT [5]. На рис. 2 представлена форма СКИ в узле  $V4$  при исходных параметрах линии и последовательном увеличении  $l$  до 500 мм с шагом 100 мм.

Из рис. 2 видно, что при увеличении длины линии СКИ на ее конце постепенно раскладывается сначала на 3 импульса, а затем начинают проявляться еще 2 импульса на фронтах второго и третьего импульсов. Амплитуда СКИ в конце линии при  $l = 100$  мм составляет 0,331 В, а при  $l = 500$  мм – 0,223 В.

Далее выполнен анализ изменения формы СКИ в узле  $V4$  с исходными параметрами поперечного сечения линии при  $l=500$  мм и последовательном уменьшении значения  $s_1$  от 40 до 10 мкм с шагом

10 мкм для усиления электромагнитной связи между проводниками (рис. 3).

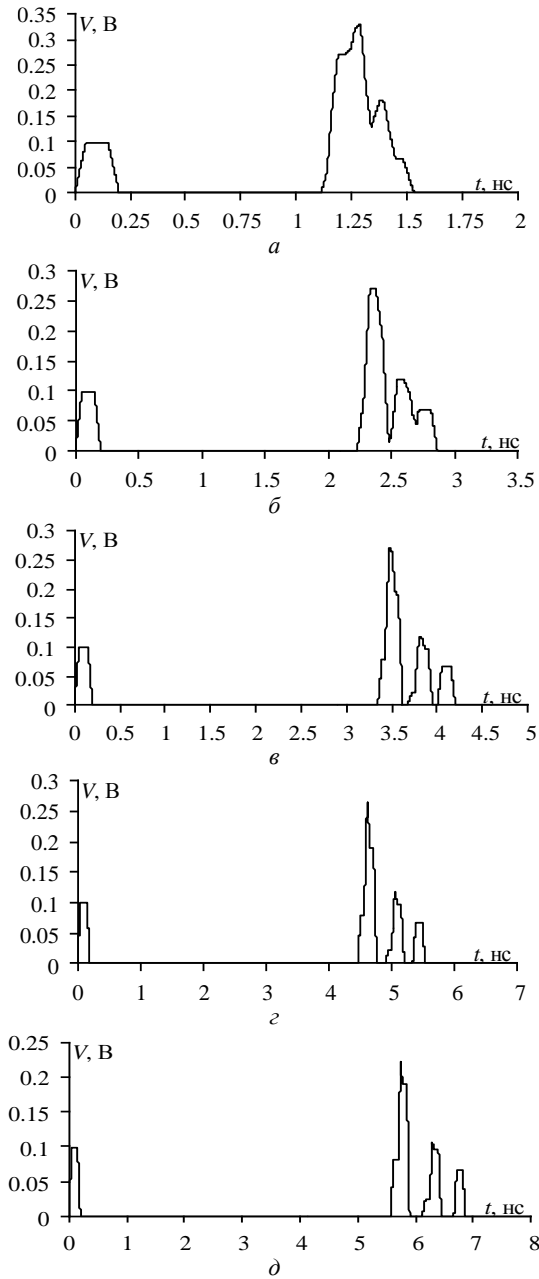


Рис. 2. Форма напряжения в узле V4 при  $l=100$  (а), 200 (б), 300 (в), 400 (г) и 500 (д) мм

Из рис. 3 видно, что СКИ в конце исследуемой линии при уменьшении значения  $s_1$  постепенно раскладывается на большее количество импульсов. Рисунок 3, г рассмотрим более детально. Видно, что в узле V4 СКИ представлен последовательностью из 6 импульсов (И1–И6). Первый импульс является перекрестной наводкой, а 3-й из 5 последующих – импульсами мод линии. Еще 2 импульса являются дополнительными и возникают из-за асимметрии [6]. Определим задержки каждого импульса. Для этого в системе TALGAT вычислены погонные задержки мод линии с исходными параметрами при  $s_1=10$  мкм (далее для простоты будем называть этот набор параметров исходным):  $\tau_1=5,16$  нс/м,  $\tau_2=5,75$  нс/м и

$\tau_3=6,67$  нс/м. Тогда времена прихода импульсов мод определяются как  $2l\tau_1$ ,  $2l\tau_2$  и  $2l\tau_3$ .

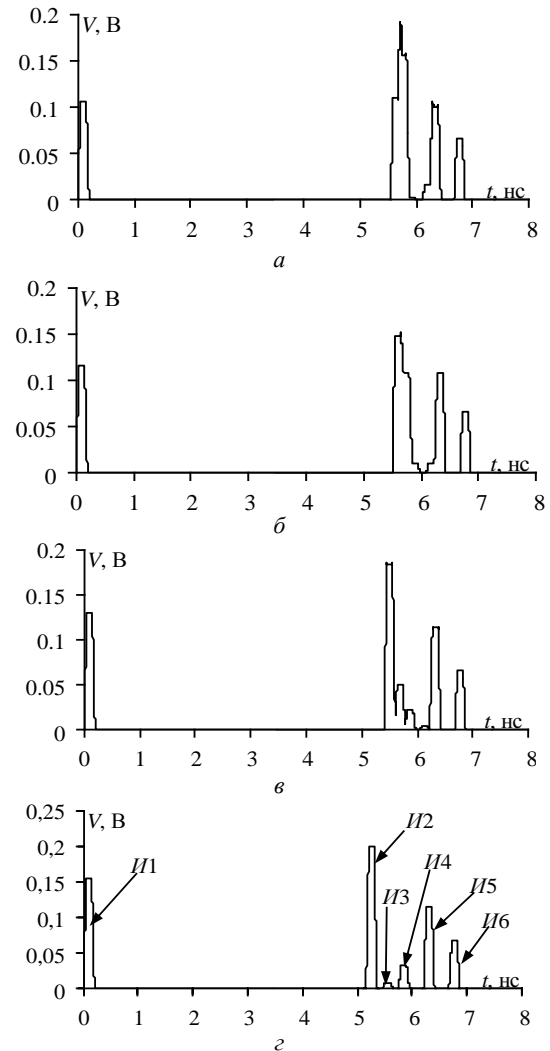


Рис. 3. Форма напряжения в узле V4 при  $s_1=40$  (а), 30 (б), 20 (в), 10 (г) мкм

При подстановке известных значений получим  $t_{И2}=5,16$  нс,  $t_{И4}=5,75$  нс и  $t_{И6}=6,67$  нс. Таким образом, импульсы И2, И4 и И6 являются импульсами мод линии, а И3 и И5 – дополнительными. С учетом [6], задержки И3 и И5 определяются как  $t_{И3}=(t_{И2}+t_{И4})/2=5,45$  нс и  $t_{И5}=(t_{И4}+t_{И6})/2=6,21$  нс. С учетом полученных в данной работе результатов и результатов из работ [4, 6] можно сформулировать условия разложения СКИ в меандровой МПЛ с одним дополнительным пассивным проводником. Так, необходимо чтобы задержка каждого последующего импульса (кроме первого) была не меньше задержки предыдущего импульса, сложной с общей длительностью СКИ ( $t_{ски}$ ). Тогда условия полного разложения СКИ:

$$t_{И2} \geq t_{ски}, \tag{1}$$

$$t_{И3} \geq t_{И2} + t_{ски}, \tag{2}$$

$$t_{И4} \geq t_{И3} + t_{ски}, \tag{3}$$

$$t_{И5} \geq t_{И4} + t_{ски}, \tag{4}$$

$$t_{И6} \geq t_{И5} + t_{ски}. \tag{5}$$

После подстановки известных переменных и алгебраических преобразований условие (1) примет вид

$$2l\tau_1 \geq t_{\text{СКИ}}, \quad (6)$$

условия (2) и (3) примут одинаковый вид

$$\tau_2 l \geq \tau_1 l + t_{\text{СКИ}}, \quad (7)$$

а условия (4) и (5) примут одинаковый вид

$$\tau_3 l \geq \tau_2 l + t_{\text{СКИ}}. \quad (8)$$

Отметим, что при подстановке известных значений условия (6)–(8) выполняются.

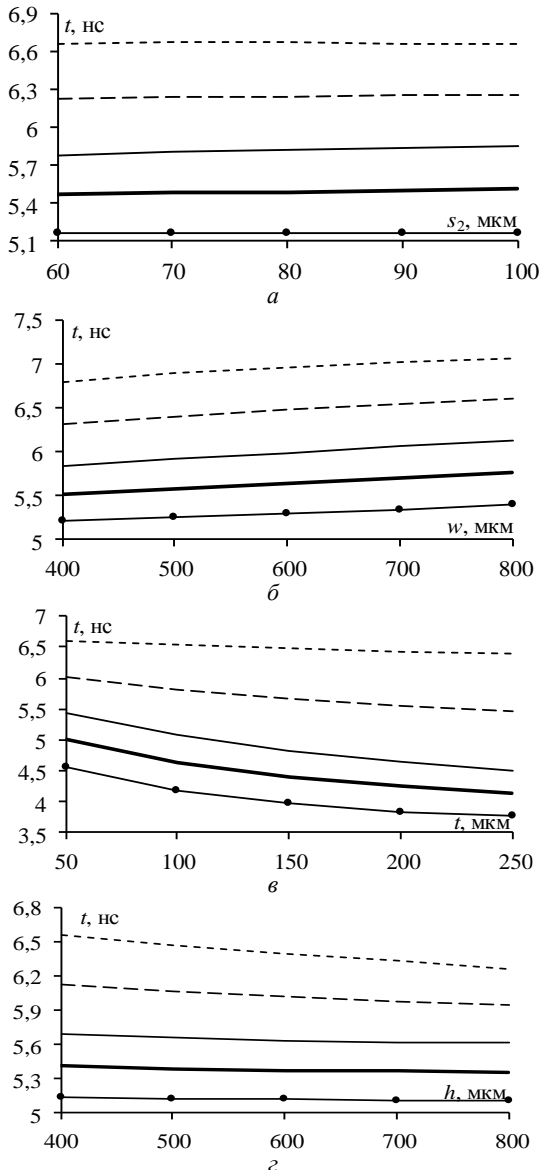


Рис. 4. Зависимости значений задержек *I2* (—·—), *I3* (—), *I4* (---), *I5* (— — —), *I6* (- - -) от  $s_2$  (а),  $w$  (б),  $t$  (в) и  $h$  (г)

Выполнен анализ влияния значений  $s_2$ ,  $w$ ,  $t$  и  $h$  на задержки ( $T$ ) *I2*–*I6* и максимальную амплитуду СКИ ( $V_{\text{max}}$ ) в узле V4. Значение  $s_2$  изменялось в диапазоне 60–100 мкм с шагом 10 мкм;  $w$  – в диапазоне 400–800 мкм с шагом 100 мкм;  $t$  – в диапазоне 50–250 мкм с шагом 50 мкм и  $h$  – в диапазоне 400–800 мкм с шагом 100 мкм. Изменение каждого параметра выполнено при наборе фиксированных исход-

ных параметров. Зависимости задержек *I2*–*I6* представлены на рис. 4, а на рис. 5 представлены зависимости  $V_{\text{max}}$  в узле V4.

Видно, что при увеличении  $s_2$  задержки *I2*, *I3*, *I5*, *I6* не изменяются, а задержка *I4* незначительно увеличивается. Увеличение  $w$  приводит к увеличению всех задержек *I2*–*I6*, а увеличение  $t$  – к их уменьшению. Также отметим, что при увеличении  $t$  изменение зависимостей по мере их отдаления от горизонтальной оси выражено меньше. Задержки *I2* и *I3* при увеличении  $h$  практически не изменяются, а задержки *I4*–*I6* начинают уменьшаться, при этом по мере отдаления каждой зависимости от горизонтальной оси изменение более существенно.

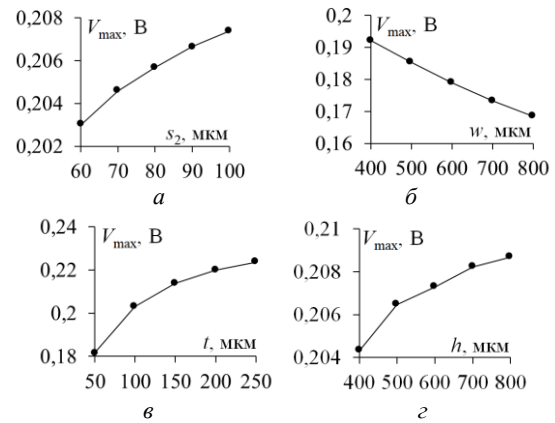


Рис. 5. Зависимости  $V_{\text{max}}$  в узле V4 от  $s_2$  (а),  $w$  (б),  $t$  (в) и  $h$  (г)

### Заключение

Выполнена оценка влияния изменения параметров поперечного сечения меандровой линии с пассивным проводником на форму и амплитуду СКИ. Выявлено, что в исследуемой линии помимо импульсов перекрестной наводки и основных мод присутствуют дополнительные импульсы, которые являются дополнительным ресурсом при минимизации амплитуды помехового импульса. Определены задержки каждого из импульсов разложения и сформулированы условия разложения СКИ в меандровой МПЛ с пассивным проводником на последовательность из 6 импульсов. Выполнен анализ влияния геометрических параметров исследуемой линии на задержки основных импульсов разложения и амплитуду выходного напряжения. Отметим, что приведенные зависимости могут быть использованы при дальнейшей оптимизации линии по критериям полного разложения СКИ и минимизации его амплитуды в перспективе.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации МД-2652.2019.9.

### Литература

1. Газизов Т.Р. Электромагнитный терроризм на рубеже тысячелетий. – Томск: Томский государственный университет, 2002. – 206 с.
2. Сахаров К.Ю. Исследование функционирования локальной вычислительной сети в условиях воздействия

сверхкоротких электромагнитных импульсов / К.Ю. Сахаров, А.А. Соколов, О.В. Михеев, В.А. Туркин, А.Н. Корнев, С.Н. Долбня, А.В. Певнев // Технологии ЭМС. – 2006. – №3 (18). – С. 36–45.

3. Gizatullin Z.M. Investigation of the immunity of computer equipment to the power-line electromagnetic interference / Z.M. Gizatullin, R.M. Gizatullin // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2016. – No. 5. – P. 546–550.

4. Surovtsev R.S. Ultrashort Pulse Decomposition in Meander Microstrip Line of Two Turns / R.S. Surovtsev, A.V. Nosov, T.R. Gazizov // 2018 Siberian Symposium on Data Science and Engineering. – Novosibirsk Akademgorodok, Russia, October 30–31. – 2018. – P. 79–83.

5. 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. – 2019. – Vol. 560. – P. 1–7.

6. 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 et al. // Symmetry. – 2020. –

Vol. 12(7), No. 1117. – P. 1–39. – URL: <https://www.mdpi.com/2073-8994/12/7/1117/pdf>. DOI: 10.3390/sym12071117.

---

**Богданов Николай Владимирович**

Магистрант каф. ТУ ТУСУРа

Тел.: +7-999-177-95-40

Эл. почта: Kolyabogdanov95@mail.ru

**Суровцев Роман Сергеевич**

Канд. техн. наук, с.н.с. НИЛ «ФИЭМС»

Тел.: +7-913-858-16-12

Эл. почта: surovtsvrs@gmail.com

**Носов Александр Вячеславович**

Канд. техн. наук, с.н.с. НИЛ «ФИЭМС»

Тел.: +7-923-406-86-01

Эл. почта: alexns2094@gmail.com