

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.7.10>

УДК: 621.391.825

## ОСЛАБЛЕНИЕ СВЕРХКОРОТКОГО ИМПУЛЬСА В МЕАНДРОВОЙ МИКРОПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ С ДВУМЯ ПАССИВНЫМИ ПРОВОДНИКАМИ

К.П. Малыгин, А.В. Носов, Р.С. Суровцев

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники  
634050, Томск, ул. Ленина 40

Статья поступила в редакцию 8 июня 2022 г.

**Аннотация.** Представлены результаты анализа разложения сверхкороткого импульса (СКИ) в витке меандровой МПЛ с двумя пассивными проводниками. Рассмотрены различные варианты окончаний пассивных проводников витка и получены оптимальные параметры его поперечного сечения по критерию минимальной амплитуды выходного сигнала. Также выполнен анализ влияния изменения геометрических параметров исследуемой линии на задержки каждого импульса разложения и амплитуду СКИ в конце витка. Сформулированы условия разложения СКИ. Приведены результаты оптимизации геометрических параметров линии с учетом технологических возможностей производства компании «Резонит» по критериям разложения СКИ и минимизации его амплитуды. Также показаны результаты сворачивание линии в 21 неосновной виток для уменьшения размеров исходного витка. Выявлено, что уменьшение расстояния между неосновными витками усиливает искажения сигнала, но также и уменьшает его максимальную амплитуду на выходе линии. Такое сворачивание позволило существенно уменьшить размеры линии. Ослабление воздействия с реального генератора осциллографа С9-11, полученное в разных программных продуктах, составило 10,6–16,1 раза.

**Ключевые слова:** сверхкороткий импульс, нечетная мода, четная мода, дополнительный импульс, разложение импульса, защитное устройство

**Финансирование:** Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта FEWM-2022-0001

**Автор для переписки:** Малыгин Константин Петрович, malyginkp@gmail.com

## **Введение**

С каждым годом задача защиты радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) от естественных и преднамеренных электромагнитных воздействий (ЭМВ) становится актуальнее, поскольку такие ЭМВ представляют все большую опасность для современной быстродействующей РЭА [1]. Опасения вызывает возможность использования генераторов мощных ЭМВ для дестабилизации или полного выведения из строя злоумышленниками важных объектов инфраструктуры, например объектов топливно-энергетического комплекса, безопасности или связи [2]. Известен ряд таких случаев, зарегистрированных в разных странах мира [3]. Из-за высокой мощности и малого времени нарастания наибольшую опасность среди ЭМВ представляют импульсы наносекундного и субнаносекундного диапазонов [4]. Известно множество подходов к защите от таких сверхкоротких импульсов (СКИ) [5–7], каждый из которых имеет свои недостатки, основные из которых – малые мощность, быстродействие, а также ограниченный ресурс [5]. Например, конденсаторы подвержены электрическому пробоям: под действием сильного электрического поля, диэлектрик между обкладками теряет изолирующие свойства и начинает проводить ток [6]. Наряду с этим известно, что реальные напряжения срабатывания таких традиционных устройств защиты, как трехэлектродные газовые разрядники, металлооксидные варисторы и TVS-диоды выше от заявленного и эта разница увеличивается при уменьшении длительности фронта воздействия [7]. Поэтому актуален поиск новых подходов и устройств защиты, которые были бы лишены указанных недостатков. Так, широко исследуются устройства на основе печатных структур

для защиты от ЭМВ и фильтрации сигнала в полосе частот [8–12]. Отдельно выделим предложенный авторами подход к защите РЭА, основанный на ослаблении СКИ в меандровых линиях (МЛ) за счет модального разложения [13]. Одним из достоинств подхода является то, что реализация защиты может не требовать устройства защиты как такового: могут быть использованы уже имеющиеся на печатной плате МЛ. Суть подхода заключается в разложении СКИ на последовательность импульсов меньшей амплитуды в витке МЛ на импульсы перекрестной наводки, нечетной и четной мод, и последующем выравнивании амплитуд импульсов разложения за счет чего ослабление СКИ в самом простом случае составляет 2,4 раза [14]. Такого ослабления недостаточно для защиты РЭА от мощных СКИ. В связи с этим исследованы новые структуры на основе МЛ для увеличения ослабления СКИ [15–17]. Так в витке на основе микрополосковой линии (МПЛ) с дополнительным пассивным проводником ослабление составило 5,38 раза [15], в гибридном устройстве защиты на основе каскадного соединения 4-проводного модального фильтра (МФ) и МЛ с лицевой связью – 11,92 раза [16], в меандровой МПЛ из 2 витков, соединенных каскадно – 5,2 раза, из 3 – 8,1 раза, из 4 – 19,9 раза, а из 5 – 33,16 раза [17]. Увеличенное ослабление в этих структурах (по сравнению с одним витком меандровой МПЛ) обеспечивается за счет разложения исходного СКИ на последовательность более чем из 3 импульсов. Так, в меандровой МПЛ с пассивным проводником количество импульсов разложения увеличивается за счет введения пассивного проводника и асимметрии поперечного сечения [15], в гибридном устройстве защиты на основе МФ и МЛ – за счет разложения СКИ на последовательность импульсов сначала в МФ, а затем каждого из них в МЛ, в меандровой МПЛ из 2–5 витков – сначала за счет разложения СКИ на последовательность импульсов в первом витке, а затем за счет разложения каждого импульса этой последовательности в следующем витке и т.д. Однако эти структуры трудно реализовать на практике из-за ограничений в технологических возможностях изготовителей печатных плат, а из-за больших конечных длин структур их использование на уровне печатных плат нецелесообразно. В этой связи

необходимо совершенствование таких структур или синтез новых, а также их параметрическая оптимизация по критериям минимизации амплитуды СКИ и его разложения с учетом реальных геометрических параметров современных печатных плат. С учетом этого для дальнейшего исследования выбрана структура витка меандровой МПЛ с двумя пассивными проводниками, поскольку она представляется подходящей для дальнейшей практической реализации с сохранением защитных свойств. Цель работы – выполнить анализ разложения СКИ и оценить возможность ослабления его амплитуды в витке меандровой МПЛ с двумя пассивными проводниками и технологически реализуемыми геометрическими параметрами.

### 1. Исходные данные и условия разложения СКИ

Поперечное сечение и схема соединений исследуемого витка меандровой МПЛ с двумя пассивными проводниками представлены на рисунке 1.

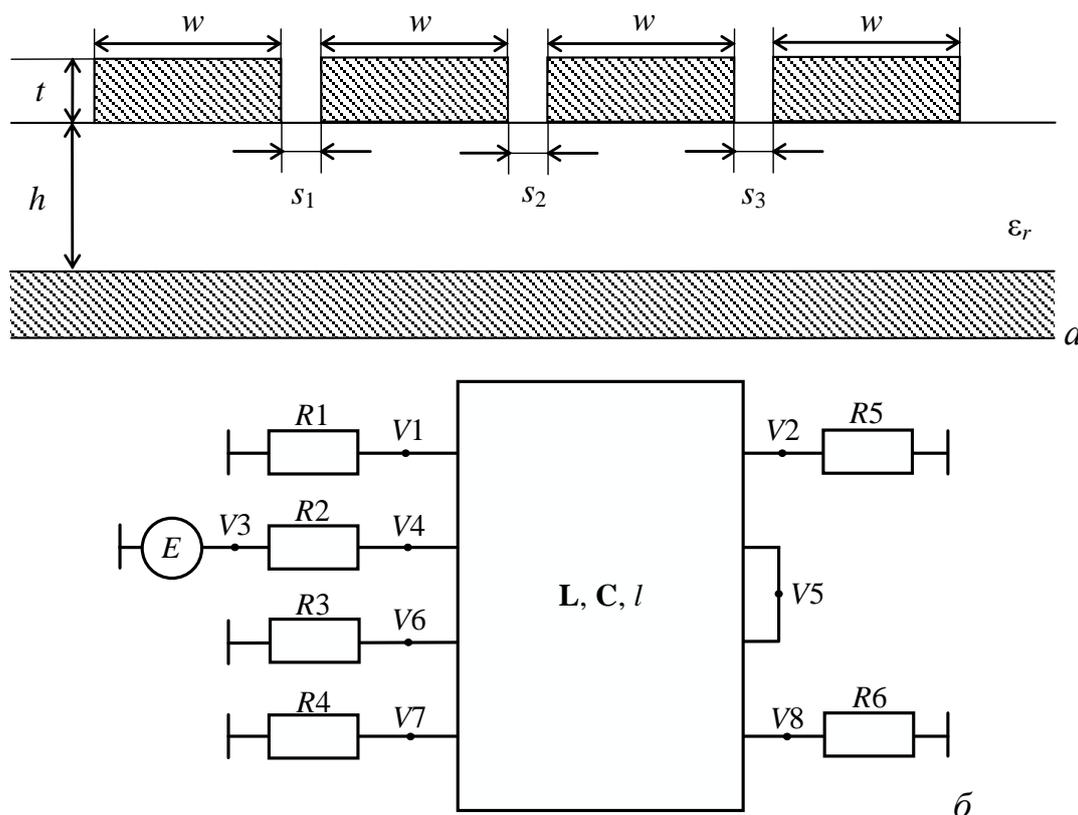


Рис. 1. Поперечное сечение (а) и схема соединений (б) витка меандровой МПЛ с двумя пассивными проводниками

В такой структуре распространяется 4 моды, каждая со своей погонной задержкой ( $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$ ). Таким образом, на выходе витка меандровой линии (в узле  $V_6$  на рисунке 1б) при оптимальных параметрах поперечного сечения, СКИ может быть разложен на 5 импульсов: импульс перекрестной наводки и 4 импульса мод линии. Однако, при введении асимметрии в поперечное сечение, количество импульсов разложения увеличивается за счет возникновения дополнительных импульсов, количество которых определяется количеством линейных комбинаций задержек импульсов мод [16]. С учетом этого СКИ в конце витка меандровой МПЛ с двумя пассивными проводниками может быть разложен на 11 основных импульсов меньшей амплитуды. Тогда, основываясь на полученных ранее результатах [14–17], сформулируем условия, позволяющие разложение СКИ на 11 импульсов в меандровой МПЛ с пассивными проводниками. Для этого сначала необходимо записать выражения, определяющие задержки каждого импульса разложения. Задержки импульсов определяются как:  $t_{II2}=2l\tau_1, t_{II3}=l\tau_1+l\tau_2, t_{II4}=2l\tau_2, t_{II5}=l\tau_1+l\tau_3, t_{II6}=l\tau_2+l\tau_3, t_{II7}=2l\tau_3, t_{II8}=l\tau_1+l\tau_4, t_{II9}=l\tau_2+l\tau_4, t_{II10}=l\tau_3+l\tau_4, t_{II11}=2l\tau_4$ . Зная выражения, определяющие задержки каждого из 10 импульсов разложения (кроме первого, который приходит без задержки и является перекрестной наводкой на ближнем конце линии), можно обеспечить разложение СКИ выполнением ряда условий, аналогично тому, как это было сделано в [15]. Условия разложения СКИ в витке меандровой МПЛ с двумя пассивными проводниками:

$$2l\tau_1 \geq t_{\text{СКИ}}, \quad (1)$$

$$l\tau_2 \geq l\tau_1 + t_{\text{СКИ}}, \quad (2)$$

$$l\tau_1 + l\tau_3 \geq 2l\tau_2 + t_{\text{СКИ}}, \quad (3)$$

$$l\tau_3 \geq l\tau_2 + t_{\text{СКИ}}, \quad (4)$$

$$l\tau_1 + l\tau_4 \geq 2l\tau_3 + t_{\text{СКИ}}, \quad (5)$$

$$l\tau_4 \geq l\tau_3 + t_{\text{СКИ}}, \quad (6)$$

где  $l$  – длина отрезка линии передачи, а  $t_{\text{СКИ}}$  – общая длительность СКИ.

## 2. Результаты моделирования

Для моделирования в качестве воздействия выбран импульс в виде трапеции, с ЭДС 1 В, длительностью плоской вершины 100 пс, а фронта и

спада – по 50 пс. Внутренние сопротивления генератора и приемного устройства приняты равными по 50 Ом ( $R_2$  и  $R_3$  на рисунке 1б), а окончания пассивных проводников ( $R_1, R_5, R_4$  и  $R_6$  на рисунке 1б) будут выбраны далее из таблицы 1, где XX – означает холостой ход, а КЗ – короткое замыкание. Моделирование выполнено в системе TALGAT [18].

Таблица 1. Наборы окончаний ( $N$ ) пассивных проводников

$N$	1	2	3	4	5	6	7
$R_3$	XX	XX	КЗ	КЗ	КЗ	XX	50 Ом
$R_4$	XX	КЗ	XX	КЗ	КЗ	XX	50 Ом
$R_5$	XX	XX	КЗ	КЗ	XX	КЗ	50 Ом
$R_6$	XX	КЗ	XX	КЗ	XX	КЗ	50 Ом

Перед выбором окончаний из таблицы 1 выполнена оптимизация с помощью эвристического поиска геометрических параметров по критерию выполнения условий (1)–(6). Найденные в результате оптимизации оптимальные геометрические параметры структуры:  $w=300$  мкм,  $t=18$  мкм,  $s_1=s_2=50$  мкм,  $s_3=100$  мкм,  $h=300$  мкм,  $\epsilon_r=10$ ,  $l=1$  м. Полученные матрицы погонных коэффициентов электростатической ( $\mathbf{C}$ ) и электромагнитной ( $\mathbf{L}$ ) индукции:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 207,5 & -66,234 & -1,40212 & 0,021521 \\ -66,234 & 239,129 & -66,0773 & -1,1628 \\ -1,40212 & -66,0773 & 223,349 & -44,3348 \\ 0,021521 & -1,1628 & -44,3348 & 191,563 \end{bmatrix} \text{ пФ/м,}$$

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} 371,975 & 163,355 & 83,5684 & 40,1644 \\ 163,355 & 351,321 & 158,882 & 68,8773 \\ 83,5684 & 158,882 & 359,745 & 132,487 \\ 40,1644 & 68,8773 & 132,487 & 385,421 \end{bmatrix} \text{ нГн/м,}$$

Вычисленные погонные задержки мод исследуемой линии:  $\tau_1=7,28$  нс/м,  $\tau_2=7,54$  нс/м,  $\tau_3=8,04$  нс/м,  $\tau_4=9,27$  нс/м. С учетом известных  $\tau_1$ – $\tau_4$  и  $l$  вычислены задержки каждого из 10 импульсов разложения:  $t_{II2}=14,56$  нс,  $t_{II3}=14,82$  нс,  $t_{II4}=15,08$  нс,  $t_{II5}=15,33$  нс,  $t_{II6}=15,59$  нс,  $t_{II7}=16,09$  нс,  $t_{II8}=16,56$  нс,  $t_{II9}=16,81$  нс,  $t_{II10}=17,32$  нс,  $t_{II11}=18,55$  нс. Таким образом, при подстановке известных значений в выражения (1)–(6) они выполняются: задержка каждого импульса не меньше суммы задержки предыдущего и общей длительности СКИ.

Выполнена оценка влияния наборов окончаний пассивных проводников из таблицы 1 на максимальную амплитуду сигнала ( $U_{\max}$ ) на выходе витка. В таблицу 2 сведены  $U_{\max}$  в узле V6 для разных  $N$  из таблицы 1.

Таблица 2. Максимальная амплитуда сигнала ( $U_{\max}$ ) на выходе исследуемого витка при разных  $N$

$N$	1	2	3	4	5	6	7
$U_{\max}, \text{В}$	0,182	0,191	0,118	0,201	0,136	0,119	0,109

Из таблицы 2 видно, что  $U_{\max}$  имеет максимальное значение 0,201 В при  $N=4$ , а минимальное – 0,109 В при  $N=7$ . Поэтому для дальнейшего моделирования выбран 7 набор, обеспечивающий минимальную амплитуду на выходе витка:  $R1=R5=R4=R6=50$  Ом.

Отметим, что ослабление СКИ на выходе исследуемой линии является значимой характеристикой, а изменение параметров его поперечного сечения может в разной степени влиять на  $U_{\max}$  каждого из 11 импульсов разложения. В этой связи выполнена оценка влияния изменения параметров поперечного сечения исследуемой линии на  $U_{\max}$  и задержки каждого из 11 импульсов разложения. При моделировании сопротивления  $R1-R6$  приняты по 50 Ом. Выполнен анализ влияния изменения значений  $s_1, s_2, s_3, w, t$  и  $h$  на задержки всех, кроме первого, импульсов ( $I2-I11$ ) и  $U_{\max}$  на выходе витка. Значения параметров  $s_1$  и  $s_2$  изменялись в диапазоне 60–100 мкм с шагом 10 мкм,  $s_3$  – 110–150 мкм с шагом 10 мкм,  $w$  – 400–900 мкм с шагом 100 мкм,  $t$  – 20–60 мкм с шагом 10 мкм и  $h$  – 20–900 мкм с шагом 100 мкм. Значения параметров  $\epsilon_r$  и  $l$  приняты исходными. На рисунке 2 представлены зависимости задержек импульсов  $P2-P11$  от  $s_1, s_2, s_3, w, t$  и  $h$ , а на 3 – зависимости  $U_{\max}$  в узле V6, полученные в ПО TALGAT.

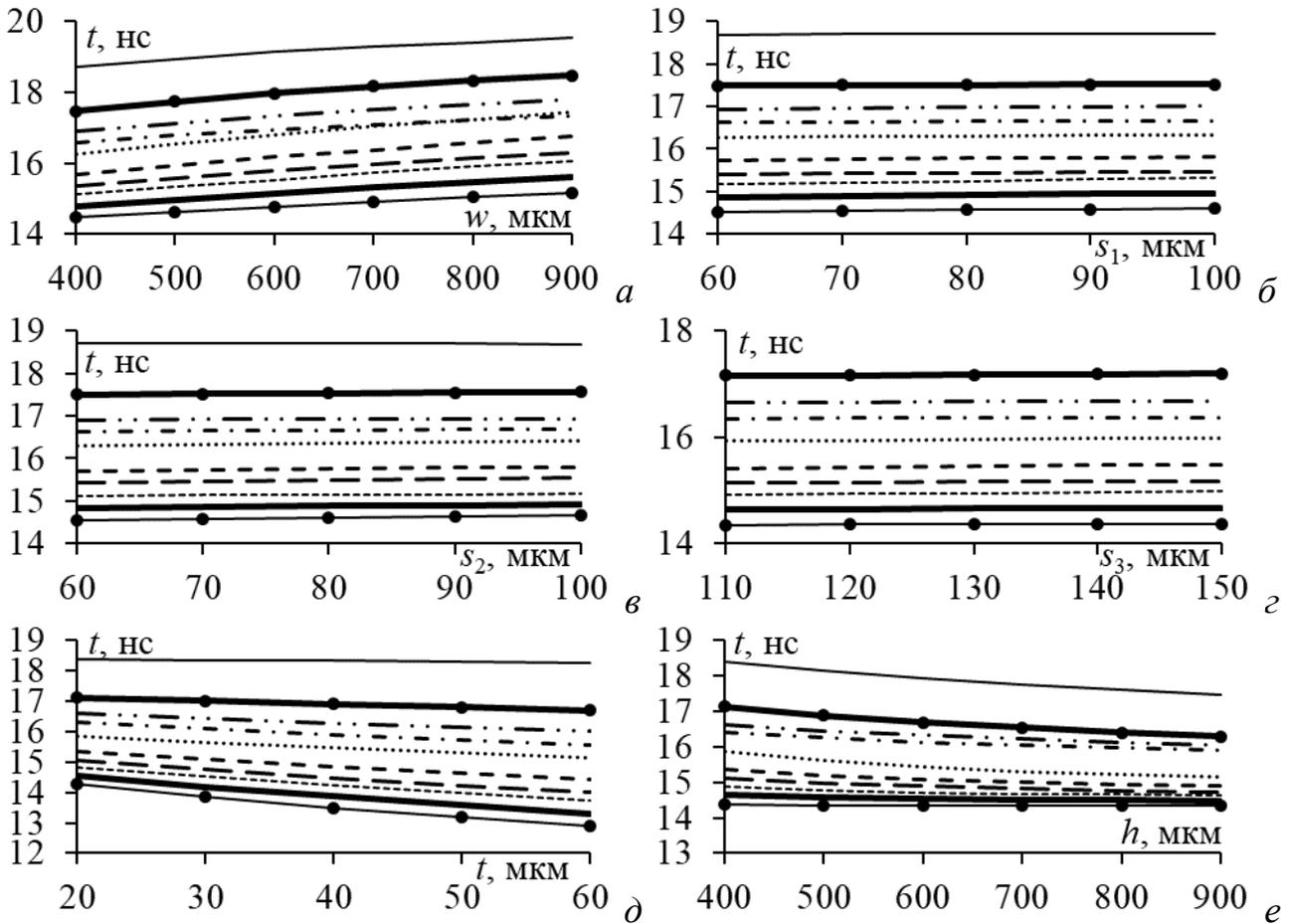


Рис. 2. Зависимости задержек  $II_2$  (—•—),  $II_3$  (—),  $II_4$  (---),  $II_5$  (— —),  $II_6$  (- - -),  $II_7$  (· · · · ·),  $II_8$  (- · - · -),  $II_9$  (- · · · -),  $II_{10}$  (—•—),  $II_{11}$  (—) от  $w$  (а),  $s_1$  (б),  $s_2$  (в),  $s_3$  (г),  $t$  (д) и  $h$  (е) витка меандровой МПЛ

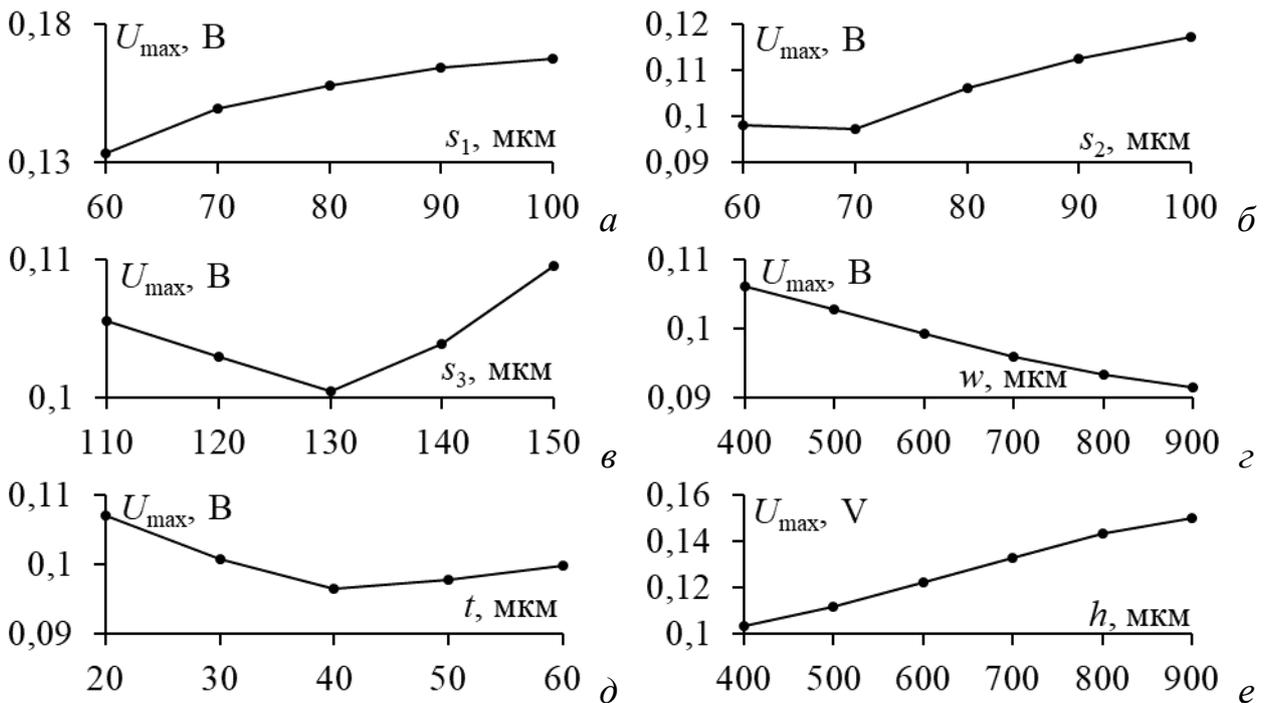


Рис. 3. Зависимости  $U_{max}$  на выходе витка меандровой МПЛ от  $w$  (а),  $s_1$  (б),  $s_2$  (в),  $s_3$  (г),  $t$  (д) и  $h$  (е)

Из рисунка 2 видно, что при увеличении значений  $s_1$ ,  $s_2$  и  $s_3$  задержки всех импульсов  $I2-I11$  практически не изменяются. Увеличение  $w$  приводит к монотонному увеличению задержек импульсов  $I2-I6$  и  $I9-I11$ , а задержки импульсов  $I7$  и  $I8$ , при увеличении  $w$  от 700 мкм до 900 мкм, меняются местами. Увеличение  $t$  приводит к монотонному уменьшению задержек всех импульсов  $I2-I11$  (при этом, по мере отдаления зависимостей от оси абсцисс, они изменяются менее существенно). При увеличении  $h$  задержки импульсов  $I2-I11$  уменьшаются, однако по мере приближения к горизонтальной оси это уменьшение становится незначительным.

Из рисунка 3 видно, что значение  $U_{\max}$  при увеличении  $s_1$  монотонно возрастает (на 25,5%). При увеличении  $s_2$  значение  $U_{\max}$  сначала слабо уменьшается, но, начиная со значения  $s_2=70$  мкм, наблюдается рост на 20,6%. Аналогичный характер наблюдается у зависимостей  $U_{\max}(s_3)$  и  $U_{\max}(t)$ : до значения  $s_3=130$  мкм значение  $U_{\max}$  уменьшается на 5,11%, а затем, при дальнейшем увеличении  $s_3$  возрастает на 9,1%; до значения  $t=40$  мкм  $U_{\max}$  уменьшается на 11,1%, а при дальнейшем увеличении  $t$  значение  $U_{\max}$  увеличивается на 3,5%. Монотонное убывание наблюдается у зависимости  $U_{\max}(w)$ , а у зависимости  $U_{\max}(h)$ , наоборот – монотонный рост. Увеличение  $w$  приводит к уменьшению  $U_{\max}$  на 15,9%, а увеличение  $h$  – к росту  $U_{\max}$  на 45%.

С учетом результатов анализа получены параметры, обеспечивающие минимальную амплитуду выходного сигнала и разложение СКИ на 11 импульсов в конце витка:  $w=400$  мкм,  $t=18$  мкм,  $s_1=110$  мкм,  $s_2=s_3=40$  мкм,  $h=300$  мкм,  $\varepsilon_r=25$ ,  $l=1,2$  м. Вычисленные погонные задержки мод линии с этими параметрами:  $\tau_1=10,86$  нс/м,  $\tau_2=11,49$  нс/м,  $\tau_3=12,48$  нс/м,  $\tau_4=14,61$  нс/м. На основе погонных задержек вычислены задержки каждого из 10 импульсов разложения:  $t_{I2}=26,07$  нс,  $t_{I3}=26,82$  нс,  $t_{I4}=27,57$  нс,  $t_{I5}=28,01$  нс,  $t_{I6}=28,76$  нс,  $t_{I7}=29,94$  нс,  $t_{I8}=30,56$  нс,  $t_{I9}=31,32$  нс,  $t_{I10}=32,51$  нс,  $t_{I11}=35,06$  нс. Таким образом, при подстановке известных значений условия (1)–(6) выполняются. Форма напряжения на выходе витка с оптимальными параметрами, вычисленная в ПО TALGAT и САПР Advanced design system (ADS) показана на рисунке 4.

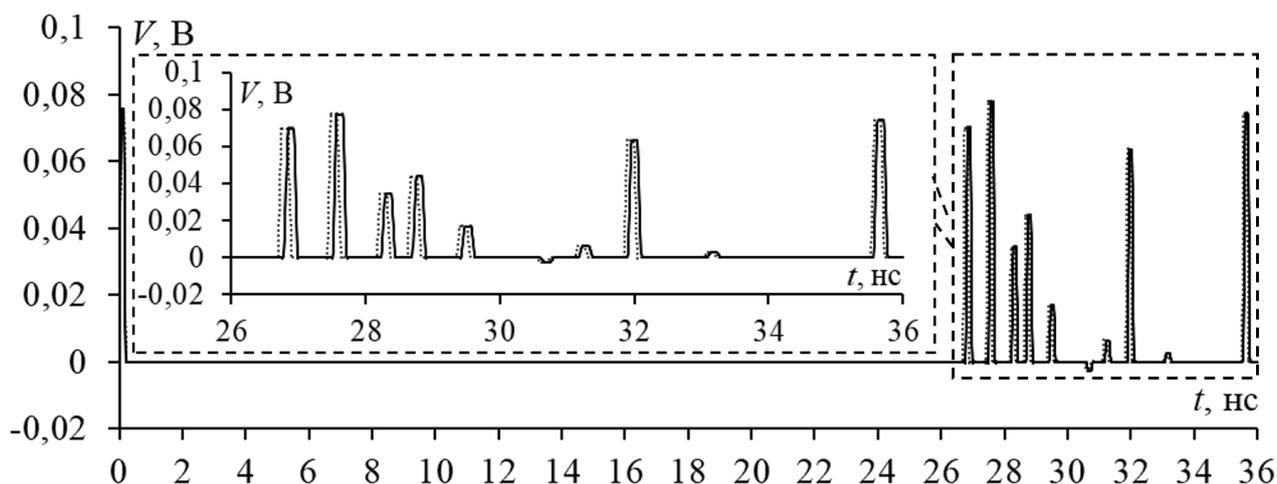


Рис. 4 Формы напряжения в узле  $V_6$  схемы, полученные в ПО TALGAT (—) и САПР ADS (···)

Из рисунка 4 видно, что СКИ на выходе витка представлен последовательностью из 11 основных импульсов, а максимальная амплитуда не превышает 78 мВ. Таким образом, ослабление СКИ составило 6,4 раза (относительно  $E/2$ ). При этом вычисленные формы напряжения в ПО TALGAT и САПР ADS хорошо согласуются как качественно, так и количественно. Так разница между задержками импульсов и их максимальными амплитудами не превышает 0,32% и 0,8% соответственно. Между тем, ширина и длина структуры при выбранном наборе параметров составили 4,18 мм и 1,2 м соответственно. Использование такой линии на практике нецелесообразно, поэтому выполнена оптимизация геометрических параметров исследуемой линии с учетом доступных технологических возможностей производителей печатных плат. Потенциальным производителем макетов для дальнейшей практической реализации исследуемой линии выбрана производственная компания «Резонит» [19], поэтому далее при оптимизации будут учтены ее технологические возможности. Найдены оптимальные геометрические параметры исследуемой линии на подложке из материала Arlon AD1000:  $w_1=200$  мкм,  $w_2=300$  мкм,  $w_3=1900$  мкм,  $w_4=600$  мкм,  $t=18$  мкм,  $s_1=s_2=s_3=400$  мкм,  $h=476$  мкм,  $\varepsilon_r=10$ ,  $l=1,6$  м. Вычисленный в ПО TALGAT и САПР ADS отклик на выходе такой линии (узел  $V_6$  рисунка 1) показан на рисунке 5.

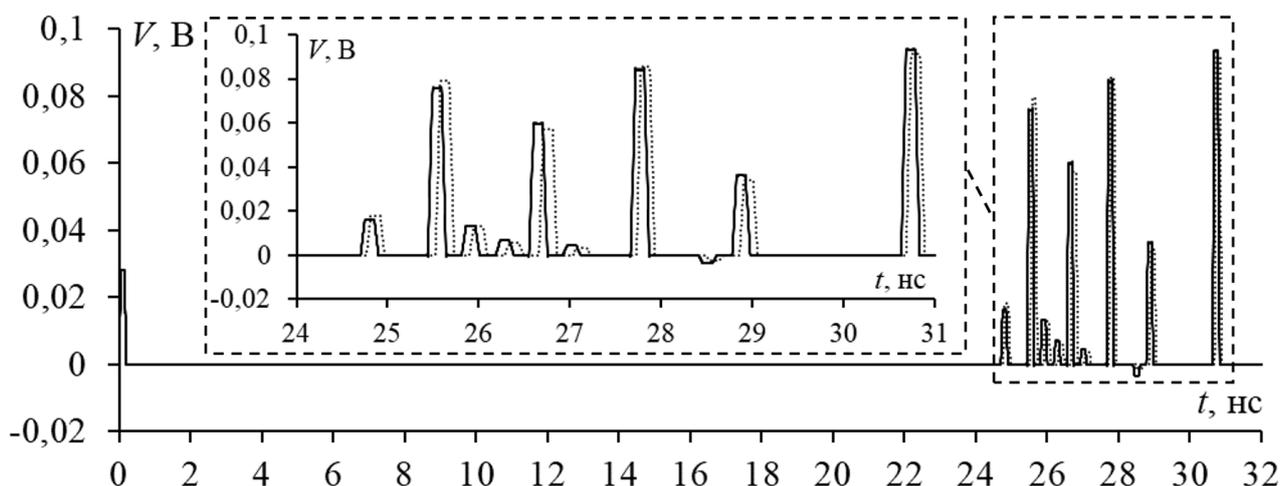


Рис. 5. Форма напряжения в узле  $V_6$  схемы с реализуемыми геометрическими параметрами, полученная в ПО TALGAT (—) и в САПР ADS (···)

Из рисунка 5 видно, что СКИ на выходе исследуемой линии представлен последовательностью из 11 основных импульсов, максимальная амплитуда которых не превышает 93,7 мВ в ПО TALGAT и 91,68 мВ в САПР ADS. Таким образом, ослабление СКИ составило 5,34 раза и 5,45 раза (относительно  $E/2$ ). Разница между задержками импульсов и их максимальными амплитудами не превышает 0,17% и 9,6% соответственно. Таким образом, вычисленные формы напряжения в ПО TALGAT и САПР ADS хорошо согласуются как качественно, так и количественно. Вычисленные в ПО TALGAT погонные задержки мод исследуемой линии:  $\tau_1=15,5$  нс/м,  $\tau_2=16,46$  нс/м,  $\tau_3=16,89$  нс/м,  $\tau_4=19,48$  нс/м. Вычисленные задержки каждого из 10 импульсов разложения:  $t_{И2}=24,81$  нс,  $t_{И3}=25,57$  нс,  $t_{И4}=26,34$  нс,  $t_{И5}=25,92$  нс,  $t_{И6}=26,69$  нс,  $t_{И7}=27,04$  нс,  $t_{И8}=27,99$  нс,  $t_{И9}=28,75$  нс,  $t_{И10}=29,1$  нс,  $t_{И11}=31,17$  нс. Таким образом, при подстановке известных значений условия (1)–(6) выполняются. Для уменьшения размеров линии ее основной виток свернут в несколько неосновных витков со слабой связью между проводниками исходной линии. Пример схемы соединений такой линии из 3 витков показан на рисунке 6.

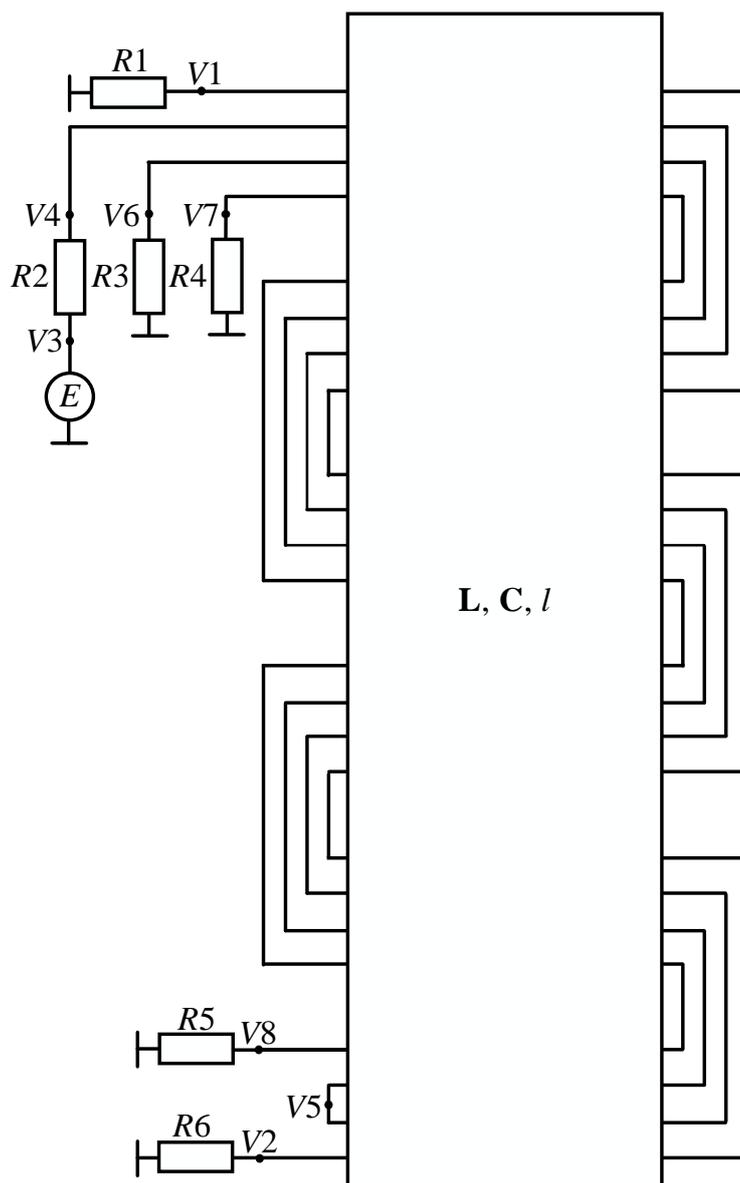


Рис. 6. Схема соединений витка меандровой МПЛ с двумя пассивными проводниками, свернутой в 3 неосновных витка

Для выбранного набора параметров найдено оптимальное количество таких витков – 16. Тогда размеры линии составят  $10 \times 11,34 \text{ см}^2$ , с учетом расстояния между неосновными витками  $s_n = 3 \text{ мм}$ . Форма напряжения на выходе исходной и свернутой линии, вычисленная в TALGAT, показана на рисунке 7.

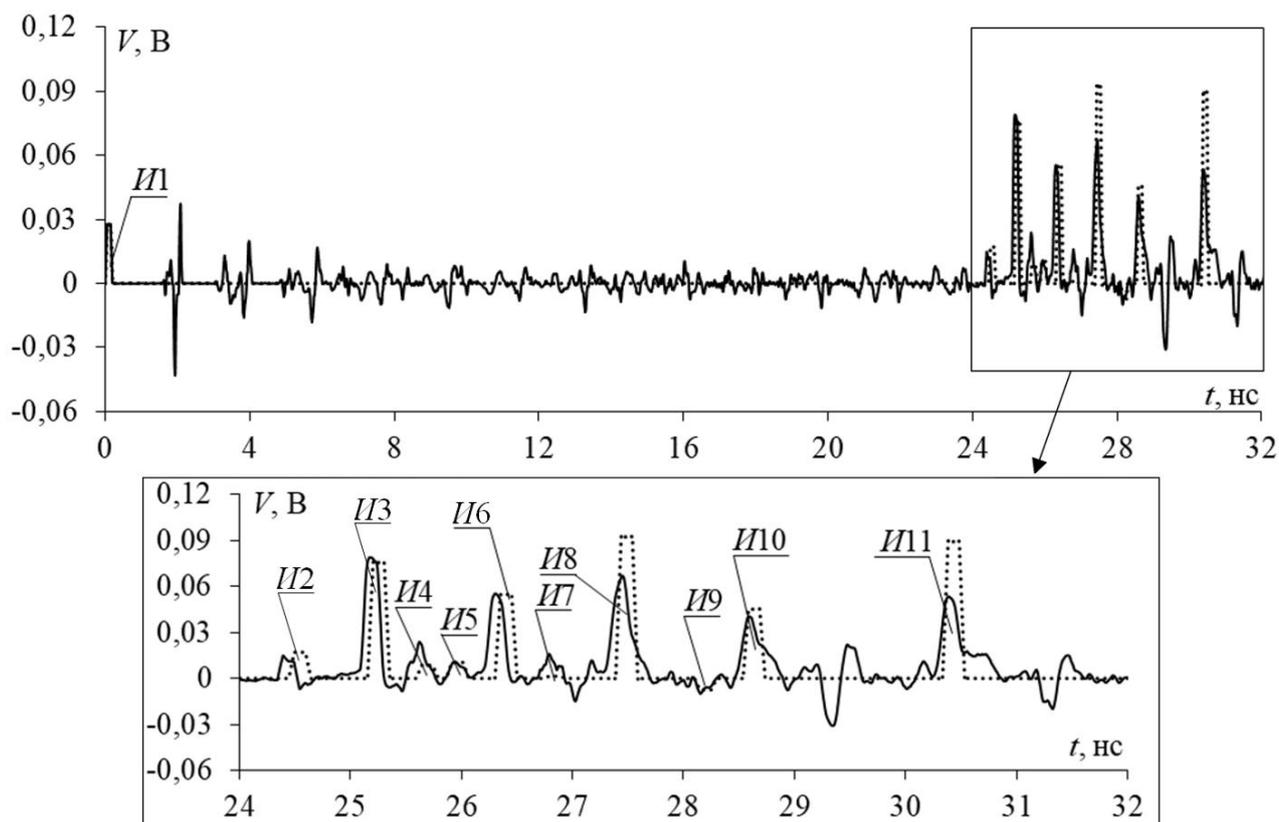


Рис. 7. Форма сигнала на входе исходной (—) и свернутой линии (···)

Из рисунка 7 видно, что СКИ на выходе свернутой линии представлен последовательностью из 11 основных импульсов, максимальная амплитуда которых не превышает 87 мВ, а разница задержек основных импульсов разложения в исходной и свернутой линии не превышает 1,2%. Ослабление СКИ в свернутой линии составило 5,75 раз (относительно  $E/2$ ). В результате сворачивание линии в 16 неосновных витков привело к незначительному росту ослабления при сравнении с исходной линией (рисунок 1б). Это может быть обусловлено наличием дополнительных искажений в свернутой линии, которые вызваны влиянием перемычек в конце каждого неосновного витка.

Поскольку следующим этапом исследований является макетирование и измерение линии на базе стробоскопического осциллографа С9-11, то выполнено моделирование с использованием оцифрованной осциллограммы сигнала амплитудой 1 В и длительностью 480 пс (по уровню 0,1 от 1 В) с выхода генератора С9-11. Она показана на рисунке 8.

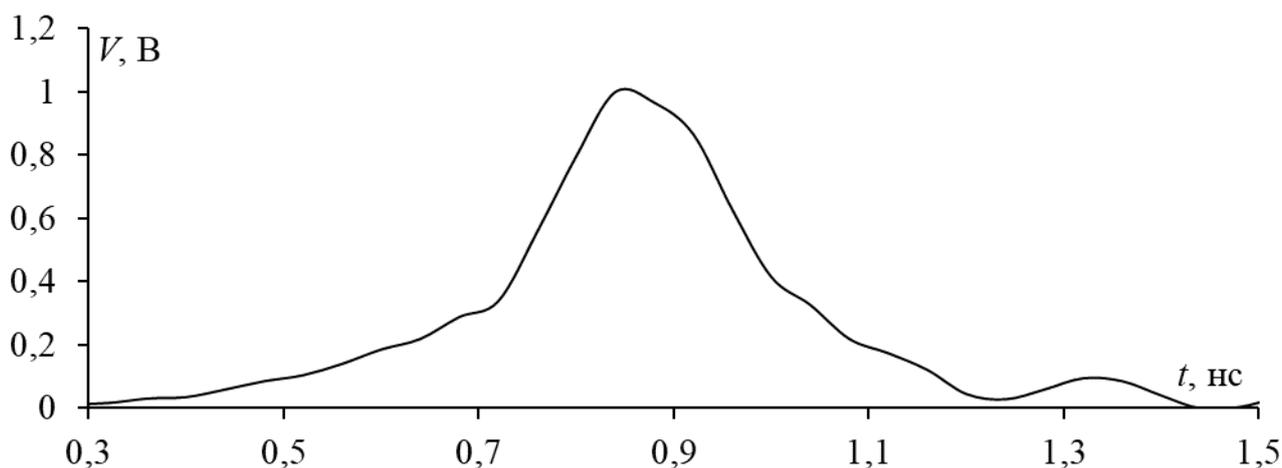


Рис. 8. Оцифрованная осциллограмма сигнала, снятая с выхода генератора осциллографа С9-11

На рисунке 9 представлен вычисленный отклик в ПО TALGAT на выходе свернутой линии на воздействие из рисунка 8.

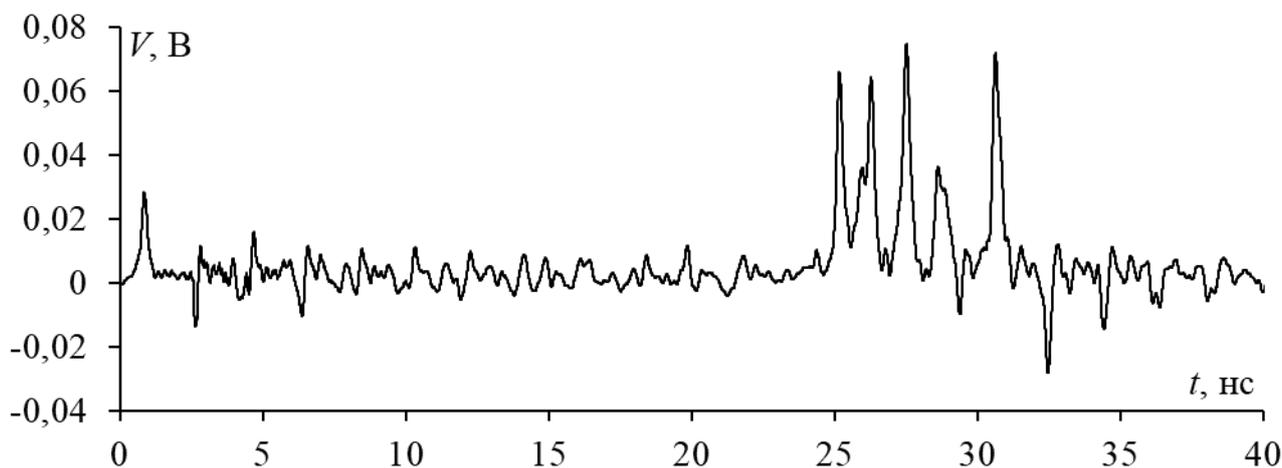


Рис. 9. Вычисленный отклик на выходе свернутой линии на оцифрованное воздействие

Из рисунка 9 видно, что СКИ на выходе исследуемой линии представлен последовательностью лишь из 6 основных импульсов, максимальная амплитуда которых не превышает 74,8 мВ. Количество импульсов уменьшилось до 6, поскольку длительность воздействующего импульса с генератора С9-11 больше длительности СКИ идеализированной формы. В связи с этим СКИ разложен не полностью. Однако при этом ослабление СКИ составило 6,7 раза (относительно  $E/2$ ), что больше, чем при воздействии СКИ идеализированной формы (5,75 раза на рисунке 7). Как отмечалось выше (в комментариях к рисунку 7), это может быть вызвано влиянием искажений из-за неоднородностей в виде перемычек на

конце неосновных витков. Искажения могут по-разному влиять на выходную форму сигнала и его максимальную амплитуду. Эти искажения зависят от расстояния  $s_n$  и для оценки этого влияния выполнено моделирование временного отклика в TALGAT при  $s_{nv}=5,7, 3, 2,5, 2, 1,5, 1$  и  $0,5$  мм (рисунок 9), а в таблицу 3 сведена максимальная амплитуда сигнала на выходе витка при этих  $s_{nv}$ .

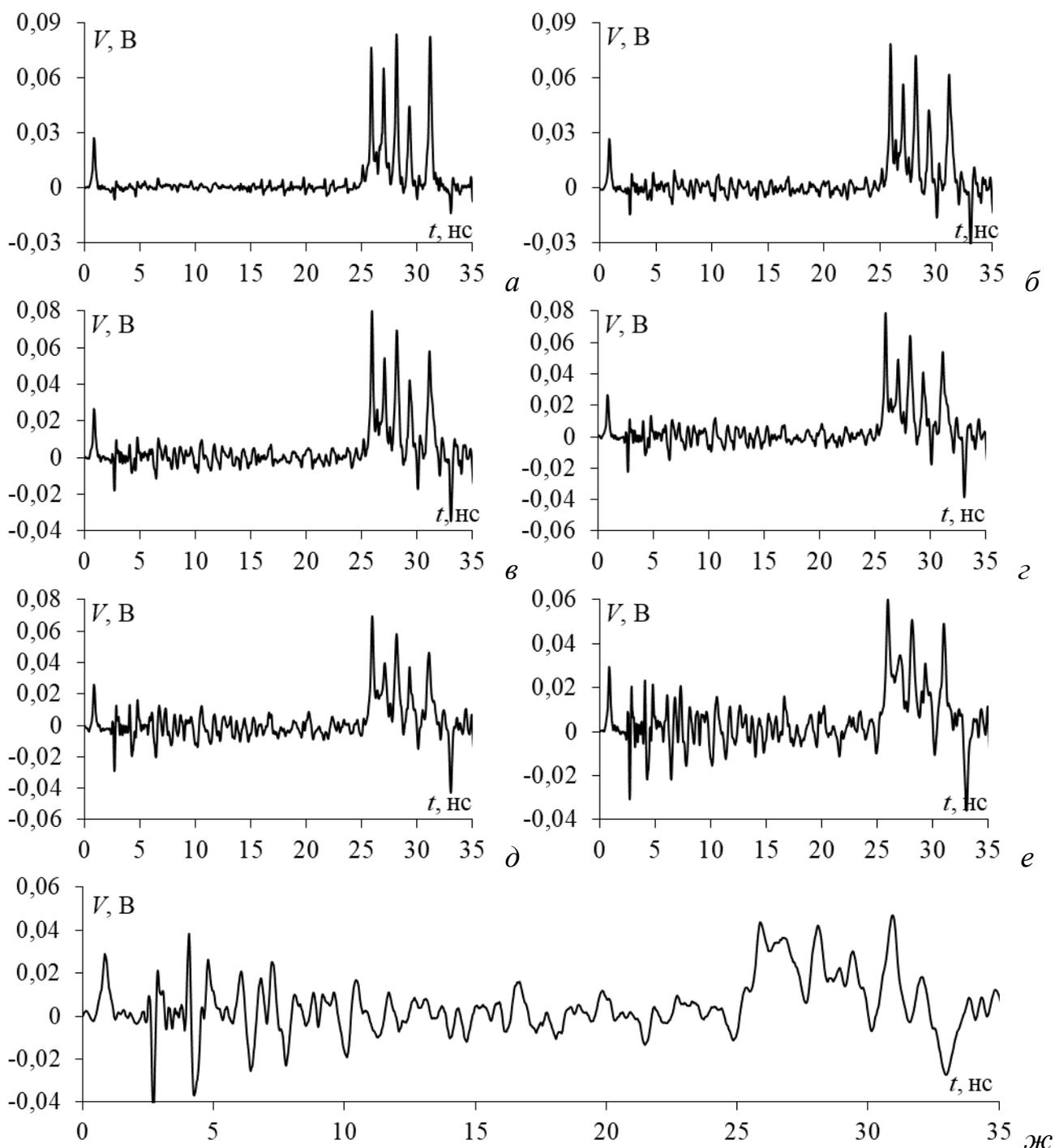


Рис. 9. Формы напряжения на выходе линии при  $s_n=5,7$  (а), 3 (б), 2,5 (в), 2 (г), 1,5 (д), 1 (е) и 0,5 мм (ж)

Таблица 3 – Максимальная амплитуда сигнала на выходе линии (в узле V6)

$s_{nv}$ , мм	V6, В	Ослабление (относительно $E/2$ )
5,7	0,0857	5,96
3	0,0748	6,36
2,5	0,0716	6,25
2	0,0626	6,35
1,5	0,0588	7,19
1	0,0518	8,32
0,5	0,0412	10,66

Из рисунка 9 видно, что с уменьшением расстояния между неосновными витками амплитуда искажений увеличивается, как и их влияние на форму сигнала и максимальную амплитуду на выходе линии. Видно, что чем меньше значение  $s_{nv}$ , тем больше искажаются основные импульсы разложения. Однако при этом увеличивается ослабление, что наглядно видно из таблицы 3. Так, максимальное ослабление составило 10,66 раз при  $s_n=0,5$  мм. Поэтому далее будет использовано  $s_n=0,5$  мм. За счет уменьшения  $s_n$  размеры устройства существенно уменьшатся. В этой связи есть возможность увеличить общую длину основного витка линии за счет увеличения количества неосновных витков до 21. Размеры такой линии составили  $9,4 \times 10$  см<sup>2</sup>.

Наконец, вычислена форма сигнала в конце линии, свернутой в 21 неосновной виток, с помощью квазистатического моделирования в ПО TALGAT и САПР ADS, а также с помощью электродинамического моделирования в САПР PathWave EM Design (EMPro). Форма сигнала, вычисленная в ПО TALGAT представлена на рисунке 10, в ADS – на рисунке 11, а в EMPro – на рисунке 12.

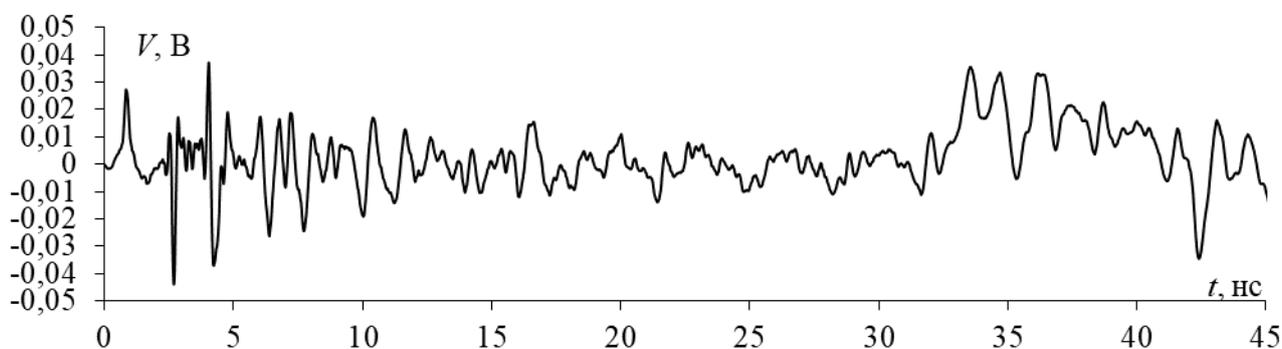


Рис. 10. Форма напряжения на выходе линии, вычисленная в ПО TALGAT

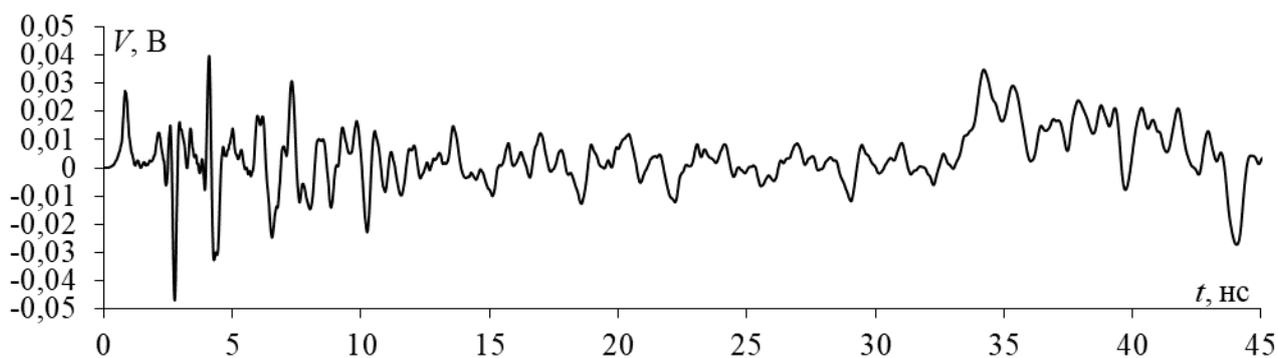


Рис. 11. Форма напряжения на выходе линии, вычисленная в САПР ADS

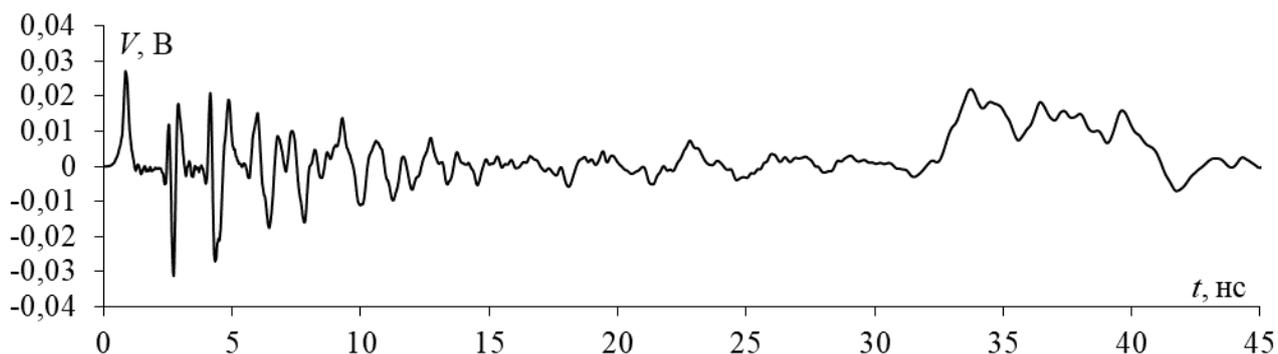


Рис. 12. Форма напряжения на выходе линии, вычисленная в САПР EMPro

Из рисунков 10–12 видно, что максимальная амплитуда на выходе линии определяется импульсом отрицательной полярности. Максимальные амплитуды на выходе линии, полученные в ПО TALGAT, САПР ADS и САПР EMPro составили 44 мВ, 41 мВ и 31 мВ соответственно, а ослабление (относительно  $E/2$ ) – 11,36 раза, 10,6 раза и 16,1 раз соответственно. Результаты, полученные в разных программных продуктах, несколько отличаются качественно. Это обусловлено тем, что в их основе лежат разные численные методы и подходы к моделированию. Наибольшие отличия наблюдаются в диапазоне 30–45 нс на рисунке 12. Это обусловлено тем, что при электродинамическом моделировании учитываются высшие типы волн и все виды потерь. Также отметим приемлемое количественное согласование результатов.

## Заключение

В работе выполнен анализ разложения СКИ в витке меандровой МПЛ с двумя пассивными проводниками. Рассмотрены различные наборы окончаний пассивных проводников и получены оптимальные параметры исследуемой линии по критерию минимальной амплитуды выходного сигнала. Также

выполнен анализ влияния изменения геометрических параметров исследуемой линии на задержки каждого импульса разложения и амплитуду СКИ в конце витка. Сформулированы условия разложения СКИ. Выполнена оптимизация геометрических параметров линии с учетом технологических возможностей производственной компании «Резонит» по критериям разложения СКИ и минимизации его амплитуды. Также выполнено моделирование свернутой линии в 21 неосновной виток для уменьшения ее размеров. Выявлено, что уменьшение расстояния между неосновными витками усиливает влияние искажений на основной сигнал и уменьшает максимальную амплитуду СКИ на выходе линии. В результате такого сворачивания ширина и длина линии уменьшились с 5,4 мм и 1,6 м до 9,4 см и 10 см соответственно. Ослабление оцифрованного воздействия с встроенного генератора С9-11 на выходе свернутой линии, полученное в ПО TALGAT, САПР ADS и САПР EMPro составило 11,4 раза, 10,6 раза и 16,1 раз соответственно. Выявлено приемлемое согласование результатов, полученных в разных программных продуктах. Следующим этапом работы является макетирование и измерение витка меандровой МПЛ с двумя пассивными проводниками, свернутой в 21 неосновной виток, и сравнение с результатами, полученными в данной работе.

**Финансирование:** Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта FEWM-2022-0001

### Литература

1. Газизов Т.Р. *Электромагнитный терроризм на рубеже тысячелетий*. Томск, Томский Государственный Университет. 2002. 206 с.
2. Фоминич Э.Н., Владимиров Д.Р. Электромагнитный терроризм. Новая угроза для информационно-управляющих систем. *Военный инженер*. 2016. №2 Т.2. С.10-17.
3. Петкау О., Тарабцев А., Дерябин А., Ларионов С., Чванов В. Защита объектов топливно-энергетического комплекса от угроз электромагнитного

воздействия. *Безопасность объектов топливно-энергетического комплекса*. 2014. №2. Т.6. С.74-76.

4. Mojert C. et al. UWB and EMP susceptibility of microprocessors and networks. *Proc. of the 14th Int. Zurich Symp. on EMC*. Switzerland – Zurich. 2001. Feb.20-22. P.47-52.
5. Gizatullin Z.M., Gizatullin R.M. Investigation of the immunity of computer equipment to the power-line electromagnetic interference. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2016. №5. P.546-550. <https://doi.org/10.1134/S1064226916050053>
6. Колдунов А.С. *Радиолобительская азбука. Аналоговые устройства*. Москва, СОЛОН–Пресс. 2009. Т.2. 288 с.
7. Messier M.A., et al. Response of telecom protection to three IEC waveforms. *Proc. of the 15th Int. Zurich Symp. on EMC*. Switzerland – Zurich. 2003. Feb.18-20. P.127-132
8. Krzikalla R., Luiken J., L. ter Haseborg J. Systematic description of the protection capability of protection elements. *Proc. of IEEE Int. Symp. on EMC*. USA – Honolulu HI 2007. P.1-4. <https://doi.org/10.1109/ISEMC.2007.177>
9. Krzikalla R., Weber T., L. ter Haseborg J. Interdigital microstrip filters as protection devices against ultrawideband pulses. *in Proc. of IEEE Int. Symp. on EMC*. Turkey – Istanbul. 2003. P.1313-1316. <https://doi.org/10.1109/ICSMC2.2003.1429162>
10. Krzikalla R., L. ter Haseborg J. SPICE simulations of uwb pulse stressed protection elements against transient interferences. *in Proc. of IEEE Int. Symp. on EMC*. USA – Chicago IL. 2005. P.977-981. <https://doi.org/10.1109/ISEMC.2005.1513667>
11. Weber T., Krzikalla R., L. ter Haseborg J. Linear and nonlinear filters suppressing UWB pulses. *IEEE Trans. on EMC*. 2004. №3. V.36. P.423-430. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2004.831887>
12. Cui Q., Dong S., Han Y. Investigation of waffle structure SCR for electrostatic discharge (ESD) protection. *IEEE International Conference on Electron Devices*

- and Solid State Circuit (EDSSC)*. Thailand – Bangkok. 2012. P.3-5.  
<https://doi.org/10.1109/EDSSC.2012.6482791>
13. Surovtsev R.S., Nosov A.V., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. Possibility of Protection Against UWB Pulses Based on a Turn of a Meander Microstrip Line. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2017. V.59. №6. P.1864-1871. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2017.2678019>
14. Surovtsev R.S., Nosov A.V., Zabolotsky A.M. Simple method of protection against UWB pulses based on a turn of meander microstrip line. *16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices*. 2015. June 29-July 3. P.175-177.
15. Nosov A.V., Surovtsev R.S. Ultrashort pulse decomposition in the turn of a meander microstrip line with a passive conductor. *Journal of Physics: Conference Series (JPCS)*. 2021. №1. V.1862. P.1-6. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1862/1/012029>
16. Kim G.Y., Nosov A.V., Surovtsev R.S. Ultrashort Pulse Decomposition in Hybrid Protection Devices Based on the Cascade-Connected Modal Filter and Meander Line With Broad-Side Coupling. *22th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices*. 2021. P.163-166. <https://doi.org/10.1109/EDM52169.2021.9507720>
17. Kim G.Y., Nosov A.V., Surovtsev R.S., Gazizov T.T., Maximov A.E. Conditions for ultrashort pulse decomposition in multi-cascade protection devices based on meander microstrip lines. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. V.1679. P.1-6. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1679/2/022059>
18. 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. V.560. P.1-7. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/560/1/012110>
19. Технологические возможности производства. [web]. *Резонит*. дата обращения: 20.03.2022. URL: <https://www.rezonit.ru/pcb/mnogosloynnye-pechatnye-platy/#tech>

**Для цитирования:**

Малыгин К.П., Носов А.В., Суровцев Р.С. Ослабление сверхкороткого импульса в меандровой микрополосковой линии с двумя пассивными проводниками. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2022. №7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.7.10>

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.7.10>

## **ATTENUATION OF AN ULTRASHORT PULSE IN A MEANDER MICROSTRIP LINE WITH TWO PASSIVE CONDUCTORS**

**K.P. Malygin, A.V. Nosov, R.S. Surovtsev R.S.**

**Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics  
634050, Tomsk, 40 Lenina str.**

The paper was received June 8, 2022.

**Abstract.** The results of the analysis of the ultrashort pulse (USP) decomposition into a sequence of pulses in a turn of a meander microstrip line with two passive conductors are presented. Various variants of the terminations of the passive conductors of the turn are considered and the optimal parameters of its cross-section are obtained according to the criterion of the minimum amplitude of the output signal. An analysis of the influence of changes in the geometrical parameters of the line under study on the delays of each decomposition pulses and the USP amplitude at the end of the turn was also made. Conditions for USP decomposition are formulated. The results of optimizing the geometrical parameters of the line, considering the technological capabilities of the company "Rezonit" according to the criteria of USP decomposition and minimizing its amplitude are presented. Also shown the results of folding the line into twenty-one minor turns. It was found that the reducing distance between minor turns enhances signal distortion and reduces its maximum amplitude at the line output. This folding made it possible to significantly reduce the size of the line. Attenuation of the real

impact signal from the generator of the S9-11 oscilloscope in different software up to 10.6–16.1 times was obtained.

**Key words:** ultrashort pulse, odd mode, even mode, extra pulse, pulse decomposition, protective device

**Financing:** The reported study was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation project FEWM-2022-0001

### References

1. Gazizov T.R. *E`lektromagnitny`j terrorizm na rubezhe ty`syacheletij* [Electromagnetic terrorism at the turn of the millennium]. Tomsk, Tomsk State University Publ. 2002. 206 p. (In Russian)
2. Fominich E.N., Vladimirov D.R. Electromagnetic terrorism. A new threat to information and control systems. *Voenny`j inzhener* [Military engineer]. 2016. №2 V.2. P.10-17. (In Russian)
3. Petkau O., Tarabtsev A., Deryabin A., Larionov S., Chvanov V. Protection of objects of the fuel and energy complex from electromagnetic threats. *Bezopasnost` ob`ektov toplivno-e`nergeticheskogo kompleksa. [Safety of objects of the fuel and energy complex]*. 2014. №2. V.6. P.74-76. (In Russian)
4. Mojert C. et al. UWB and EMP susceptibility of microprocessors and networks. *Proc. of the 14th Int. Zurich Symp. on EMC*. Switzerland, Zurich. 2001. Feb.20-22. P.47-52.
5. Gizatullin Z.M., Gizatullin R.M. Investigation of the immunity of computer equipment to the power-line electromagnetic interference. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2016 №5. P.546-550. <https://doi.org/10.1134/S1064226916050053>
6. Koldunov A.S. *Radiolubitel`skaya azbuka. Analogovy`e ustrojstva* [Radio amateur alphabet. Analog Devices]. Moscow, SOLON–Press Publ. 2009. V.2. 288 p. (In Russian)

7. Messier M.A., et al. Response of telecom protection to three IEC waveforms. *Proc. of the 15th Int. Zurich Symp. on EMC*. Switzerland – Zurich. 2003. Feb.18-20. P.127-132
8. Krzikalla R., Luiken J., L. ter Haseborg J. Systematic description of the protection capability of protection elements. in *Proc. of IEEE Int. Symp. on EMC*. USA – Honolulu HI. 2007. P.1-4. <https://doi.org/10.1109/ISEMC.2007.177>
9. Krzikalla R., Weber T., L. ter Haseborg J. Interdigital microstrip filters as protection devices against ultrawideband pulses. in *Proc. of IEEE Int. Symp. on EMC*. Turkey – Istanbul. 2003. P.1313-1316. <https://doi.org/10.1109/ICSMC2.2003.1429162>
10. Krzikalla R., L. ter Haseborg J. SPICE simulations of uwb pulse stressed protection elements against transient interferences. in *Proc. of IEEE Int. Symp. on EMC*. USA – Chicago IL. 2005. P.977-981. <https://doi.org/10.1109/ISEMC.2005.1513667>
11. Weber T., Krzikalla R., L. ter Haseborg J. Linear and nonlinear filters suppressing UWB pulses. *IEEE Trans. on EMC*. 2004. V.36. №3. P.423-430. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2004.831887>
12. Cui Q., Dong S., Han Y. Investigation of waffle structure SCR for electrostatic discharge (ESD) protection. in *IEEE International Conference on Electron Devices and Solid State Circuit (EDSSC)*. Thailand – Bangkok.. 2012. P.3-5. <https://doi.org/10.1109/EDSSC.2012.6482791>
13. Surovtsev R.S., Nosov A.V., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. Possibility of Protection Against UWB Pulses Based on a Turn of a Meander Microstrip Line. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2017. V.59. №6. P.1864-871. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2017.2678019>
14. Surovtsev R.S., Nosov A.V., Zabolotsky A.M. Simple method of protection against UWB pulses based on a turn of meander microstrip line. *16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices*. 2015. June 29-July 3. P.175-177. <https://doi.org/10.1109/EDM.2015.7184519>
15. Nosov A.V., Surovtsev R.S. Ultrashort pulse decomposition in the turn of a meander microstrip line with a passive conductor. *Journal of Physics: Conference*

- Series (JPCS)*. 2021. V.1862. №1. P.1-6. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1862/1/012029>
16. Kim G.Y., Nosov. A.V., Surovtsev R.S. Ultrashort Pulse Decomposition in Hybrid Protection Devices Based on the Cascade-Connected Modal Filter and Meander Line With Broad-Side Coupling. *22th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices*. 2021. P.163-166. <https://doi.org/10.1109/EDM52169.2021.9507720>
17. Kim G.Y., Nosov. A.V., Surovtsev R.S., Gazizov T.T., Maximov A.E. Conditions for ultrashort pulse decomposition in multi-cascade protection devices based on meander microstrip lines. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. V.1679. P.1-6. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1679/2/022059>
18. 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. V.560. P.1-7. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/560/1/012110>
19. Technological possibilities of production. [web]. *Resonance*. date of access: 20.03.2022. URL: <https://www.rezonit.ru/pcb/mnogosloynnye-pechatnye-platy/#tech>

**For citation:**

Malygin K.P., Nosov A.V., Surovtsev R.S. Attenuation of an ultrashort pulse in a meander microstrip line with two passive conductors. *Zhurnal radioelektroniki* [Journal of Radio Electronics] [online]. 2022. №4. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.7.10>

Радиотехника

Малыгин Константин Петрович (ORCID: 0000-0001-8321-6293, Researcher ID: AAI-1979-2021 SPIN: 5280-8559), Носов Александр Вячеславович (ORCID: 0000-0002-5005-3026, Scopus ID: 57040761500 Researcher ID: F-7419-2017 SPIN: 9797-2157), Суровцев Роман Сергеевич (ORCID: 0000-0001-6609-0449, Scopus ID: 56653514000, Researcher ID: AAZ-1771-2020, SPIN: 6397-0980).