

УДК 621.396.6:621.391.827

С. Карри, Р.С. Суворцев

## Экспериментальное исследование характеристик прототипа полоскового устройства защиты от импульсных воздействий на основе витка меандровой линии

Представлены результаты исследования частотных и временных характеристик прототипа устройства защиты от импульсных сверхширокополосных (СШП) воздействий на основе витка меандровой линии (МЛ). Сначала кратко представлены результаты моделирования устройства и обоснован выбор параметров поперечного сечения исходного витка. Для проектирования витка МЛ на заданной площади печатной платы он свернут в меандр со слабой связью между неосновными полувитками, что позволило разместить виток с длиной 2650,6 мм и шириной 3,7 мм на площади  $67,3 \times 70,3$  мм<sup>2</sup> с сохранением свойств защиты от импульсных СШП-воздействий. Представлены результаты измерения частотных и временных характеристик изготовленного прототипа на базе векторного анализатора цепей (ВАЦ), а также результаты измерения излучаемых помехоэмиссий с применением ВАЦ и ТЕМ-камеры. Экспериментально подтверждены закономерности разложения импульсных СШП-воздействий в витке МЛ на примере воздействий разной длительности. Показано ослабление до 3,6 раза. Выявлены частотные диапазоны, в которых уровень излучаемых помехоэмиссий максимален.

**Ключевые слова:** виток меандровой линии, полосковое устройство защиты, СШП-воздействие, излучаемые помехоэмиссии.

**DOI:** 10.21293/1818-0442-2023-26-2-14-20

Тенденции развития современных радиоэлектронных средств (РЭС) требуют уменьшения габаритов устройств и увеличения их производительности. Второе, как правило, обеспечивается ростом граничных частот спектра используемых сигналов [1], а первое – плотности трассировки и компоновки элементов печатных плат. Из-за этого уменьшается порог восприимчивости РЭС к электромагнитным воздействиям (ЭМВ) [2], а обеспечение требований электромагнитной совместимости (ЭМС) при проектировании устройств становится все более трудным [3]. Поэтому разработка эффективных мер защиты РЭС от ЭМВ-развития не теряет актуальности.

Нормативные документы регламентируют проведение испытаний РЭС на устойчивость к кондуктивным ЭМВ самой разной формы [4, 5]. Весьма опасны мощные сверхширокополосные (СШП) воздействия [6]. Благодаря широкому спектру часть их частотных компонент проникает внутрь РЭС, минуя электромагнитные экраны, а за счёт малого времени нарастания и высокой амплитуды приводит к выходу РЭС из строя [1]. Это обусловлено тем, что за время действия энергия воздействия не успевает передаться окружающим элементам цепи и приводит к пробоем диэлектриков и полупроводников в чувствительных зонах выделения тепла [7].

Технологии генерации таких СШП-воздействий развиваются по трем основным направлениям: разработка мощных релятивистских электровакуумных приборов, создание твердотельных и газоразрядных СШП-генераторов, а также разработка новых и совершенствование существующих нерелятивистских электровакуумных приборов [8]. Результатом развития являются так называемые электромагнитные системы высокой мощности (HPEMS – high-power electromagnetic systems), которые способны воздействовать на объект направленными импульсами, что может мгновенно вывести из строя его РЭС.

К известным схемотехническим средствам защиты относятся фильтры на основе компонентов с сосредоточенными и распределенными параметрами, ограничители и др. [9, 10]. К конструктивным средствам относятся различные методы заземления, защитные экраны и методы повышения их однородности, методы уменьшения импеданса цепей питания [11]. Недостатки традиционных средств не позволяют обеспечить должную защиту.

Одним из подходов к защите является применение полосковых устройств с модальным разложением [12, 13]. Недостатком таких устройств является их большая длина, необходимая для разложения воздействий при увеличении их длительности. Поэтому для размещения устройства на основе витка меандровой линии (МЛ) на заданной площади предложено сворачивание витка в меандр со слабой связью. В результате численного моделирования витка разными подходами выявлены закономерности ослабления импульсных воздействий [14]. Однако их экспериментального подтверждения не приведено. Поэтому целью данной работы является экспериментальное исследование частотных и временных характеристик прототипа устройства на основе витка МЛ для защиты от импульсных воздействий.

### Прототипирование устройства защиты

Поперечное сечение и схема соединений исходного витка МЛ показаны на рис. 1. Выполнен поиск оптимальных параметров поперечного сечения для размещения витка на площади  $80 \times 80$  мм<sup>2</sup>. Это ограничение связано с тем, что такие размеры позволяют оценить излучаемые эмиссии в ТЕМ-камере [15]. Согласно нормативным документам, устройство на печатной плате с размерами  $100 \times 100$  мм<sup>2</sup> со сплошным полигоном земли шириной 10 мм по периметру платы (для электрического контакта с прототипом с корпусом) помещается внутрь ТЕМ-камеры [16, 17].

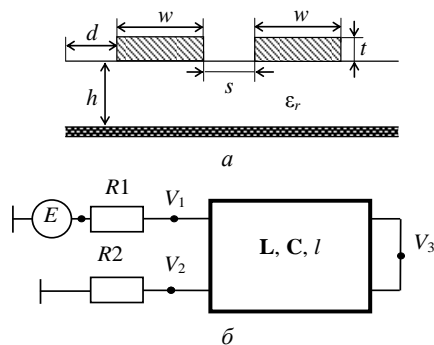


Рис. 1. Поперечное сечение – а и схема соединений – б витка МЛ на основе связанной МПЛ

В качестве основы платы выбран Rogers 4003С с  $\epsilon_r = 3,38 \pm 0,05$  (на частоте  $f = 10$  ГГц при  $T = 23$  °С) и толщиной основы  $h = 0,508$  мм, а фольги –  $t = 35$  мкм. Параметрическая оптимизация поперечного сечения витка (см. рис. 1, а) выполнена по критерию разложения импульсного воздействия длительностью 1 нс. В результате выбраны  $w = 300$  мкм и  $s = 100$  мкм. При

них  $(Z_e Z_o)^{0,5} = 76,7$  Ом, а погонные задержки мод  $\tau_e = 5,41$  нс/м и  $\tau_o = 4,81$  нс/м. Тогда при длине  $l = 1$  м это позволяет разложить импульс длительностью 1,2 нс (в соответствии с условием разложения, приведенном в [17]).

Для размещения витка длиной 1 м на плате размерами  $80 \times 80$  мм<sup>2</sup> из исходного витка нужно сформировать меандр со слабой связью между неосновными полувитками для минимизации влияния перекрестных связей между ними. Поперечное сечение такого витка показано на рис. 2, где  $s_1$  – расстояние между сигнальными проводниками, а  $s_2$  – расстояние между неосновными полувитками. В результате из исходного витка МЛ можно сформировать до 19 полувитков с длиной 65,86 мм (без учета скруглений на концах полувитков) при  $s_2 = 10w$ . Это позволило увеличить длину витка до 2650,6 мм. Такая трассировка позволила разместить виток указанной длины и шириной 3,7 мм на площади  $67,3 \times 70,3$  мм<sup>2</sup>.

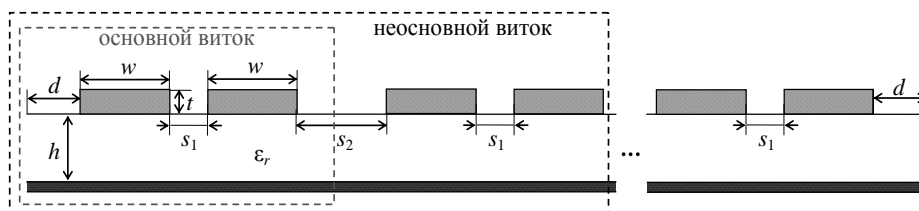


Рис. 2. Поперечное сечение витка, свернутого в меандр со слабой связью между неосновными полувитками

Выполнено моделирование формы напряжения на выходе витка (см. рис. 3) квазистатическим подходом в системе TALGAT. Вычисленные формы напряжения на выходе исходного и свернутого в меандр витков на воздействие импульсом в виде трапеции длительностью 900 пс (длительности нарастания, плоской вершины и спада по 300 пс) и амплитудой 1 В показаны на рис. 3. Сопротивления  $R1 = R2 = 50$  Ом.

Также видно, что учёт потерь приводит к довольно существенному уменьшению амплитуд нечётной и чётной мод (импульсов 2 и 3) на выходе витка, в то время как амплитуда импульса 1 (перекрестной помехи) не изменяется. Это связано с тем, что она наводится одновременно с началом распространения по витку основного сигнала и потери не влияют на его форму. Выявленное влияние потерь на основные составляющие сигнала на выходе витка позволяет предположить, что их влияние при измерениях прототипа будет существенным. Основываясь на результатах моделирования, изготовлен прототип витка МЛ (рис. 4).

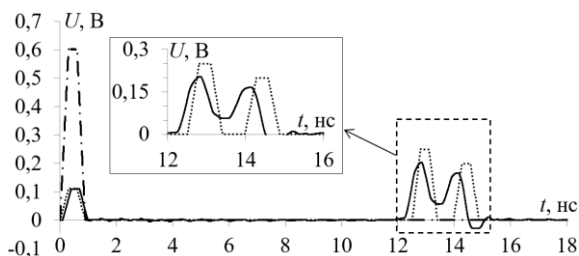


Рис. 3. Формы напряжения на выходе исходного витка (••) и витка, свернутого в меандр (—)

Отметим, что моделирование исходного витка выполнено без учёта потерь в проводниках и диэлектрике, а при моделировании витка, свернутого в меандр, они учтены. Для учёта потерь в диэлектрике использован тангенс угла диэлектрических потерь материала:  $\tan \delta = 0,0027$ . Вычисление потерь в проводниках выполнено с учётом скин-эффекта, эффекта близости и потерь в плоскости земли по модели [18]. Из рис. 3 видно, что форма напряжения представлена последовательностью из 3 основных импульсов.



Рис. 4. Вид печатной платы с прототипом витка МЛ

**Измерения в частотной области**

Выполнено измерение частотных зависимостей  $|S_{11}|$  и  $|S_{21}|$  прототипа на базе ВАЦ Rohde&Schwarz ZNB 20 в соответствии со схемой, показанной на рис. 5, в диапазоне частот 300 кГц – 5 ГГц.

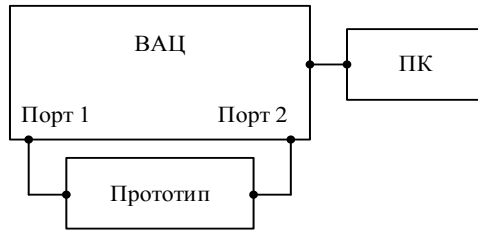


Рис. 5. Схема экспериментальной установки для измерения  $S$ -параметров прототипа

На рис. 6 показаны полученные электродинамическим подходом с учётом потерь и измеренные  $S$ -параметры прототипа в диапазоне до 1 ГГц.

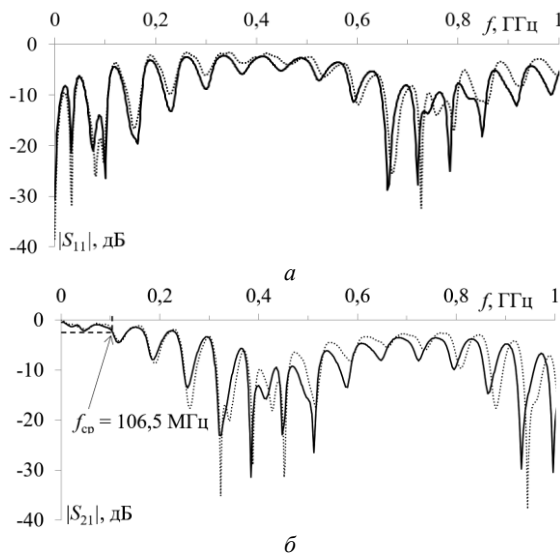


Рис. 6. Вычисленные (••) и измеренные (—) частотные зависимости  $|S_{11}|$  (а) и  $|S_{21}|$  прототипа

Из рис. 6 виден схожий характер кривых, а отличия наблюдаются в амплитудах минимумов и максимумов частотных зависимостей. Полоса пропускания витка по уровню минус 3 дБ в результате измерений составила 106,5 МГц, что на 1 МГц меньше, чем по результатам электродинамического моделирования. Таким образом, результаты измерений и вычислений хорошо согласуются. Кроме того, виден многорезонансный характер зависимостей  $S$ -параметров. Наличие такого количества резонансов объяснимо сложной структурой витка, свернутого в меандр, из-за чего возникает большое количество отражений от перемычек. Другой причиной является рассогласование витка с измерительным трактом: среднее геометрическое волновых сопротивлений четной и нечетной мод витка составляет 77,9 Ом. Также из рис. 6 виден периодический характер узлов и пучностей во всем диапазоне, что говорит о возможности построения частотно-селективного фильтра. Поскольку полоса пропускания фильтра составляет около 100 МГц, импульсные сигналы с длительностями фронта более 10 нс будут подвержены минимальным искажениям формы.

Возможность сохранения  $S$ -параметров, полученных в результате измерений с применением ВАЦ, позволяет их использовать для вычисления отклика

на заданное воздействие во временной области, если его спектр соответствует частотному диапазону, в котором выполнены измерения. Для этого можно использовать возможности системы ADS. Схема для такого анализа показана на рис. 7.

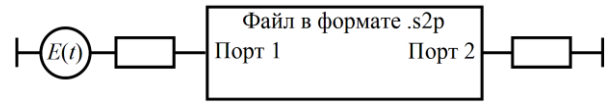


Рис. 7. Схема для анализа во временной области

Сначала в соответствии со схемой рис. 7 выполнен расчёт формы напряжения на выходе прототипа на воздействие импульсным сигналом в форме трапеции с длительностью 900 пс. Формы напряжения, полученные в результате измерений и электродинамического моделирования в пакете EMPro, показаны на рис. 8.

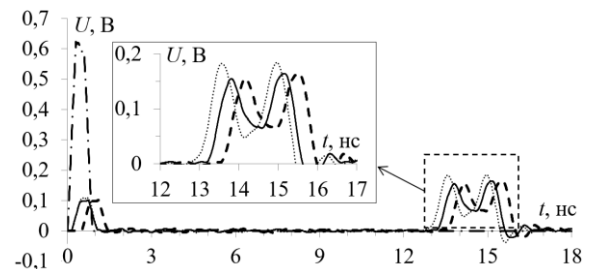


Рис. 8. Формы напряжения на выходе прототипа, полученные в результате вычислений (••), расчёта (—) и расчёта с учётом сдвига (—)

Видна существенная разница задержек откликов: даже для импульса 1 она составила 1,1 и 0,69 нс по результатам расчёта и вычисления. Разница вызвана задержкой в кабельных сборках и соединительных устройствах. Её учёт выполнен сдвигом на минус 363 пс. Поэтому на рис. 8 приведена форма напряжения в результате расчёта со сдвигом. Из него видно, что формы напряжения, полученные разными методами, хорошо согласуются. Воздействие в витке раскладывается на 3 импульса по результатам как электродинамического моделирования, так и измерений. Для наглядности в табл. 1 сведены амплитуды ( $U_1 - U_3$ ) и задержки ( $t_1 - t_3$ ) импульсов 1–3 на выходе прототипа, полученные в результате расчёта и моделирования.

Таблица 1  
Амплитуды (мВ) и задержки (нс)  
импульсов на выходе прототипа

Параметр	$U_1$	$t_1$	$U_2$	$t_2$	$U_3$	$t_3$
Моделирование	109,5	0,73	182,5	13,8	184,1	15,15
Расчёт	101,6	0,69	154,9	13,6	164,1	15

Значения в табл. 1 также подтверждают сходимость результатов. Наибольшая разница задержек (около 0,2 нс) и амплитуд (около 30 мВ) наблюдается для импульса 2 (см. табл. 1). Различия амплитуд могут быть вызваны рассогласованием с трактом, а также более сильным влиянием потерь при измерениях. Ослабление по результатам расчёта составило

около 3,6 раза относительно амплитуды воздействия на входе витка. Несмотря на выявленные различия, результаты измерений подтверждают выводы о возможности сворачивания витка в меандр со слабой связью между неосновными полувитками для проектирования его на заданной площади.

**Измерения во временной области**

Дополнительно измерены формы напряжения на выходе прототипа на базе комбинированного осциллографа С9-11 (рис. 9). Для фиксации и экранирования от внешних воздействий прототип помещен в uTEM-камеру. В качестве воздействий использованы нормированные по максимальному уровню импульсы с выхода генератора осциллографа С9-11 с длительностью около 900 и 300 пс по уровню половины от амплитуды. Коаксиальные переходы и кабельные сборки вносят задержку около 320 пс, которая также учтена в виде сдвига.

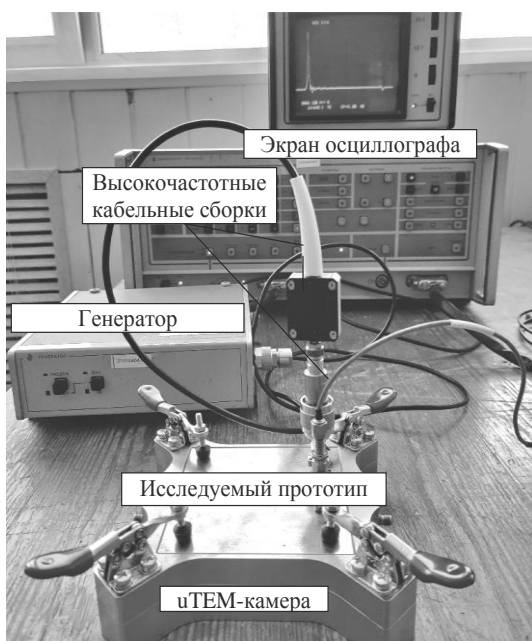


Рис. 9. Вид экспериментальной установки на базе комбинированного осциллографа С9-11

Формы сигнала на выходе прототипа витка, полученные в результате электродинамического моделирования и измерений, показаны на рис. 10.

В табл. 2 сведены амплитуды  $U_1 - U_3$  и задержки  $t_1 - t_3$  импульсов 1–3 на выходе прототипа, снятые с экрана осциллографа и полученные в результате электродинамического моделирования. Из результатов рис. 10 и табл. 2 следует, что они согласуются, а различия вызваны более сильным влиянием реальных неоднородностей, потерь и дисперсии.

Из рис. 10 виден разный характер искажения основных импульсов: при моделировании амплитуда нечётной моды выше амплитуды чётной, а при измерениях – наоборот (что также согласуется с результатами на рис. 8). Между тем это практически не оказывает влияния на оценку общей амплитуды сигнала на выходе прототипа, что подтверждают результаты из табл. 2. Также следует отметить незначительное

отличие задержек: не более 0,5 нс (при воздействии импульсом длительностью 885 пс) для чётной моды, а для остальных составляющих оно еще меньше. Ослабление по результатам измерений составило около 2,7 раза относительно амплитуды на входе витка вне зависимости от длительности воздействия из-за его лишь частичного разложения.

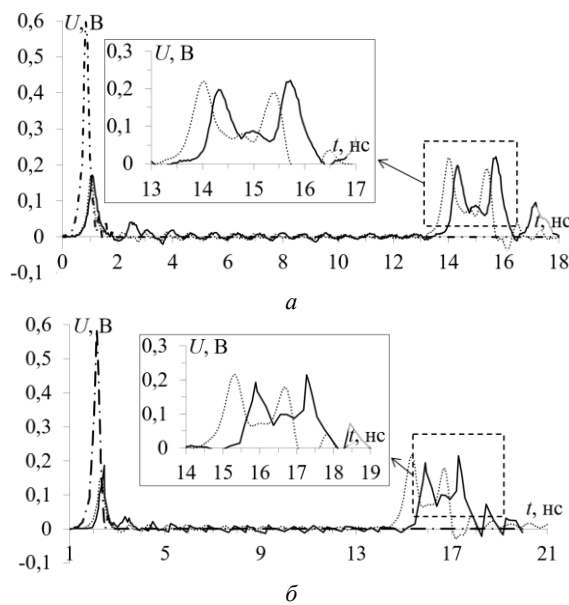


Рис. 10. Вычисленные (••) и измеренные (—) формы напряжения на выходе прототипа при воздействиях длительностью 900 пс (а) и 300 пс (б)

Таблица 2

**Амплитуды (мВ) и задержки (нс) импульсов на выходе прототипа при воздействии импульсами разной длительности**

Параметр	$U_1$	$t_1$	$U_2$	$t_2$	$U_3$	$t_3$
Воздействие длительностью 885 пс						
Моделирование	169	1,03	219	14,02	190	15,4
Измерение	171	1,04	198	14,32	222	15,72
Воздействие длительностью 287 пс						
Моделирование	152	2,31	216	15,32	178	16,68
Измерение	187	2,34	193	15,79	215	17,19

Из рис. 10, б видно, что результаты согласуются хуже: различие амплитуд и задержек выше, чем на рис. 10, а. Это может быть связано с более существенным влиянием отражений, потерь и дисперсии при более коротком воздействии. Отметим рост амплитуды перекрестной наводки на 35 мВ (по сравнению с 2 мВ при длительности 885 пс). Различие задержки чётной моды, полученной разными методами, увеличилось до 0,6 нс. Также отметим, что при уменьшении длительности воздействия дополнительный импульс между импульсами мод проявляется более явно, что согласуется с данными, полученными при анализе во временной области в результате вычислений на основе S-параметров. Возможной причиной его появления является асимметрия прототипа относительно центра, а также отражения. Согласованность характера искажения форм напряжения на рис. 8 и 10 говорит о возможности анализа временных характе-

ристик на основе измерения лишь  $S$ -параметров (в соответствии со схемой на рис. 7). Это даёт возможность задания воздействия произвольной формы.

#### Измерения излучаемых помехоэмиссий

На следующем этапе целесообразна оценка излучаемых помехоэмиссий и восприимчивости прототипов. Эти измерения нужно выполнить на базе ВАЦ и ТЕМ-камеры в соответствии с нормативными документами. При этом измерения должны проводиться на базе четырехпортового ВАЦ, поскольку к нему подключаются и исследуемый прототип, и ТЕМ-камера (рис. 11).



Рис. 11. Схема экспериментальной установки измерений в ТЕМ-камере для оценки излучаемых помехоэмиссий

При измерении прототипов с помощью ТЕМ-камеры и ВАЦ полученные частотные зависимости коэффициентов передачи между ТЕМ-камерой и макетом  $|S_{12}|$  и  $|S_{43}|$  характеризуют излучаемые помехоэмиссии исследуемого прототипа, а  $|S_{21}|$  и  $|S_{34}|$  – его восприимчивость. Полученные на данном этапе результаты уже позволяют оценить характер и уровень излучаемых помехоэмиссий и восприимчивость прототипа к электромагнитным воздействиям в заданном частотном диапазоне.

Для оценки излучаемых помехоэмиссий прототипа измерены частотные зависимости коэффициента передачи между  $\mu$ ТЕМ-камерой и прототипом  $|S_{43}|$  в соответствии со схемой рис. 11. Измерения выполнены в 4 направлениях воздействия поперечной волной (при повороте прототипа относительно источника) на прототип. Однако частотные зависимости при исходном положении и повороте на  $180^\circ$ , а также на  $90$  и  $270^\circ$  незначительно отличаются только по частоте и амплитуде резонансов. Поэтому на рис. 12 приведены частотные зависимости при исходном положении и повороте на  $90^\circ$ .

Из рис. 12 виден многорезонансный характер частотных зависимостей. При повороте прототипа внутри камеры на  $90^\circ$  наблюдается существенный рост коэффициента передачи в ряде частотных областей:  $1\text{--}1,5$  ГГц (амплитуда  $-15$  дБ на частоте  $1,24$  ГГц);  $2,2\text{--}2,8$  ГГц (амплитуда  $-16,1$  дБ на частоте  $2,41$  ГГц);  $3,6\text{--}4,2$  ГГц (амплитуда  $-17,6$  дБ на частоте  $3,65$  ГГц);  $4,7\text{--}5$  ГГц (амплитуда  $-20,6$  дБ на частоте  $4,9$  ГГц).

Выявленный характер говорит о существенном влиянии электромагнитной волны в указанных частотных диапазонах на характеристики прототипа, что может привести к появлению нежелательных сиг-

налов на его выходе. При исходном положении прототипа наблюдается более стабильный характер частотной зависимости  $|S_{34}|$  с выраженным максимумом в окрестности частоты  $2,42$  ГГц с амплитудой  $-24,3$  дБ. Такое поведение частотной зависимости  $|S_{34}|$  неудивительно, поскольку прототип основан на меандровой структуре, которая применяется при построении антенных устройств. Поэтому на частотах резонансов возможно формирование электромагнитного поля значительной напряженности, амплитуда которого может не соответствовать требованиям. Это нужно учитывать при расположении вблизи устройств защиты на основе витка чувствительных цепей.

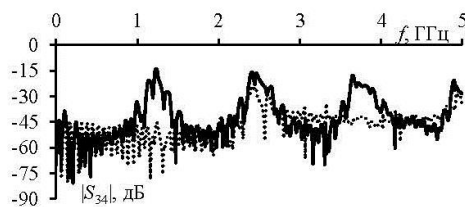


Рис. 12. Измеренные частотные зависимости коэффициента  $|S_{34}|$  при угле поворота прототипа в  $\mu$ ТЕМ-камере  $0^\circ$  ( $\bullet$ ) и  $90^\circ$  ( $\text{—}$ )

Таким образом, комплекс представленных результатов экспериментальных исследований показывает возможность сворачивания витка МЛ в меандр для его размещения на заданной площади печатной платы с сохранением свойств защиты. При этом из-за влияния реальных потерь и дисперсии ослабление СШП-воздействия будет даже выше.

#### Заключение

Представлены результаты комплексного экспериментального исследования прототипа витка МЛ на основе МПЛ в частотной и временной областях. Для этого сначала кратко представлены результаты предварительного квазистатического моделирования формы напряжения на выходе исходного витка МЛ и витка, свернутого в меандр со слабой связью между неосновными полувитками с учётом потерь. Показано, что из-за потерь и сворачивания витка амплитуда основных составляющих разложения импульсного сигнала на выходе витка уменьшается. Это значит, что на практике влияние потерь на уменьшение амплитуды будет еще существеннее. Затем изготовлен прототип и измерены частотные зависимости его  $S$ -параметров. В результате измерений полоса пропускания витка по уровню минус 3 дБ составила  $106,5$  МГц, что на  $1$  МГц меньше, чем по результатам моделирования. Это позволяет говорить о том, что импульсные сигналы с длительностями фронта более  $10$  нс будут подвержены минимальным искажениям формы. Затем выполнены расчёт и электродинамическое моделирование формы напряжения на выходе прототипа на основе измеренных частотных зависимостей  $S$ -параметров при идеализированном воздействии. Формы напряжения, полученные разными способами, согласуются. При этом ослабление амплитуды составило около  $3,6$  раза относительно ам-

плитуды воздействия на входе прототипа. Затем проведены измерения формы напряжения на выходе прототипа на базе комбинированного осциллографа С9-11. Измеренные и вычисленные электродинамическим подходом формы напряжения также приемлемо согласуются. Схожий характер искажения измеренных и рассчитанных на основе  $S$ -параметров форм напряжения показал возможность анализа временных характеристик на основе измерения лишь  $S$ -параметров при воздействии произвольной формы. В результате измерения излучаемых помехоэмиссий прототипа выявлены частотные диапазоны с максимальным уровнем излучения. Поэтому возможно формирование электромагнитного поля значительной напряженности на резонансных частотах. Амплитуда поля может не соответствовать требованиям, что нужно учитывать при расположении вблизи витка чувствительных цепей.

Таким образом, в результате численных и экспериментальных исследований показана возможность размещения витка МЛ длиной 2650,6 мм и шириной 3,7 мм на площади до 67,3x70,3 мм<sup>2</sup> с сохранением защитных свойств (увеличением ослабления из-за реального влияния потерь и дисперсии) для защиты от импульсных СШП-воздействий.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента МК-396.2022.4.

#### Литература

1. Гизатуллин З.М. Помехоустойчивость средств вычислительной техники внутри зданий при широкополосных электромагнитных воздействиях. – Казань: Казанский нац. иссл. техн. ун-т им. А. Н. Туполева, 2012. – 254 с.
2. 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. Моделирование элементов критичной радиоэлектронной аппаратуры: новые подходы, модели и алгоритмы, их реализация и применение / Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий, С.П. Куксенко, М.Е. Комнатнов, Р.С. Суровцев // Наноиндустрия. – 2020. – Т. 13, № S5-2 (102). – С. 425–432.
4. ГОСТ ИЕС/TR 61000-1-5-2017. Воздействия электромагнитные большой мощности (ЭМБМ) на системы гражданского назначения. – М.: Стандартинформ, 2007. – 41 с.
5. MIL-STD-461F-2007. Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment.
6. Три возможных механизма возникновения отказов электронных устройств в результате электромагнитного воздействия / Л.Н. Здухов, Л.Н. Парфёнов, О.А. Тарасов, В.М. Чепелев // Технологии ЭМС. – 2018. – № 2 (65). – С. 22–34.
7. Егоров А.Б. Воздействие мощного электромагнитного излучения на радиоэлектронные средства / А.Б. Егоров, А.М. Сотников, И.Ф. Рыбалко // Сборник науч. тр. ДонИЖТ. – 2012. – № 29. – С. 49–54.
8. Анализ технологий генерации мощного импульсного радиочастотного излучения и перспективы их развития / И.Н. Белоконов, А.Н. Гончаров, Е.В. Иванов, А.С. Кудряшов // Технологии ЭМС. – 2010. – №1. – С. 49–57.
9. Tzong L.W. A novel dual-function circuit combining high-speed differential equalizer and common-mode filter with an additional zero / L.W. Tzong, Y.H. Chih // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. – 2014. – Vol. 24, No. 9. – P. 617–619.
10. Techniques for improving the high-frequency performance of the planar CM EMI Filter / B.-J. Hu, G. Wei, L.-Y. Deng, H.-F. Huang // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2013. – Vol. 55, No. 5. – P. 901–908.
11. Кечиев Л.Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры. – М.: Группа ИДТ, 2007. – 616 с.
12. Belousov A. O. Systematic approach to optimization for protection against intentional ultrashort pulses based on multiconductor modal filter / A.O. Belousov, T.R. Gazizov // Complexity. – 2018. – No. 2018. – 15 p.
13. Possibility of protection against UWB pulses based on a turn of a meander microstrip line / R.S. Surovtsev, A.V. Novosov, A.M. Zabolotsky, T.R. Gazizov // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2017. – Vol. 59, № 6. – P. 1864–1871.
14. Карри С. Анализ влияния потерь в проводниках и диэлектрике на форму и амплитуду сверхкороткого импульса в защитной меандровой линии / С. Карри, Р.С. Суровцев // Матер. докл. XV Междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления», Томск. – Томск: В-Спектр, 2021. – С. 59–61.
15. Demakov A.V. TEM cell for testing low-profile integrated circuits for EMC / A.V. Demakov, M.E. Komnatnov // 21st international conference on micro/nanotechnologies and electron devices EDM. – 2020. – P. 154–158.
16. IEC 62132-2 Integrated Circuits. Measurement of Electromagnetic Immunity. – Part 2: Measurement of Radiated Immunity, TEM Cell and Wideband TEM Cell Method. – First Edit., 2010. – 49 p.
17. IEC 61967-2 Integrated Circuits Measurement of Electromagnetic Emissions Part 2: Measurement of Radiated Emissions, TEM Cell and Wideband TEM Cell Method. – First Edition, 2005. – 24 p.
18. Matthaеi G.L. Approximate calculation of the high-frequency resistance matrix for multiple coupled lines / G.L. Matthaеi, G.C. Chinn // 1992 IEEE MTT-S Microwave Symposium Digest. – 1992. – P. 1353–1354.

#### Карри Салим

М.н.с., аспирант каф. телевидения и управления (ТУ) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)  
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
ORCID: 0000-0001-7370-0110  
Тел.: +7-923-411-06-01  
Эл. почта: karrisalim.h@gmail.com

#### Суровцев Роман Сергеевич

Канд. техн. наук, с.н.с. НИЛ «БЭМС РЭС», докторант, доцент ТУСУР  
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
ORCID: 0000-0001-6609-0449  
Тел.: +7 (382-2) 41-34-39  
Эл. почта: surovstvrs@gmail.com

Karri S., Surovtsev R.S.

**Experimental study of characteristics of stripline device prototype based on meander line turn for protection against pulsed excitations**

The study results of frequency and time characteristics for a prototype device intended to ensure the protection against pulsed ultra-wideband (UWB) excitations based on a meander line (ML) turn are presented. First, the simulation results of the device are briefly presented and the choice of the cross-sectional parameters of the initial turn is justified. In order to design the ML turn on a given PCB area, it is bent into a meander with weak coupling between non-core half-turns, which allowed placing a turn with a length of 2650,6 mm and width of 3.7 mm on an area of  $67,3 \times 70,3$  mm<sup>2</sup> with preserving the properties of protection against UWB influences. The results of measuring the frequency and time characteristics of the manufactured prototype based on a vector network analyzer (VNA), as well as the results of measuring the radiated emissions using the VNA and uTEM-cell are presented. The regularities of pulsed UWB influences decomposition in the turn are experimentally confirmed on the example of idealized and real excitations of different durations. The attenuation up to 3.6 and 2.7 times is obtained at idealized and real excitation respectively. The frequency ranges in which the level of radiated emissions is maximal are revealed.

**Keywords:** meander line turn, stripline protection device, UWB excitation, radiated emission.

**DOI:** 10.21293/1818-0442-2023-26-2-14-20

*References*

1. Gizatullin Z.M. [Noise immunity of computer equipment inside buildings when exposed to broadband electromagnetic interference]. *Tupolev Kazan National Research Technical University*, 2012, 254 p. (in Russ.).
2. Sakharov K.Yu., Sokolov A.A., Mikheev O.V., Turkin V.A., Kornev A.N., Dolbnya S.N., Pevnev A.V. [Investigation of local computer network functioning under the influence of ultra-short electromagnetic pulses]. *Technologies of Electromagnetic Compatibility*, 2006, № 3 (18), pp. 36–45 (in Russ.).
3. Gazizov T.R., Zabolotskii A.M., Kuksenko S.P., Komnatnov M.E., Surovtsev R.S. [Critical radio-electronic equipment elements modeling: new approaches, models and algorithms, their implementation and application]. *Nanoindustry*, 2020, T. 13, № S5-2 (102), pp. 425–432.
4. IEC 61000-1-5. Electromagnetic compatibility (EMC). Part 1-5: General High power electromagnetic (HPEM) effects on civil systems. *Moscow, Standartinform Publishing*, 2004, 41 p.
5. MIL-STD-461F-2007. Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment.
6. Zdukhov L.N., Parfyonov L.N., Tarasov O.A., V.M. Chepelev [Three possible mechanisms for the occurrence of electronic devices failures as a result of electromagnetic influence]. *Technologies of Electromagnetic Compatibility*, 2018, no. 2(65), pp. 22–34 (in Russ.).
7. Egorov A.B., Sotnikov A.M., Rybalko I.F. [The impact of powerful electromagnetic radiation on radio-electronic means]. *Collection of Scientific Works of Don Institute of Railway Transport*, 2012, no. 29, pp. 49–54 (in Russ.).
8. Belokon I.N., Goncharov A.N., Ivanov E.V., Kudryashov A.S. [Analysis of technologies for powerful pulsed radio frequency radiation generation and prospects for their development]. *Technologies of Electromagnetic Compatibility*, 2010, № 1, pp. 49–57 (in Russ.).

9. Tzong L.W., Chih Y.H. A novel dual-function circuit combining high-speed differential equalizer and common-mode filter with an additional zero. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2014, Vol. 24, no. 9, pp. 617–619.

10. Hu B.-J., Wei G., Deng L.-Y., Huang H.-F. Techniques for improving the high-frequency performance of the planar CM EMI Filter. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2013, vol. 55, no. 5, pp. 901–908.

11. Kechiev L.N. [Design of printed circuit boards for digital high-performance equipment]. Moscow, IDT group, 2007, 616 p. (in Russ.).

12. Belousov A. O., Gazizov T.R. Systematic approach to optimization for protection against intentional ultrashort pulses based on multiconductor modal filter, *Complexity*, 2018, no. 2018, 15 p.

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, vol. 59, № 6, pp. 1864–1871.

14. Karri S., Surovtsev R.S. Analiz vliyaniya poter' v provodnikakh i dielektrike na formu i amplitudu sverkhkorotkogo impul'sa v zashhitnoi meandrovoi linii [Analysis of the influence of losses in conductors and dielectric on the ultra-short pulse shape and amplitude in a protective meander line]. *Proceedings of XV International Scientific Conference on Electronic Devices and Control Systems*, Tomsk: «V-Spectr» Publ., 2021, pp. 59–61 (in Russ.).

15. Demakov A.V., Komnatnov M.E. TEM cell for testing low-profile integrated circuits for EMC. *21st International Conference on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM*, 2020, pp. 154–158.

16. IEC 62132-2 Integrated Circuits. Measurement of Electromagnetic Immunity. Part 2: Measurement of Radiated Immunity, TEM Cell and Wideband TEM Cell Method. First Edit., 2010, 49 p.

17. IEC 61967-2 Integrated Circuits Measurement of Electromagnetic Emissions Part 2: Measurement of Radiated Zdukhov Emissions, TEM Cell and Wideband TEM Cell Method, First Edition, 2005, 24 p.

18. Matthaei G.L., Chinn G.C. Approximate calculation of the high-frequency resistance matrix for multiple coupled lines. *1992 IEEE MTT-S Microwave Symposium Digest*, 1992, pp. 1353–1354.

**Salim Karri**

Junior Researcher, Postgraduate student, Department Television and Control, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7-923-411-06-01  
Email: karrisalim.h@gmail.com

**Roman S. Surovtsev**

Candidate of Science in Engineering, Senior Researcher, Research Laboratory «BEMS RES», Doctoral student, Associate Professor, Department of the Television and Control, TUSUR  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
ORCID: 0000-0001-6609-0449  
Phone: +7 (382-2) 41-34-39  
Email: surovtssevs@gmail.com