

Р. С. СУРОВЦЕВ, канд. техн. наук, доцент каф. ТУ,  
ТУСУР, Томск  
П. В. МИКОЛА, аспирант каф. ТУ, ТУСУР, Томск

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ АСИММЕТРИИ  
ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ВИТКА  
МЕАНДРОВОЙ ЛИНИИ НА ИСКАЖЕНИЕ  
ЗАТУХАЮЩЕГО СИНУСОИДАЛЬНОГО  
ВОЗДЕЙСТВИЯ**

Представлены оценки влияния асимметрии поперечного сечения витка меандровой линии, которая достигалась разной шириной полувитков, на искажение составляющих разложения затухающей синусоиды на выходе витка. Выявлено существование значения ширины полувитка, при котором амплитуды составляющих, характеризующих чётную и нечётную моды, равны. Показано, что введение асимметрии поперечного сечения ведет к возникновению дополнительной составляющей разложения и росту её амплитуды по мере увеличения асимметрии.

Обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) является важным этапом при проектировании радиоэлектронных средств (РЭС), которые должны бесперебойно работать в условиях заданной электромагнитной обстановки [1]. Одной из задач является обеспечение помехоустойчивости РЭС, которая ухудшается из-за стремления к росту быстродействия за счёт повышения верхних граничных частот используемых сигналов, уменьшения их операционных напряжений, а также миниатюризации РЭС. Эти тенденции ведут к росту восприимчивости РЭС к электромагнитным воздействиям (ЭМВ). Типовыми формами ЭМВ, которые используются для тестирования помехоустойчивости, являются одиночный импульс, затухающая синусоида и пачки радиоимпульсов [2]. Для защиты РЭС от ЭМВ применяются различные фильтры, развязывающие и ограничительные устройства, защитные экраны и методы заземления [3]. Часто из-за низкого быстродействия, влияния паразитных параметров и ограниченного ресурса срабатываний традиционные подходы не

обеспечивают должной защиты [4]. Поэтому исследование новых подходов остается актуальным.

Предложен подход к защите от одиночных воздействий наносекундного диапазона, который основан на разложении воздействия на составляющие с меньшей амплитудой в полосковых меандровых линиях [5]. Достоинствами подхода являются отсутствие паразитных эффектов, полупроводниковых элементов и неограниченный ресурс срабатываний. Отметим, что введение асимметрии поперечного сечения даже одного витка меандровой линии позволяет дополнительно ослабить амплитуду выходного сигнала за счет появления дополнительной составляющей разложения при воздействии импульсным сигналом [6]. Возможность применения такого подхода к другим типовым формам воздействий ранее не рассматривалась. Поэтому цель данной работы – оценить влияние асимметрии поперечного сечения витка меандровой линии на искажение затухающего синусоидального воздействия. Наиболее простым путем для этого является анализ витка при разной ширине полувитков.

Для анализа выбран виток меандровой линии (рисунок 1,а). Исходные параметры его поперечного сечения: толщина фольги  $t = 35$  мкм, ширина проводников  $w_1 = w_2 = 200$  мкм, расстояние между проводниками  $s = 100$  мкм, толщина и относительная диэлектрическая проницаемость основы  $h = 510$  мкм и  $\epsilon_r = 10$ . Схема соединений витка для моделирования показана на рисунке 1,б.

В качестве воздействия принята затухающая синусоида с амплитудой э.д.с. 1 В, частотой  $f_0 = 1$  ГГц и коэффициентом затухания  $\beta = 1/\tau_c = 10^9$ , где  $\tau_c = 1$  нс – время, за которое амплитуда ( $U_0$ ) уменьшится в  $e$  раз ( $e \approx 2,718$ ). Для исключения наложения составляющих разложения друг на друга длина витка принята  $l = 4$  м. Окончания витка ( $R_1=R_2$ ) приняты по 50 Ом.

Выполнено моделирование (в системе TALGAT) витка при изменении сначала  $w_1$ , а затем  $w_2$  в диапазоне 200–2000 мкм с шагом 200 мкм при других значениях исходных параметров. В качестве примера на рисунке 2 показан отклик в узле  $V_4$  при  $w_1 = 2000$  мкм,  $w_2 = 200$  мкм и  $s = 100$  мкм. Из него видно, что на выходе витка наблюдаются 4 составляющие.

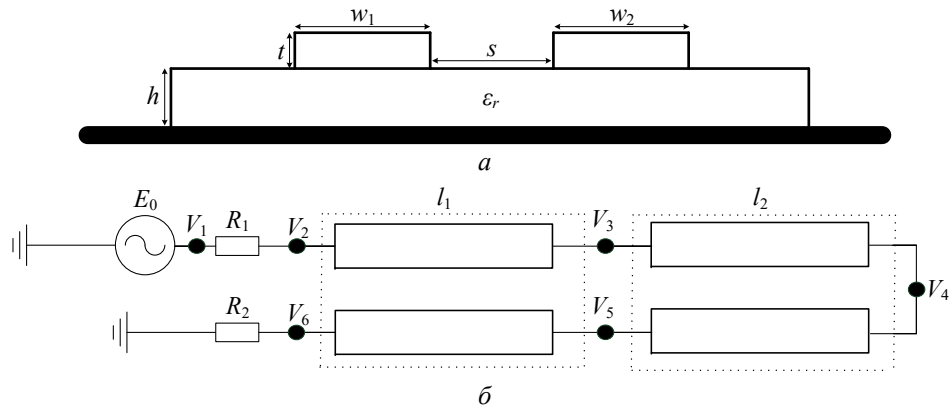


Рисунок 1 – Вид поперечного сечения витка (а) и его схема соединения (б)

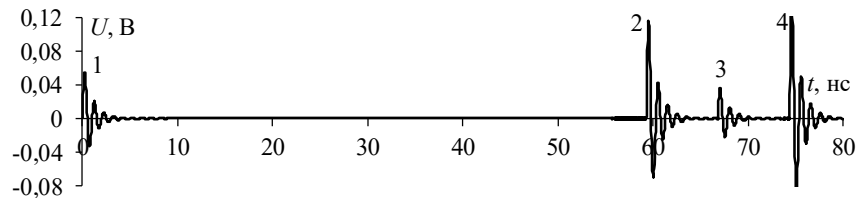


Рисунок 2 – Форма напряжения на выходе витка (в узле  $V_4$ ) при  $w_1=2000$  мкм и  $w_2=200$  мкм

Составляющая 1 – это наводка на ближнем конце, которая формируется одновременно с началом распространения сигнала по витку, составляющие 2 и 4 являются результатом модального разложения сигнала и приходят на выход с задержками мод витка, а составляющая 3 проявляется из-за асимметрии поперечного сечения витка (её задержка равна полусумме задержек мод). Амплитуда сигнала определяется составляющей 4.

В таблицу 1 сведены амплитуды сигнала на входе ( $U_0$  в узле  $V_2$ ) и выходе ( $U_1-U_4$  – амплитуды составляющих 1–4 в узле  $V_4$ ) витка при изменении  $w_1$ .

Таблица 1 – Амплитуды (мВ) сигнала в узлах  $V_2$  и  $V_4$  при изменении  $w_1$  (мкм)

$w_1$	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
$U_0$	425	380	346	319	297	278	261	246	233	222
$U_1$	93	87	81	76	71	65	63	60	57	54
$U_2$	191	183	173	162	152	143	134	127	120	115
$U_3$	0	5	11	18	23	27	30	33	35	36
$U_4$	177	180	176	170	164	157	151	146	140	135

Из таблицы 1 видно, что амплитуда сигнала на выходе до  $w_1 = 400$  мкм определяется составляющей 2, а после – составляющей 4. Это значит, что между  $w_1 = 400$  и 600 мкм есть значение  $w_1$ , при котором амплитуды составляющих равны, это объясняется равенством  $\sqrt{Z_e Z_o}$  сопротивлению окончаний 50 Ом (таблица 2).

Таблица 2 – Зависимость характеристических импедансов (Ом) чётной ( $Z_e$ ) и нечётной ( $Z_o$ ) мод витка и их среднего геометрического  $\sqrt{Z_e Z_o}$  от  $w_1$  (мкм)

$w_1$	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
$Z_e$	96,95	83,76	76,30	71,53	68,26	65,91	64,16	62,81	61,74	60,87
$Z_o$	36,65	32,81	29,91	27,44	26,30	23,42	21,78	20,33	19,06	17,92
$\sqrt{Z_e Z_o}$	59,60	52,42	47,77	44,30	41,56	39,29	37,38	35,74	34,30	33,03

Также видно, что амплитуда составляющей 1 уменьшается для всех  $w_1$ , что объясняется ослаблением электромагнитной связи между полувитками. Наконец, отметим, амплитуда составляющей 3 увеличивается во всем диапазоне изменения  $w_1$ , что связано с увеличением влияния асимметрии. Таким образом, увеличение  $w_1$  приводит к уменьшению амплитуды выходного сигнала, которая определяется составляющей 4 ( $U_4 = 135$  мВ при  $w_1 = 2000$  мкм). Также отметим уменьшение  $U_0$ , вызванное рассогласованием в точке  $V_2$  с  $R_1 = 50$  Ом из-за изменения  $w_1$ .

В таблицу 3 сведены амплитуды сигнала в узлах  $V_2$  и  $V_4$  витка от  $w_2$ . Из нее видно, что характер зависимостей  $U_1-U_4$  от  $w_2$  такой же, как в таблице 1, за исключением зависимости  $U_0(w_2)$  – значение  $U_0$  практически постоянно для всех  $w_2$  (поскольку  $U_0$  определяется коэффициентом отражения на входе витка). Отметим, что таблица 2 будет справедлива и при изменении  $w_2$ .

Таблица 3 – Амплитуды (мВ) сигнала в узлах  $V_2$  и  $V_4$  при изменении  $w_2$  (мкм)

$w_2$	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
$U_0$	427	426	425	423	422	421	421	420	419	419
$U_1$	93	87	81	76	71	67	63	60	57	54
$U_2$	191	183	171	161	151	142	134	127	120	114
$U_3$	0	5	11	19	23	27	30	33	35	36
$U_4$	177	180	175	170	163	157	151	145	140	135

Совпадение амплитуд на выходе витка при изменении  $w_1$  и  $w_2$  связано с тем, что изменение ширины проводников выполнено зеркально относительно центра поперечного сечения витка. Из-за этого коэффициенты передачи и отражения на стыках между окончаниями витка и между полувитками определяются зеркальными наборами характеристических импедансов. Из таблицы 3 видно, что значение  $w_2$ , при котором составляющие 2 и 4 имеют равные амплитуды, также находится в диапазоне между  $w_2 = 400$  и  $600$  мкм. Амплитуду выходного сигнала, как и ранее, определяет амплитуда составляющей 4 ( $U_4 = 135$  мВ при  $w_2 = 2000$  мкм).

Таким образом, в работе оценено влияние асимметрии поперечного сечения витка меандровой линии на искажение составляющих разложения затухающей синусоиды на выходе витка. В результате выявлен одинаковый характер искажений при

увеличении ширины сначала первого полувитка (при фиксированных остальных параметрах), а затем второго. Это объясняется зеркальными наборами характеристических импедансов мод, которые определяют коэффициенты передачи и отражения на стыках витка. Примечательным результатом работы является выявленный рост амплитуды дополнительного импульса, возникающего из-за асимметрии поперечного сечения витка. В дальнейшем целесообразна оценка при одновременном изменении ширины полувитков, которую не удалось выполнить в рамках данной работы из-за ограниченного объема публикации.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке  
гранта Президента РФ МК-396.2022.4.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 50628-2000. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость машин электронных вычислительных персональных к электромагнитным помехам. Требования и методы испытаний. М.: Стандартинформ, 2020. 10 с.
2. MIL-STD-461F. Department of Defence Interface Standard, Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment. 10 December 2007.
3. Кечиев Л. Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры. М.: Группа ИДТ, 2007. 616 с.
4. Гизатуллин З. М. Исследование помехоустойчивости вычислительной техники при электромагнитных воздействиях по сети электропитания // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61, № 5. С. 546–550.
5. Possibility of protection against UWB pulses based on a turn of a meander microstrip line / R. S. Surovtsev [et al.] // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2017. Vol. 59, No 6. P. 1864–1871.
6. Kim G. Y., Nosov A. V., Surovtsev R. S. Conditions for ultrashort pulse decomposition in multi-cascade protective devices based on meander lines with an asymmetric cross-section // Proc. of 2022 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT), Yekaterinburg, September 19–21, 2022. 2022. P. 1–6.

R.S. Surovtsev, P.V. Mikola

**Evaluation of the influence of asymmetry of a meander line turn cross-section on the distortion of a damped sinusoidal excitation**

Estimates are presented for the influence of the asymmetry of a meander line turn cross-section, which was achieved by different widths of the half-turns, on the distortion of the decomposition components of the damped sinusoid at the turn output. The existence of a half-turn width value at which the amplitudes of the components characterizing the even and odd modes are equal is revealed. It is shown that the use of a cross-sectional asymmetry leads to the appearance of an additional component of the expansion and an increase in its amplitude as the effect of asymmetry increases.

surovtsevrs@gmail.com  
mikolapavell@gmail.com