

УДК 621.372.22

Р.С. Суровцев, Н.А. Царегородцев, К.П. Малыгин

Распространение затухающей синусоиды в витке меандровой линии с воздушным заполнением

Представлены первые результаты анализа распространения затухающего синусоидального сигнала с частотами 1 и 10 ГГц в витке меандровой линии с воздушным заполнением. Выявлено, что при оптимальном выборе параметров поперечного сечения и длины линии можно добиться ослабления амплитуды напряжения в конце линии за счет взаимной компенсации полуволн разных знаков наведенного и основного сигналов. Показано максимальное ослабление напряжения с частотой 1 ГГц в 2,3 раза, а с частотой 10 ГГц – в 1,9 раза.

Ключевые слова: электромагнитное воздействие, устройство защиты, меандровая линия.

Одним из этапов при проектировании радиоэлектронных средств (РЭС) является обеспечение требования по электромагнитной совместимости (ЭМС). Особое внимание при этом уделяется защите РЭС от электромагнитных воздействий (ЭМВ). Такие воздействия могут быть как результатом преднамеренных действий человека (преднамеренные ЭМВ), так и результатом естественных природных явлений (вторичные проявления грозового разряда, электростатический разряд и пр.) [1]. Одним из опасных ЭМВ являются сверхкороткие импульсы (СКИ) наносекундного и субнаносекундного диапазонов. Опасность СКИ заключается в широком спектре, из-за которого СКИ может проникать внутрь РЭС через щели в корпусах и экранах устройств, а наведенные сигналы от СКИ могут восприниматься логическими элементами в качестве полезных и приводить к их ложному срабатыванию. Из-за этого нарушается передача цифровой информации [2]. Типовыми формами воздействий, которые используются для тестирования устройств на устойчивость к ЭМВ, являются одиночный импульс [3], затухающая синусоида [4] и пачки непрерывных волн, как правило, синусоидальных [5]. Не всегда традиционные средства защиты способны обеспечить должную защиту от таких воздействий из-за недостатка быстродействия или мощности [6]. Поэтому поиск альтернативных подходов к защите РЭС актуален.

Новым подходом к защите РЭС является разложение СКИ в простых печатных структурах в форме витка меандра на последовательность импульсов меньшей амплитуды [8]. Недостатком указанных исследований является то, что они выполнены только для идеализированного одиночного импульса. Между тем анализ возможности защиты от других видов воздействия видится необходимым. Для этого анализа сначала целесообразно выполнить исследование распространения затухающей синусоиды в витке МЛ с воздушным заполнением. Из-за однородности диэлектрического заполнения такой структуры моды сигнала будут иметь одинаковые скорости распространения, и анализ существенно упрощается. Поэтому цель данной работы – выполнить такой анализ.

Исходные данные для моделирования

На рис. 1 показан вид поперечного сечения МЛ со следующими параметрами: $w = 100$ мкм, $t = 105$ мкм,

$s = 100$ мкм, $h = 300$ мкм [9]. Схема соединения исследуемой линии представлена на рис. 2. Спротивления $R1$ и $R2$ при моделировании приняты по 50 Ом, амплитуда ЭДС $E_T = 1$ В. В качестве воздействующего сигнала принята затухающая синусоида частотой $f_0 = 1$ ГГц и коэффициентом затухания $\beta = 1/\tau_c = 10^9$, где $\tau_c = 1$ нс – время, за которое амплитуда синусоиды (U_0) уменьшается в e раз ($e = 2,72$). Пример формы такого сигнала показан на рис. 3.

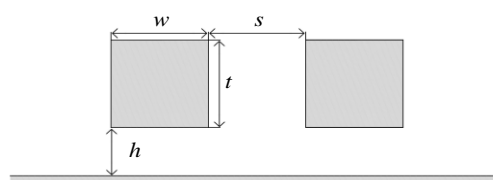
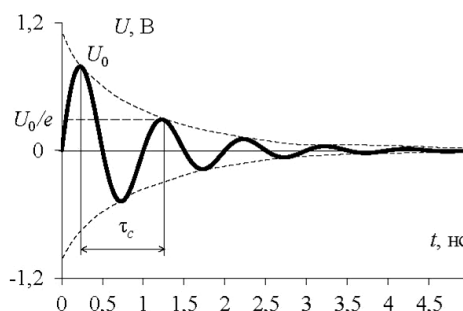


Рис. 1. Поперечное сечение МЛ



Рис. 2. Схема соединения МЛ в воздухе

Рис. 3. Затухающая синусоида при $f_0 = 1$ ГГц и $\beta = 10^9$

Результаты моделирования при частоте воздействия $f_0 = 1$ ГГц

Оценено искажение затухания синусоиды с $f_0 = 1$ ГГц в конце линии с фиксированным $s = 100$ мкм при изменении длины линии в диапазонах: 1, 5, ..., 25, 30, 40, ..., 90 мм. Для примера на рис. 4 показаны результаты формы напряжения в начале и конце витка при $l = 20, 50$ и 80 мм.

Из рис. 4 видно, что увеличение длины линии приводит к последовательному разложению первой положительной полуволны на две составляющие,

первая из которых является наведенной и приходит к концу линии без задержки, а вторая – основным сигналом, пришедшим к концу линии с задержкой в витке МЛ. Также наблюдается частичное попадание полуволн наведенной и основной синусоиды в противофазу, из-за чего происходит частичная компенсация амплитуды сигнала в конце линии. Выявлено, что минимальная амплитуда сигнала на выходе наблюдается при $l = 80$ мм и составляет 255 мВ при максимальной амплитуде сигнала в начале линии 544 мВ, т.е. ослабление составило до 2,1 раза.

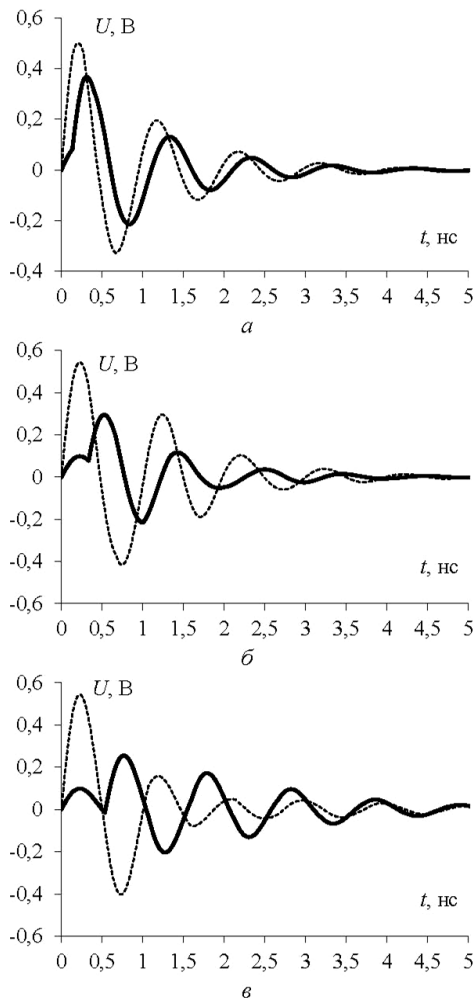


Рис. 4. Формы напряжения в начале (---) и конце (—) МЛ при $f_0 = 1$ ГГц для $l = 20$ (а), 50 (б) и 80 (в) мм

Выполнен анализ влияния расстояния между проводниками на форму напряжения в конце линии. Моделирование выполнено при $l = 90$ мм и изменении s от 100, 80, ..., 20 мкм. Для примера на рис. 5 показаны результаты для $s = 100, 60$ и 20 мкм.

Из рис. 5 видно, что уменьшение s приводит к последовательному увеличению амплитуды первой и второй положительных полуволн сигнала в конце линии. Это происходит в результате двух явлений. Первое является следствием усиления связи между проводниками, за счет чего увеличивается амплитуда положительной полуволны наведенного сигнала и уменьшается амплитуда положительной полуволны

основного сигнала. Второе заключается в компенсации положительной полуволны основного сигнала отрицательной полуволной наведенного, что в совокупности с первым явлением приводит к более существенному ослаблению амплитуды сигнала на выходе. Из рис. 5, в видно, что $s = 20$ мкм является оптимальным, поскольку амплитуды трех положительных полуволн практически совпадают (ослабление сигнала до 2,3 раза).

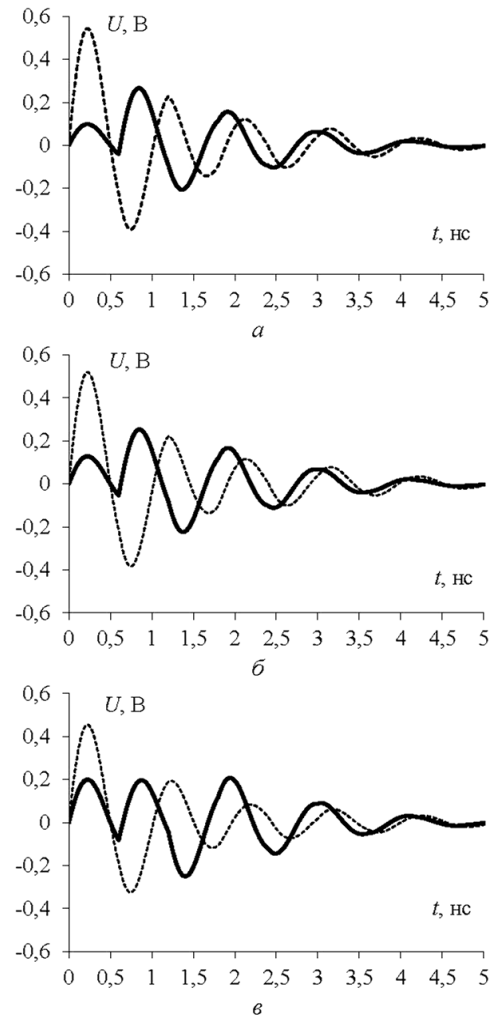


Рис. 5. Формы напряжения в начале (---) и конце (—) исследуемой линии при $f_0 = 1$ ГГц для $s = 100$ (а), 60 (б) и 20 (в) мкм

Результаты моделирования при $f_0 = 10$ ГГц

Получены аналогичные результаты при $f_0 = 10$ ГГц. Результаты при $s = 100$ мкм для $l = 20, 50$ и 90 мм приведены на рис. 6, из которых видно, что при увеличении l происходит последовательное разложение исходного и наведенного сигналов. Минимальная амплитуда сигнала в конце линии составила 347 мВ, что при амплитуде сигнала в начале линии 672 мВ дает ослабление сигнала в 1,93 раза.

Оценено влияние s на форму напряжения в конце линии. Моделирование, как и прежде, выполнено при $l = 90$ мм и изменении $s = 100, 80, \dots, 20$ мм. Полученные результаты для $s = 100, 60$ и 20 мкм приведены на рис. 7, из которых видно, что усиление связи

между проводниками ведет к увеличению амплитуды наведенного сигнала и уменьшению амплитуды основного сигнала.

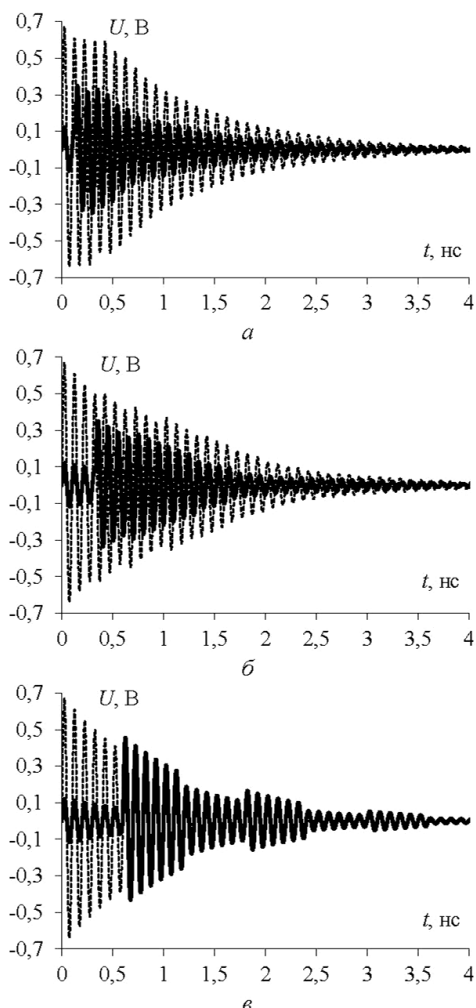


Рис. 6. Формы сигнала в начале (---) и конце (—) МЛ при $f_0 = 10$ ГГц для $l = 20$ (а), 50 (б) и 90 (в) мм

Однако из-за неоптимального выбора длины линии (задержка составила 600 пс), в отличие от случая с $f_0 = 1$ ГГц, происходит наложение положительных составляющих наведенного основного сигналов, что приводит к последовательному росту общей амплитуды сигнала в конце линии. Также уменьшение s приводит к более явному периодическому характеру изменения формы сигнала, возникающего из-за влияния отраженных сигналов. Минимальная амплитуда сигнала на выходе витка получена при $l = 90$ мм и составила 453 мВ, что при амплитуде сигнала в начале линии 673 мВ обеспечивает ослабление в 1,48 раза.

В результате, сравнивая полученные ослабления при изменении f_0 (2,3 раза для $f_0 = 1$ ГГц и 1,48 раза для $f_0 = 10$ ГГц), можно сделать вывод о необходимости более обстоятельного моделирования для выявления оптимальных комбинаций параметров поперечного сечения и длины линии для выявления пределов ослабления амплитуды сигнала. В первую очередь, целесообразен более детальный анализ влияния s при других значениях l . Примечательно, что выбор l обязательно должен быть оптимальным. Поскольку

увеличение связи оказывает существенное влияние на погонную задержку линии, то ее изменение может привести как к уменьшению (за счет одновременного прихода и наложения положительных и отрицательных составляющих), так и увеличению (из-за одновременного прихода и наложения составляющих одинаковой полярности) амплитуды выходного сигнала.

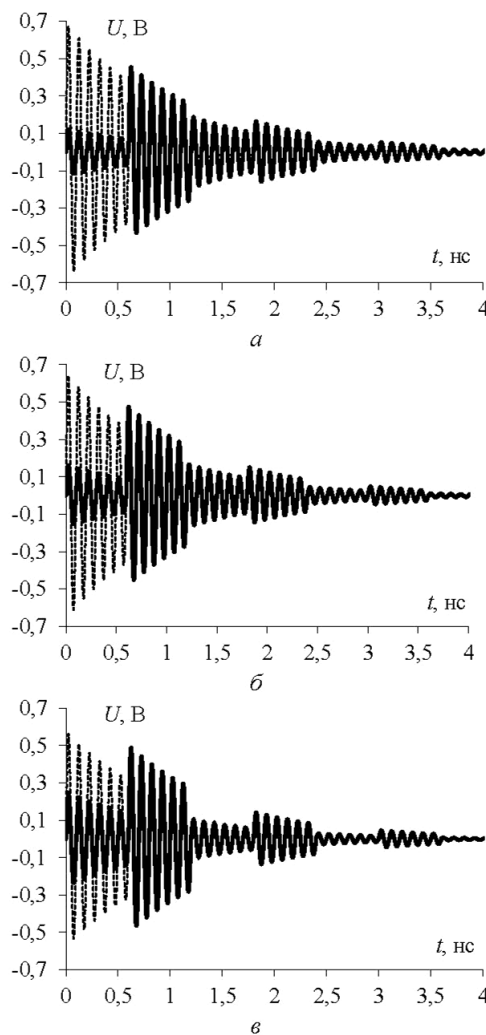


Рис. 7. Формы сигнала в начале (---) и конце (—) МЛ при $f_0 = 10$ ГГц для $s = 100$ (а), 60 (б) и 20 (в) мкм

Заключение

Представлены первые результаты анализа распространения затухающего синусоидального воздействия в витке меандровой линии с воздушным заполнением. Оценено влияние длины витка и расстояния между проводниками линии на изменение амплитуды выходного сигнала для двух частот синусоиды 1 и 10 ГГц. Выявлено, что при оптимальном выборе параметров поперечного сечения и длины линии можно добиться ослабления амплитуды сигнала в конце линии за счет взаимной компенсации полуволн разных знаков наведенного и основного сигналов. Показано, что максимальное ослабление сигнала с частотой 1 ГГц составляет 2,3 раза, а с частотой 10 ГГц – 1,9 раза. Уменьшение ослабления при увеличении частоты обусловлено выбором длины линии, которая обеспечивает синфазный приход положительных по-

луволи наведенного и основного сигналов. Выбор длины линии не обязательно должен быть оптимальным, поскольку увеличение связи оказывает существенное влияние на погонную задержку линии. Поэтому изменение длины может привести как к уменьшению, так и увеличению амплитуды выходного сигнала.

Исследование поддержано Министерством науки и высшего образования (проект FEWM-2020-0041).

Литература

1. Носов А.В. Совершенствование защиты радиоэлектронной аппаратуры от сверхкоротких импульсов за счет меандровых линий задержки: дис. ... канд. тех. наук: 05.12.04. – Томск, 2018. – 188 с.
2. Пирогов Ю.А. Повреждения интегральных микросхем в полях радиоизлучения / Ю.А. Пирогов, А.В. Солодов // Журнал радиоэлектроники. – 2013. – № 6. – С. 1–3.
3. JOLT: a highly directive, very intensive, impulse-like radiator / C. Baum, W. Baker, W. Prather, J. Lehr, J.O. Loughlin, D. Giri, et al. // Proceedings of the IEEE. – 2004. – Vol. 92. – P. 1096–1109.
4. Interaction between geometric parameters and output waveforms in high-power quarterwave oscillators / M. Armanious, J. Tyo, M. Skipper, M. Abdalla, W. Prather, J. Lawrence // IEEE, Transactions on plasma science. – 2010. – Vol. 38. – P. 1124–1131.
5. Backstrom M. Susceptibility of electronic systems to high-power microwaves: summary of test experience / M. Backstrom, K. Lovstrand // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2004. – Vol. 46. – P. 396–403.
6. Гизатуллин З.М. Исследование помехоустойчивости вычислительной техники при электромагнитных воздействиях по сети электропитания / З.М. Гизатуллин, Р.М. Гизатуллин // Радиотехника и электроника. – 2016. – Т. 61, № 5. – С. 546–550.
7. Surovtsev R.S. Possibility of protection against uwb pulses based on a turn of a meander microstrip line / R.S. Surovtsev, A.V. Nosov, A.M. Zabolotsky // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2017. – P. 1864–1871.
8. Суровцев Р.С. Вычислительные алгоритмы, методики и рекомендации для проектирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата с учетом электромагнитной совместимости: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.04. – Томск, 2015. – 248 с.
9. Surovtsev R.S. Pulse decomposition in a turn of meander line as a new concept of protection against UWB pulses / R.S. Surovtsev, T.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky // Proceedings of siberian conference on control and communications (SIBCON). – Omsk, Russia, May 2015. – 5 p.

Суровцев Роман Сергеевич

Канд. техн. наук, доцент каф. ТУ ТУСУРа
Эл. почта: surovtservs@gmail.com

Царегородцев Никита Андреевич

Магистрант каф. ТУ ТУСУРа
Эл. почта: nt89539280529nt@gmail.com

Малыгин Константин Петрович

Аспирант каф. ТУ ТУСУРа
Эл. почта: malyginkp@gmail.com