

2. Fenell J.F. Spacecraft charging: observations and relationship to satellite anomalies // Spacecraft charging technology, proceedings of the seventh international conference held. – 2001. – P. 279–285.

3. Ternov S. Influence of the cross-section form of the power bus bar on its parameters / S. Ternov, A.V. Demakov, M.E. Komnatnov // Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT). – Moscow, Russia, 14–16 March 2018. – P. 1–4.

4. Caponet M.C. Low stray inductance bus bar design and construction for good EMC performance in power electronic circuits / M.C. Caponet, F. Profumo, R.W. De Doncker // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2002. – Vol. 17, Iss. 2. – P. 916–921.

5. Ehrich M. Electrical properties and magnetic fields of a coaxial bus bar / M. Ehrich, L.O. Fichte, M. Luer // Proc. Asia-Pacific Conf. on Environmental Electromagnetics. – 2000. – P. 11–16.

6. Куксенко С.П. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT / С.П. Куксенко, А.М. Заболоцкий, А.О. Мелкозеров // Доклады ТУСУР. – 2015. – Т. 36, № 4. – С. 45–50.

7. ГОСТ Р 51317.4.2–2010 (МЭК 61000-4-2:2008). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электростатическим разрядам. Требования и методы испытаний, 2010. – 26 с.

УДК 621.396.6

**МОДАЛЬНЫЙ ФИЛЬТР НА ОСНОВЕ
МИКРОПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ С ДВУМЯ БОКОВЫМИ
ЗАЗЕМЛЕННЫМИ ПРОВОДНИКАМИ НА КОНЦАХ ПОД
ГРАНИЦЕЙ ВОЗДУХ–ПОДЛОЖКА**

И.Е. Сагиева, к.т.н., доцент каф. ТУ, с.н.с. НИЛ «ФИЭМС»;

И. Хелифати, студент каф. ЭМИС;

А.В. Путилин, магистрант каф. ТУ

г. Томск, ТУСУР, indira_sagieva@mail.ru

Впервые представлено исследование микрополосковой линии с двумя боковыми заземленными проводниками на концах под границей воздух–подложка в качестве модального фильтра. Выполнено моделирование в системе квазистатического анализа TALGAT. Выявлено, что исследуемая линия разложила воздействующий сверхкороткий импульс на два импульса, при этом их амплитуда уменьшилась в 2 раза.

Ключевые слова: радиоэлектронное устройство, микрополосковая линия, модальный фильтр.

На сегодняшний день многие радиоэлектронные устройства (РЭУ) (около 90%) используют микрополосковую линию (МПЛ) как основную линию, реализующуюся на печатных платах [1]. В этой свя-

зи она постоянно модифицируется проектировщиками РЭУ [2]. Однако на её работоспособность могут повлиять различные факторы, например, кондуктивные эмиссии в виде сверхкоротких импульсов (СКИ). Поэтому дополнительно создаются различные методы и устройства защиты от таких помех.

Одним из таких устройств является модальный фильтр (МФ), позволяющий разложить воздействующий СКИ на несколько импульсов с малыми амплитудами. Между тем обычная МПЛ с двумя боковыми заземленными проводниками (б.з.п.) может обладать свойствами МФ [3]. Однако возможности такой линии при расположении б.з.п. на концах под границей воздух–подложка в качестве МФ ранее не выявлено [4]. В этой связи для возможности создания новых конструкций МФ на основе МПЛ важно выполнить такое исследование.

Цель работы – исследовать МПЛ с двумя б.з.п. на концах под границей воздух–подложка в качестве МФ.

В системе TALGAT [5] выполнено моделирование МПЛ с двумя б.з.п. на концах под границей воздух–подложка. На рис. 1, а представлено её поперечное сечение с геометрическими параметрами: $h = 0,5$ мм; $d = 0,1$ мкм; $w = 1,3$ мм; $w = 0,34$ мм; $t = 35$ мкм; $s = 0,84$ мм; $\epsilon_r = 4,5$. Эквивалентная схема моделирования представлена на рис. 1, б: $l = 1$ м, $R_1 = R_2 = 50$ Ом. Источник воздействующего СКИ с амплитудой ЭДС $E = 2$ В, с общей длительностью 120 пс ($t_d = t_r = t_f = 40$ пс) представлен на рис. 1, в. Моделирование выполнено без учета потерь.

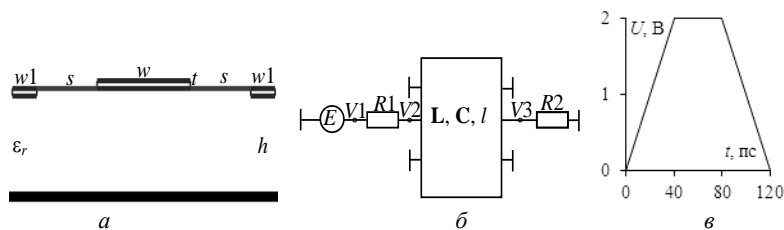


Рис. 1. Поперечное сечение (а), эквивалентная схема МФ (б) и форма ЭДС источника (в)

Геометрические параметры поперечного сечения в совокупности определяют матрицы \mathbf{L} и \mathbf{C} , а собственные значения произведения этих матриц из-под квадратного корня определяют погонные задержки мод как $\tau_1 = 5,86$ нс/м, $\tau_2 = 6,03$ нс/м, $\tau_3 = 6,38$ нс/м.

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} 450,89 & 36,61 & 9,77 \\ 36,61 & 247,70 & 36,61 \\ 9,77 & 36,61 & 450,89 \end{bmatrix} \text{нГн/м}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 82,02 & -5,31 & -0,35 \\ -5,31 & 154,77 & -5,83 \\ -0,35 & -5,83 & 82,02 \end{bmatrix} \text{пФ/м}.$$

На рис. 2 представлен вычисленный временной отклик с формой напряжения на узлах ($V1-V3$). Видно, что напряжение на входе $V2(t)$ с амплитудой равной 0,88 В, в силу симметрии двух б.з.п. (амплитуда импульса моды 2 равна 0) разложилось на два импульса на выходе $V3(t)$ с выравненными амплитудами, равными 0,49 В с интервалом между ними, равным 0,52 нс ($(l \cdot \tau_3) - (l \cdot \tau_1)$). Это означает возможность ослабления воздействующего СКИ и применения такой линии в качестве МФ.

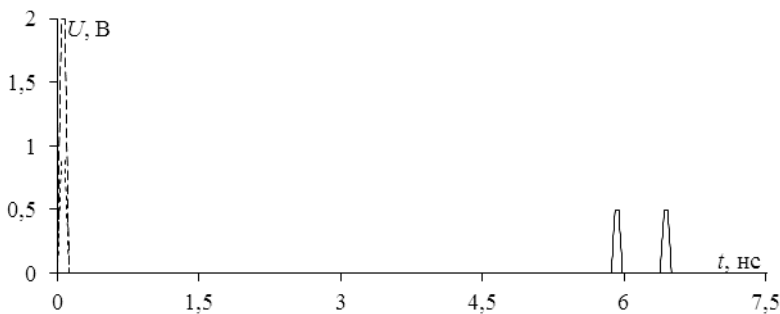


Рис. 2. Форма напряжения: ЭДС $V1$ (---), на входе $V2$ (- -), на выходе $V3$ (—)

Таким образом, выполнено моделирование МПЛ с двумя б.з.п. на концах под границей воздух–подложка в системе квазистатического моделирования TALGAT, показана возможность ослабления воздействующего СКИ и применения его как МФ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по проекту FEWM-2024-0005.

ЛИТЕРАТУРА

1. Verma A.K. Microstrip Line // Introduction to Modern Planar Transmission Lines. – June 2021. – P. 261–299.
2. Maloratsky L.G. Using modified microstrip lines to improve circuit performance // High Frequency Electronics. – 2011. – Vol. 10, No. 5. – P. 38–52.
3. Sagiyeva I.Y. Modal filter based on a microstrip line with two side conductors grounded at both ends / I.Y. Sagiyeva, Y.S. Zhechev, Z.M. Kenzhegulova, R.S. Surovtsev, T.R. Gazizov // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2023. – Vol. 65, Iss. 5. – P. 1371–1378.
4. Sagiyeva I.Ye. Modeling of microstrip line characteristics with side grounded conductors near air-substrate boundary / I.Ye. Sagiyeva, T.R. Gazizov // Journal of physics: conference series [Electronic resources]. – 2018. – Vol. 1118, No. 2. – P. 1–6.
5. Разработка программного обеспечения для моделирования радиоэлектронных средств с учетом электромагнитной совместимости в ТУСУР / С.П. Куксенко, Т.Р. Газизов, А.А. Квасников, А.В. Демаков, А.А. Иванов, Д.В. Клюкин, А. Алхадж Хасан, А.Е. Максимов, А.В. Осинцев // Наноиндустрия. – 2023. – Т. 16, № S9-1 (119). – С. 170–178.