

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ВРЕМЕННОЙ ОТКЛИК МОДАЛЬНОГО ФИЛЬТРА НА ОСНОВЕ МИКРОПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ С ДВУМЯ БОКОВЫМИ ПРОВОДНИКАМИ, ЗАЗЕМЛЕННЫМИ НА ОБОИХ КОНЦАХ*

И.Е. Сагиева, Б.Е. Нурхан, Т.Р. Газизов

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия

Впервые оценено влияние температуры на временной отклик нового модального фильтра (МФ) на основе микрополосковой линии с двумя боковыми проводниками, заземленными на обоих концах. Оценка выполнена по результатам квазистатического моделирования с учетом температурной модели и измерения изготовленного макета МФ с помощью камеры тепла-холода. Анализировались временные отклики на сверхкороткий импульс на выходе МФ. Представлены результаты моделирования без учета потерь, с учетом потерь и измерений при температурах -50 , 25 и 150 °С. Оценены отклонения задержки и амплитуды напряжения первого из импульсов, на которые разлагается воздействующий сверхкороткий импульс. Показана согласованность результатов моделирования и измерения. Выявлено малое влияние температуры на задержку (около 1%) и значительное влияние на амплитуду (до 36%) первого импульса.

Ключевые слова: *временной отклик, микрополосковая линия, модальный фильтр, печатная плата, сверхкороткий импульс, температура.*

Жесткие условия эксплуатации (космос, Арктика, тропики и др.) радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) предъявляют к ней требование безотказной работы в широком диапазоне температур (T). Исследование влияния T на различные характеристики линий передачи, а также использование полученной информации на этапе проектирования позволяют оценить изменения этих характеристик и их критичность для функционирования РЭА [1–4]. В РЭА часто используются микрополосковые линии (МПЛ) и их модификации [5–7]. В этой связи ранее авторами исследовано влияние температуры на характеристики МПЛ с заземленными проводниками сверху [8]. Между тем такие МПЛ могут обладать свойствами модального фильтра (МФ) для защиты от различных кондуктивных воздействий, например сверхкороткого импульса (СКИ), за счет его модального разложения на последовательность импульсов меньшей амплитуды [9–12]. В общем случае это происходит за счет различия задержек распространения импульсов мод поперечных волн в отрезке многопроводной линии передачи. Такое различие возможно при неоднородном (в поперечном сечении) диэлектрическом заполнении линии. В результате модального разложения, в частности за счет уменьшения результирующей амплитуды напряжения на выходе МФ, опасность воздействия СКИ на компоненты РЭА, подключенные к выходу МФ, может значительно уменьшиться. Однако изменение температуры может повлиять на эффективность проявления свойств МФ у МПЛ, а значит, ее защитных свойств. В целях получения новых оригинальных результатов в данном контексте применения МПЛ очень важно проанализировать искажения формы временного отклика таких МФ при изменении T . Цель данной работы – оценить влияние температуры на временной отклик модального фильтра на основе МПЛ с двумя боковыми проводниками, заземленными на обоих концах.

Использовались два подхода: измерения макета МФ и его квазистатическое моделирование в системе TALGAT [13]. Поперечное сечение изготовленного макета МФ представлено на рис. 1, а. Его параметры: $t = 105$ мкм, $w = 0.45$ мм, $w_1 = 0.2$ мм, $h = 0.5$ мм, $d = 1$ мм, $s = 0.45$ мм, $\epsilon_r = 4.7$, $\tan \delta = 0.03$, $l = 328$ мм. Материал макета СТФ-2-105-0.5. Общие размеры макета 100×100 мм.

На рис. 1, б и в представлены фото верхнего и нижнего слоев макета. Для уменьшения длины макета он согнут в меандр. Связь между полувитками меандра очень слабая, поскольку расстояние между ними 10 мм. МФ соединялся с измерительным оборудованием SMA-соединителями.

Моделирование выполнено при $T = -50$, 25 и 150 °С с помощью температурной модели, представленной в работе [14]. Температурный коэффициент линейного расширения меди принят $17 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹, а диэлектрической основы макета по осям Z и Y – $70 \cdot 10^{-6}$ и $17 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹ соответственно [15]. Для материала СТФ-2-105-0.5 с $\epsilon_r = 4.7$ температурный коэффициент принят $8.33 \cdot 10^{-4}$ К⁻¹.

* Работа выполнена в рамках госзадания Министерства образования и науки РФ, проект FEWM-2022-0001.

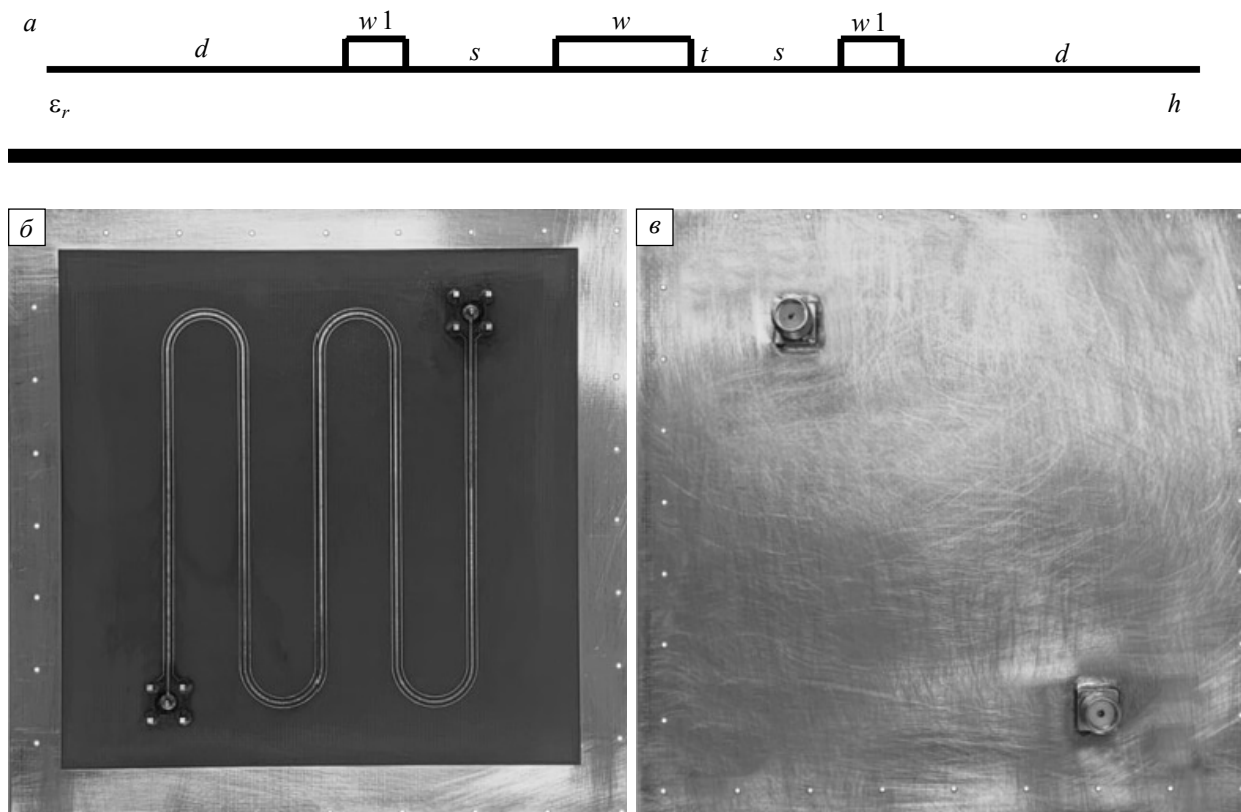


Рис. 1. Поперечное сечение (а), фото верхнего (б) и нижнего (в) слоев макета МФ

Моделировалась принципиальная электрическая схема, представленная на рис. 2, а, где сигнальный проводник соединен с источником СКИ, представленным на схеме идеальным источником ЭДС E и внутренним сопротивлением $R1$. На другом конце проводник соединен с $R2$. Параметры схемы: длина линии $l = 328$ мм, внутренние сопротивления источника СКИ и нагрузки $R1 = R2 = 50$ Ом. В качестве СКИ при моделировании и измерении принят трапециевидный импульс с амплитудой ЭДС 1 В и временами нарастания, плоской вершины и спада по 40 пс (рис. 2, б).

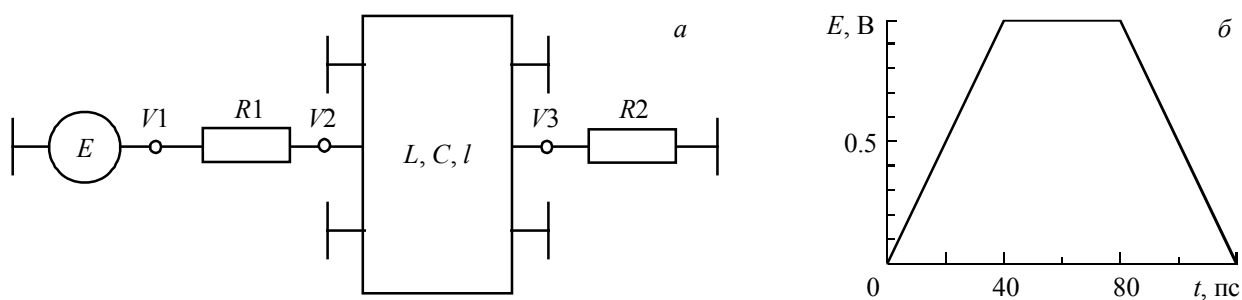


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема (а) и форма воздействующей ЭДС (б)

Измерения выполнены однократно при изменении температуры от -50 до 150 °С с помощью векторного анализатора цепей (ВАЦ) R&S ZVA 40 (погрешности измерения модуля коэффициентов передачи и отражения (S -параметры) составляют 0.1–1.0 и 0.4–3 дБ соответственно в зависимости от частоты и значения) при размещении макета в климатической (испытательной) камере тепла-холода ESPEC SU-262 (колебания температуры: ± 0.3 °С ($-60 \dots +100$ °С); ± 0.5 °С ($101.1 \dots 150$ °С)). ВАЦ соединялся с SMA-соединителями измерительными кабелями R&S ZV-Z195 и Semflex 60637. Затем измеренные частотные зависимости S -параметров были преобразованы во временные отклики в Advanced Design System. Таким образом, погрешности измерения S -параметров определяют точность моделирования временных откликов.

На рис. 3 представлены результаты моделирования и измерения при $T = -50, 25, 150$ °C. Видно, что СКИ раскладывается на 2 импульса. С увеличением температуры задержки импульсов увеличиваются как при моделировании, так и при измерении, а амплитуды импульсов уменьшаются. Из результатов моделирования без учета изменения потерь (рис. 3, а) видно, что амплитуды импульсов значительно отличаются от измеренных. Так как известно, что с увеличением T возрастают потери, то дополнительно проведено тестовое моделирование с учетом изменения потерь в диэлектрике в 2 раза при $T = -50, 150$ °C (рис. 3, б). Видно, что амплитуды импульсов уменьшились так же, как и при измерении, поскольку потери влияют на дисперсию.

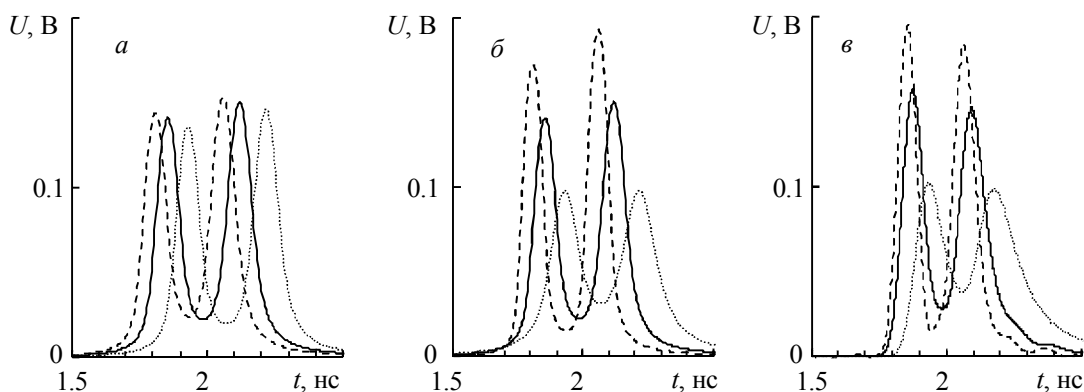


Рис. 3. Формы напряжения на выходе макета МФ, полученные при моделировании без учета (а) и с учетом (б) изменения потерь в диэлектрике и измерении (в) для $T = -50$ (---), 25 (—), 150 °C (· ·)

Выполнена количественная оценка отклонений задержки и амплитуды напряжения импульса 1 (таблица). Она показала хорошую согласованность результатов моделирования и измерения, а также малое влияние температуры на задержку (модуль отклонения около 1%) и значительное влияние на амплитуду (модуль отклонения 21–36%).

Относительные отклонения (от $T = 25$ °C) задержек и амплитуд напряжения импульса 1

Результат	$T, ^\circ\text{C}$	$\Delta t, \%$	$\Delta U, \%$
Моделирование с учетом изменения потерь	-50	-0.57	21.42
	150	1.15	-35.71
Измерение	-50	-1.12	26.67
	150	1.12	-33.33

Для более ясного сравнения результатов моделирования и измерения они представлены отдельно для $T = -50, 25, 150$ °C на рис. 4. Видна хорошая согласованность результатов для учета изменения потерь и измерений по задержкам импульса 1 ($\pm 3.55\%$ при $T = -50$ °C, $\pm 1.72\%$ при $T = 25$ °C и $\pm 2.84\%$ при $T = 150$ °C). Моделирование с учетом изменения потерь в 2 раза для $T = -50$ и 150 °C показало, что амплитуды импульсов совпали с измеренными.

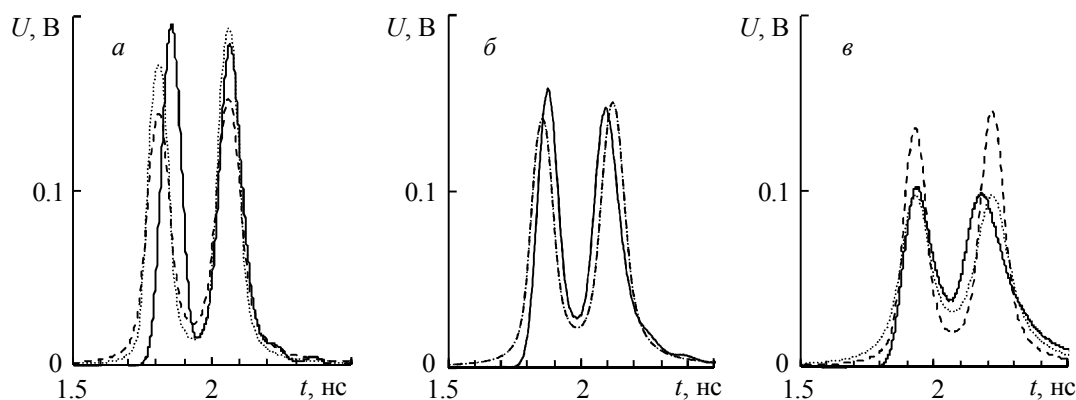


Рис. 4. Формы напряжения на выходе макета МФ, полученные при моделировании без учета (---) и с учетом (· ·) изменения потерь и измерении (—) для $T = -50$ (а), 25 (б), 150 °C (в)

Таким образом, в работе представлена оценка влияния температуры на временной отклик МФ на основе МПЛ с двумя боковыми проводниками, заземленными на концах. Оценка выполнена по результатам квазистатического моделирования с учетом температурной модели в системе TALGAT и измерения изготовленного макета МФ с помощью камеры тепла-холода ESPEC SU-262. Представлены результаты моделирования без учета потерь, с учетом потерь и измерения при температурах -50 , 25 и 150 °C. Выполнена количественная оценка отклонений задержки и амплитуды напряжения, показавшая согласованность результатов моделирования и измерения. Результаты работы могут быть полезны для проектирования помехозащитных линий передачи на печатных платах, используемых при разных климатических условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhang Y., Bagnoli P.E. // *Microelectron. J.* – 2014. – No. 45(8). – P. 1033–1052.
2. Li H.-M., Ra C.-H. // *J. Korean Phys. Soc.* – March 2009. – No. 3. – P. 1096–1099.
3. Yadav R.K., Kishor J., Lal R.Y. // *Int. J. Networks Commun.* – 2013. – No. 3(1). – P. 21–24.
4. Vikram S., Devendra S.K., Singh Y., Dhubkarya D.C. // *Proc. Int. Multiconference of Engineers and Computer Scientists. Hong Kong, March 17–19, 2010.* – 2010. – P. 1–4.
5. Maloratsky L.G. // *High Frequency Electron.* – 2011. – V. 10. – No. 5. – P. 38–52.
6. Maloratsky L.G. // *Microwaves & RF.* – 2000. – P. 79–88.
7. Gazizov T.R., Sagiyeva I.Y., Kuksenko S.P. // *Complexity.* – 2019. – V. 2019. – P. 1–11.
8. Нурхан Б.Е., Сагиева И.Е. // *Междунар. науч.-технич. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2021» «Электронные средства и системы управления».* Томск, Россия, 18–20 ноября 2020 г. – Томск, 2020. – Ч. 1. – С. 310–312.
9. Belousov A.O., Zabolotsky A.M., Gazizov T.T. // *18th Int. Conf. of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM. Erlagol, Altai, June 29–July 3, 2017.* – 2017. – P. 46–49.
10. Chernikova E.B. // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2021. – V. 1862. – No. 012020. – P. 1–5.
11. Belousov A.O., Chernikova E.B., Khazhibekov R.R., Zabolotsky A.M. // *J. Phys.: Conf. Ser. [Electronic resources].* – 2018. – V. 1015. – No. 3. – P. 1–5.
12. Samoylichenko M.A. // *21st Int. Conf. of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM. Erlagol, Altai, June 29 – July 3, 2020.* – 2020. – P. 159–164.
13. Kuksenko S.P. // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* – 2019. – P. 1–7.
14. Sagiyeva I.Y., Nosov A.V., Surovtsev R.S. // *21st Int. Conf. of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM. Erlagol, Altai, June 29– July 3, 2020.* – 2020. – P. 191–194.
15. Новотник М. // *Технологии в электронной промышленности.* – 2009. – № 8. – С. 51–55.

Поступила в редакцию 25.04.2022,
принята в печать 15.11.2022.

Сагиева Индира Ериковна, к.т.н., мл. науч. сотр. научно-исследовательской лаборатории «Фундаментальные исследования по электромагнитной совместимости» ТУСУРа, e-mail: indira_sagiyeva@mail.ru;
Нурхан Бахтияр Елжасулы, магистрант, инженер научно-исследовательской лаборатории «Фундаментальные исследования по электромагнитной совместимости» ТУСУРа, e-mail: nurkhan.bakhtiyar@mail.ru;
Газизов Тальгат Рашитович, д.т.н., ведущ. науч. сотр. научно-исследовательской лаборатории «Фундаментальные исследования по электромагнитной совместимости» ТУСУРа, e-mail: talgat@tu.tusur.ru.