УДК 621.391.825 DOI: 10.31114/2078-7707-2022-3-95-100

Оптимизация модального фильтра на двухсторонней печатной плате с лицевыми и боковыми связями

М.А. Самойличенко, Т.Р. Газизов

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, 1993 mary2011@mai.ru

Аннотация — В данной работе представлены результаты параметрической оптимизации эвристическим поиском модального фильтра на двухсторонней печатной плате с лицевыми и боковыми связями. Данное устройство позволяет защитить радиоэлектронное оборудование от импульса сверхширокополосной помехи. Оптимизация выполнялась по трем основным критериям: амплитудному, диапазонно-временному и интервально-временному. Для оптимизированных параметров представлены результаты ослабления при изменении граничных условий на концах пассивных проводников на короткое замыкание (КЗ) - холостой ход (ХХ) и ХХ-КЗ. Показано, что при изменении граничных условий ослабление оценивается амплитудой дополнительных импульсов, а не импульсов мод. Достигнуто ослабление в 4 раза по отношению к половине э.д.с. при нагрузках на концах пассивных проводников по 50 Ом и 10 раз при ХХ-КЗ. Разность максимальной и минимальной погонных задержек импульсов максимизирована до 2,45 нс/м. Достигнуто выравнивание разностей погонных задержек мод 3 и 2, 7 и 6 (0,77 нс/м), а также максимизация для мод 6 и 3 (0,91 нс/м).

Ключевые слова — модальный фильтр, сверхкороткий импульс, печатная плата, устройство защиты.

I. Введение

В настоящее время наблюдается активное развитие средств направленной передачи энергии, предназначенных для поражения радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) [1-4]. Особую опасность представляют источники мощного сверхширокополосного (СШП) электромагнитного излучения с субнаносекундной длительностью фронта импульса. СШП импульсы опасны из-за значительной ширины спектра рабочих частот и высокой амплитуды [5-8]. Для повышения защищенности РЭА от СШП помех применяются такие устройства защиты, как ограничители, фильтры и т.п. [9-13]. В качестве защитных устройств используются также полосковые и микрополосковые линии [14-16]. Такие фильтры подходят для защиты электронных цепей от очень быстрых переходных процессов опасной амплитуды и легко интегрируются в электронные схемы. Так, исследуются модальные фильтры (МФ) на основе полосковых, микрополосковых и копланарных линий, [17] где ослабление СШП помехи происходит за счет модальных искажений. Одним из простых является МФ на двухсторонней печатной плате (ДПП). Конфигурация такого МФ образуется за счет вырезов в опорной плоскости обычной копланарной линии. Так, экспериментально показано, что два таких выреза позволяют ослабить распространяющийся по линии СШП импульс [18]. Достичь большего ослабления можно за счет добавления двух пассивных проводников в исходную конфигурацию МФ на ДПП так, что образуется МФ с лицевыми и боковыми связями. В работе [19] показана возможность разложения СКИ в МФ на ДПП с лицевой и боковыми связями. Разность погонных задержек мод составила 0,131 нс/м, а ослабление – 2,3 раза по отношению к половине э.д.с. Однако возможно улучшить эти характеристики за счет оптимизации параметров поперечного сечения МФ. Цель данной работы – представить результаты оптимизацию МФ на ДПП с лицевыми и боковыми связями.

II. Исходные данные

Данная структура может быть получена путем добавления пассивных проводников в рассмотренный ранее МФ на ДПП [20], хотя впервые она была предложена для трехкратного модального резервирования [21]. Поперечное сечение МФ приведено на рис. 1а. Параметры: h – толщина диэлектрика, w1 – ширина активного и пассивных проводников, w2 – ширина опорных проводников, s1 – расстояние между активным и пассивным проводниками, s2 – расстояние между сигнальными и опорными проводниками, ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость, t – толщина фольги. В качестве диэлектрика выбран стеклотекстолит (ε_r = 4,5).

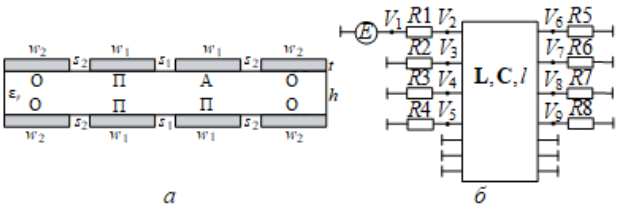

Рис. 1. Поперечное сечение (а) и схема (б) МФ. Проводники: А – активный, П – пассивный, О – опорный

Схема для моделирования представлена на рис. 1б. Активный проводник соединен с источником импульсных сигналов, представленным на схеме идеальным источником э.д.с. E и внутренним сопротивлением R1. На другом конце активный

проводник соединен с нагрузкой R5. Значения сопротивлений R1–R7 приняты по 50 Ом.Выполнено предварительное моделирование, подтверждающее разложение СКИ в таком МФ, при h=500 мкм, w1=1000 мкм, w2=500 мкм, s1=s2=300 мкм, t=70 мкм и длине (l)=1 м. Набор параметров объясняется тем, что на выходе МФ видно все моды, которые распространяются в линии. В качестве воздействия использовался источник трапециевидной э.д.с. с амплитудой 2 В, временем нарастания 150 пс, плоской вершины – 200 пс и спада – 150 пс.

Вычисление матриц (L и C) погонных параметров и форм сигнала выполнено с помощью квазистатического подхода в системе TALGAT [22]. Потери в проводниках и диэлектриках не учитывались.

На рис. 2 показаны результаты моделирования форм напряжения на входе и выходе МФ. Воздействующий СКИ раскладывается на 7 импульсов (в соответствии с числом мод (N=7), по числу проводников, не считая одного опорного). Однако импульсы 2 и 3, а также 4 и 5, накладываются друг на друга. Это объясняется малой разностью погонных задержек их мод (τ_3–τ_2=0,131 нс/м и τ_5–τ_4=0,029 нс/м), что приводит к увеличению амплитуды. Так, из-за наложения импульсов с погонными задержками τ_3 и τ_2 получается максимальная амплитуда импульсов на выходе МФ 0,425 В. Значения задержек и амплитуд приведены в табл. 1.

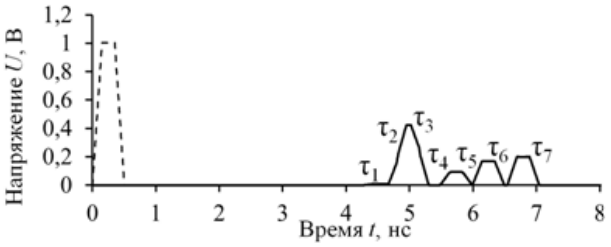

Рис. 2. Формы напряжения на входе (- -) и выходе (-) МФ при исходном наборе параметров

Таблица 1

Погонные задержки мод (τ_i, нс/м) и амплитуды (Ui, В) импульсов

τ_1	τ_2	τ_3	τ_4	τ_5	τ_6	τ_7	U_1	$U_{2,3}$	$U_{4,5}$	U_6	U_7
4,3	4,6	4,8	5,5	5,5	5,6	6,54	0,009	0,42	0,095	0,17	0,20

III. Результаты оптимизации

Оптимизация выполнялась в диапазоне параметров посредством эвристического поиска по трем критериям:

1. *Амплитудный критерий*. Минимизация амплитуд импульсов разложения исходного СКИ за счет их выравнивания. Данный критерий наиболее важен, поскольку именно амплитуда напряжения на выходе МФ определяет его основную характеристику: ослабление фильтра.

2. *Диапазонно-временной критерий.* Данный критерий связан с расширением временного диапазона импульсов разложения на выходе МФ. Он важен, поскольку позволяет увеличить максимальную длительность воздействующего СКИ, который будет полностью разлагаться.

3. *Интервально-временной критерий.* Этот критерий важен при N>2. Он применяется для выравнивания временных интервалов между импульсами на выходе МФ, что также увеличивает длительность воздействующего СКИ, который будет раскладываться на выходе МФ полностью.

Ранее выявлено, что с увеличением s2 разность погонных задержек мод растет, поэтому при моделировании принято s2=3 мм. При этом ширина опорных проводников на выходные характеристик влияет не значительно, поэтому принято w2=500 мкм. Также, при таких значениях s2 и w1 отсутствуют импульсы, которые появляются из-за опорных проводников (например, для табл. 1 и рис. 2 это импульсы 1, 4 и 5). Также не сильно влияет и t, поэтому принято t=35 мкм. Оптимизировались w1 (от 500 до 2100 мкм) и s1 (от 100 до 1000 мкм) при h=0,5; 1; 1,5; 2 мм.

Рис. 2 показал наложение импульсов при длительности импульса 500 пс. Поэтому для анализа влияния параметров она уменьшена до 150 пс (время нарастания, плоской вершины и спада по 50 пс).

На рис. 3–5 приведены полученные зависимости в диапазоне параметров при h=0,5 мм. Анализ τ_i показывает близкие значения между τ_1 и τ_2, а также между τ_4 и τ_5. С увеличением w_1 и s_1 разность задержек между импульсами 3 и 2, а также 7 и 6, становится меньше, а между импульсами 6 и 3 – больше. При s_1=0,1 мм и w_1=0,535 мм достигается выравнивание разностей погонных задержек мод для τ_3–τ_2 и τ_6–τ_3 (0,79 нс/м, рис. 6*а*), а при w_1=0,920 мм – близость разностей погонных задержек мод 3 и 2, 7 и 6, которые равны 0,778 и 0,750 нс/м соответственно (рис. 6*б*). Увеличение w_1 в большей степени влияет на амплитуды импульсов 6 и 7, и в меньшей – 2 и 3. Так, для 6 и 7 они уменьшаются, а 2 и 3 – увеличиваются. С увеличением s_1, уменьшается U_3 и увеличивается U_2, а U_6 и U_7 почти не изменяются. Из графиков видно, что с увеличением s_1 все больше значений w_1, при которых амплитуды U_6 и U_7 выровнены.

Минимум амплитуды (0,209 В) достигается при w1=1,7 мм и s1=1 мм. При этом ослабление по отношению к половине э.д.с. равно 4,8 раза. Однако, разность погонных задержек мод 3 и 2, 7 и 6 мала (0,342 и 0,196 нс/м соответственно), что уменьшает ослабление, если увеличить длительность воздействующего СКИ. Так, при его длительности 500 пс импульсы 6 и 7 накладываются друг на друга, так что Umax=0,404 В. Формы напряжения на входе и выходе при длительностях 150 и 500 пс приведены на рис. 7.

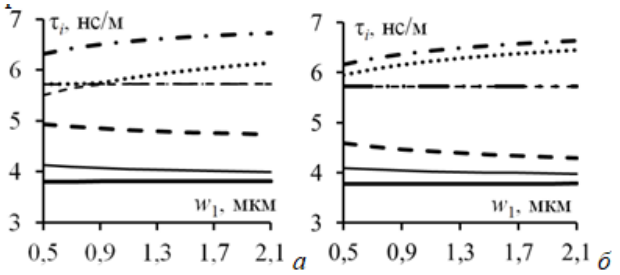

Рис. 3. Зависимости τ_1 (-), τ_2 (–), τ_3 (– –), τ_4 (- -), τ_5 (– ·· –), τ_6 (– –), τ_7 (··) от w_1 при s_1=0,1 мм (*а*) и s_1=1 мм (*б*) и *h*=0,5 мм

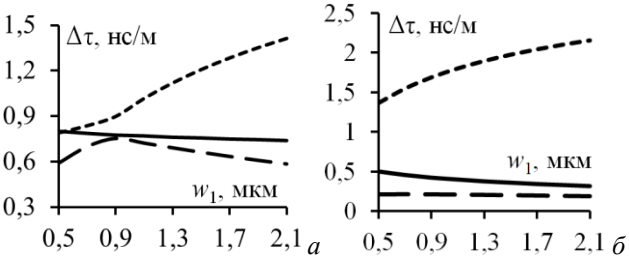

Рис. 4. Зависимости τ_3–τ_2 (–), τ_7–τ_6 (– –), τ_6–τ_3 (- -) при s_1=0,1 мм (*а*) и s_1=1 мм (*б*) и *h*=0,5 мм

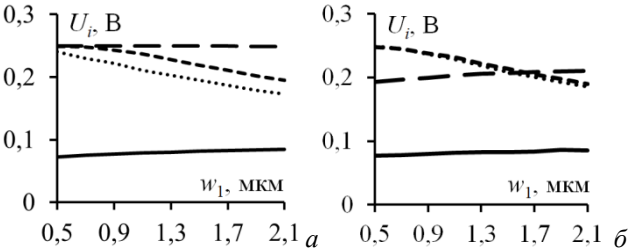

Рис. 5. Зависимости U_2 (–), U_3 (– –), U_6 (- -), U_7 (. .) при s_1=0,1 мм (*а*) и s_1=1 мм (*б*) и *h*=0,5 мм

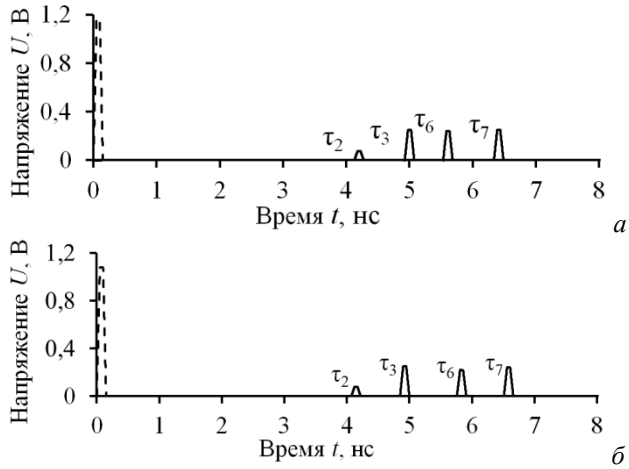

Рис. 6. Формы напряжения на входе (- -) и выходе (-) МФ при s_1=0,1 и w_1=0,535 (*а*) мм и w_1=0,920 мм (*б*)

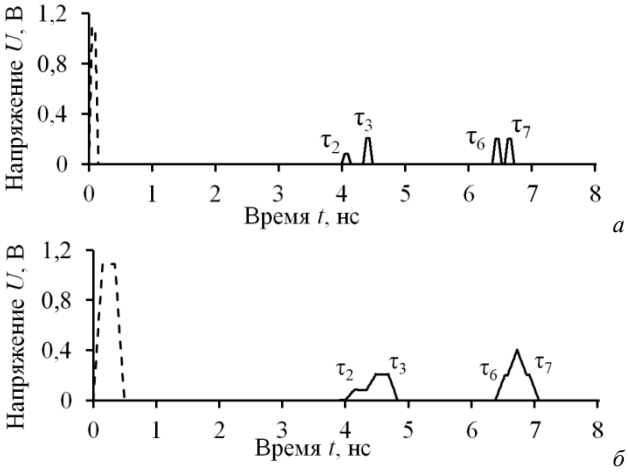

Рис. 7. Формы напряжения на входе (- -) и выходе (-) МФ при s_1=1 мм, w_1=0,17 мм и длительности воздействующего СКИ 150 (*а*) и 500 (*б*) пс

На рис. 8–10 приведены аналогичные зависимости в диапазоне параметров при *h*=2 мм. С увеличением *h* разность погонных задержек становится меньше для мод 3 и 2, 6 и 3, а больше для 7 и 6. Так, при *h*=0,5 мм (w_1=0,5 мм и s_1=0,5 мм) τ_3–τ_2=0,8 нс/м, τ_6–τ_3=0,79 нс/м и τ_7–τ_6=0,59 нс/м, а при *h*=2 мм эти значения равны 0,177, 0,177 и 0,7 нс/м соответственно. При малых значениях w_1, за счет уменьшения разности задержек и наложения импульсов 6 и 3 максимальная амплитуда импульсов увеличивается до 0,469 В (рис. 11). При *s*=0,1 мм и *w*=2,1 мм выравниваются разности погонных задержек мод 6 и 3, 3 и 2 (рис. 12*а*), а при s_1=1 мм и w_1=1,35 мм – 7 и 6, 6 и 3 (рис. 12*б*). С увеличением *h* амплитуда импульса 2 увеличивается до 0,118 В (при *s*=1 мм и w_1=2,1 мм). Также видно, что с увеличением *h* и s_1 все больше значений w_1, при которых амплитуды уже трех (а не двух, как было при *h*=0,5 мм) мод (U_3, U_6 и U_7) стремятся к выравниванию. Так, при s_1=1 мм и w_1=1,9 мм выровнены амплитуды импульсов 3, 6 и 7 (*U*=0,245 В) и максимизирована амплитуда импульса 2 (U_2=0,118 В), а разности погонных задержек мод составляют τ_3–τ_2=0,356 нс/м, τ_7–τ_6=0,545 нс/м и τ_6–τ_3=0,676 нс/м. Для этого случая формы напряжения на входе и выходе приведены на рис. 13.

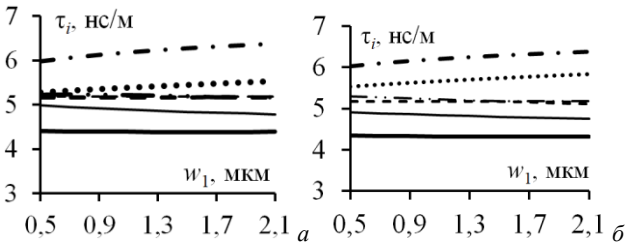

Рис. 8. Зависимости τ_1 (-), τ_2 (–), τ_3 (– –), τ_4 (- -), τ_5 (– ·· –), τ_6 (– –), τ_7 (··) от w_1 при s_1=0,1 мм (*а*) и s_1=1 мм (*б*) и *h*=2 мм

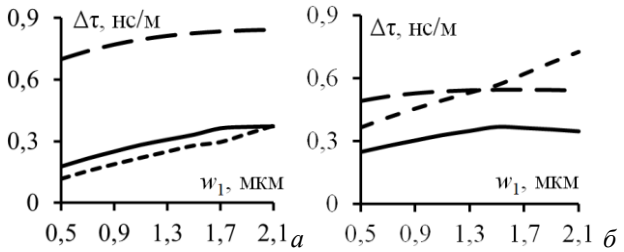

Рис. 9. Зависимости τ_3–τ_2 (–), τ_7–τ_6 (– –), τ_6–τ_3 (- -) при s_1=0,1 мм (*а*) и s_1=1 мм (*б*) и *h*=2 мм

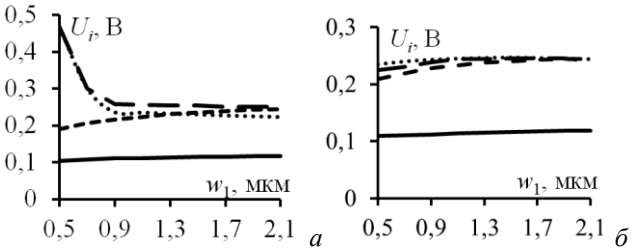

Рис. 10. Зависимости U_2 (–), U_3 (– –), U_6 (- -), U_7 (. .) при s_1=0,1 мм (*а*) и s_1=1 мм (*б*) и *h*=2 мм

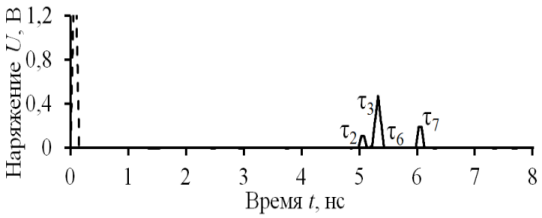

Рис. 11. Формы напряжения на входе (- -) и выходе (-) МФ при w_1=0,5 мм и s_1=0,5 мм

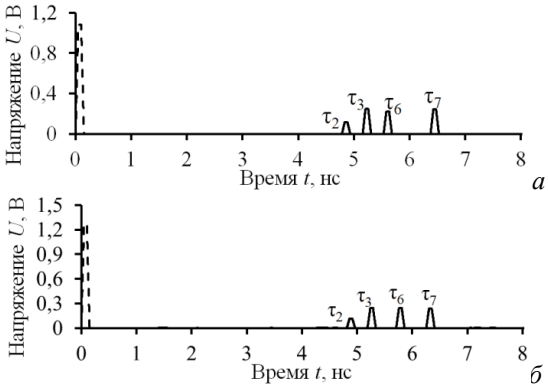

Рис. 12. Формы напряжения на входе (- -) и выходе (-) МФ при w_1=2,1 мм и s_1=0,1 мм (*а*) и w_1=1,35 мм и s_1=1 мм (*б*)

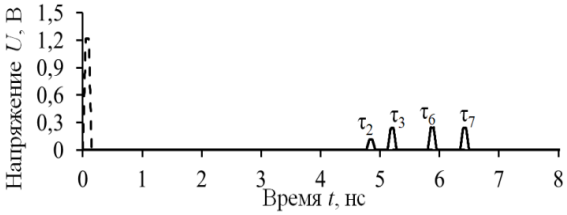

Рис. 13. Формы напряжения на входе (- -) и выходе (-) МФ при w_1=1,9 мм и s_1=1 мм

Так, при *h*=0,5 мм, s_1=0,09 мм, *w*=0,95 мм достигнут наилучший результат: U_2=0,078 В, U_3=0,249 В, U_6=0,216 В и U_7=0,239 В (ослабление составляет 4 раза по отношению к половине э.д.с.), а τ_3–τ_2=0,77 нс/м, τ_3–τ_2=0,77 нс/м и τ_6–τ_3=0,910 нс/м. Увеличении длительности входного СКИ до 500 пс дает такое же ослабление. Формы напряжения на входе и выходе МФ при длительности импульса 150 и 500 пс приведены на рис. 14.

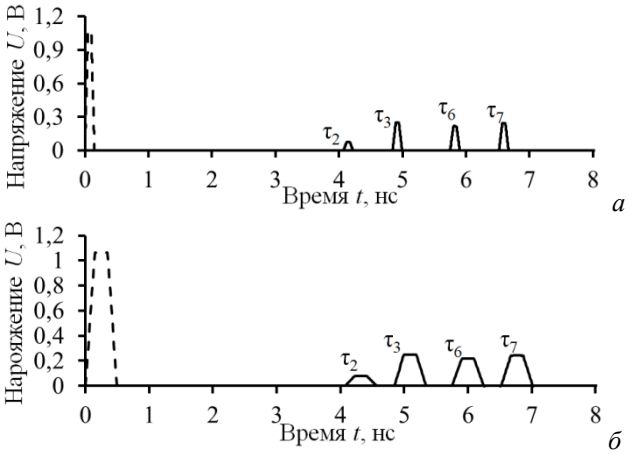

Рис. 14. Формы напряжения на входе (- -) и выходе (-) МФ при *h*=0,5 мм, s_1=0,09 м и w_1=0,95 мм и СКИ длительностью 150 (*а*) и 500 (*б*) пс

При таком наборе параметров вычислен временной отклик при изменении граничных условий на концах всех пассивных проводников КЗ-ХХ (рис. 15а) и ХХ-КЗ (рис.15б). Примечательно то, что при изменении граничных условий амплитуда всех импульсов равна 0,108 В. Однако ослабление определяется дополнительными импульсами. Эти импульсы появляются при асимметрии поперечного сечения МФ или изменении граничных условий [23]. Так, Umax=0,132 В, а ослабление составляет 10 раз.

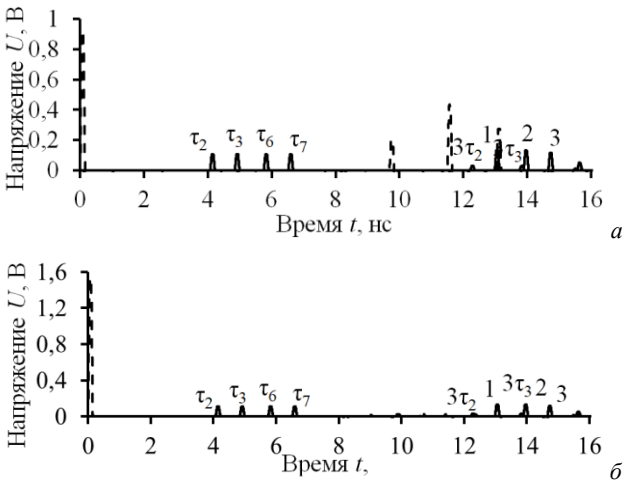

Рис. 15. Формы напряжения на входе (- -) и выходе (-) МФ при КЗ-ХХ (*а*) и ХХ-КЗ (*б*)

IV. Заключение

Таким образом, выполнена параметрическая оптимизация эвристическим поиском МФ на ДПП с лицевыми и боковыми связями. Достигнуто следующее:

1. Максимизация разности максимальной и минимальной задержек импульсов (τ_7–τ_2 = 2,45 нс/м).

2. Выравнивание разностей задержек мод 3 и 2, 7 и 6 (τ_3–τ_2 = 0,77 нс/м, τ_7–τ_6 = 0,77 нс/м), а также максимизация для мод 6 и 3 (τ_6–τ_3 = 0,91 нс/м).

3. Минимизация амплитуд импульсов разложения исходного СКИ: в согласованном случае ослабление составило 4 раза, а при ХХ-КЗ на концах всех пассивных проводников – 10 раз.

В дальнейшем планируется выполнить оптимизацию с учетом потерь для изготовления лабораторного макета.

Поддержка

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-90033

Литература

[1] Giri D.V., Tesche F.M. Classification of intentional electromagnetic environments (IEME) // IEEE Transactions on Electromagnetic compatibility. 2004. V. 46. № 3. P. 322–328.

[2] Hayashi Y.I., Homma N., Mizuki T., Aoki T., Sone H. Fundamental study on fault occurrence mechanisms by intentional electromagnetic interference using impulses // Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC). Taipei. 26–29 May 2015. P. 585–588.

[3] Radasky W.A., Hoad R. Recent developments in high power EM (HPEM) standards with emphasis on high altitude electromagnetic pulse (HEMP) and intentional electromagnetic interference (IEMI) // IEEE Letters on Electromagnetic Compatibility Practice and Applications. 2020. V. 2. № 3. P. 62–66.

[4] Sabath F. What can be learned from documented Intentional Electromagnetic Interference (IEMI) attacks? // XXXth URSI General Assembly and Scientific Symposium. Istanbul. 13–20 August 2011. P. 1–4.

[5] Albertson R.T., Arthur J., Rashid M.H. Overview of electromagnetic interference // 38th North American Power Symposium. Carbondale. 17–19 September 2006, P. 263–266.

[6] Kaur M., Kakar S., Mandal D. Electromagnetic interference // 3rd International Conference on Electronics Computer Technology. Kanyakumari. 10 April 2011. V. 4. P. 1–5.

[7] Camp M., Garbe H., Nitsch D. Influence of the technology on the destruction effects of semiconductors by impact of EMP and UWB pulses // IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Minneapolis. 19–23 August 2002. V. 1. P. 87–92.

[8] Nitsch D., Camp M., Sabath F., ter Haseborg J.L., Garbe H. Susceptibility of some electronic equipment to HPEM threats // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2004. V. 46. № 3, P. 380–389.

[9] Narayanasamy B., Luo F. A survey of active EMI filters for conducted EMI noise reduction in power electronic converters // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2019. V. 61. № 6. P. 2040–2049.

[10] Пат. U8098495 B2 США, МПК US H05K7/00. Electromagnetic interference filter. / Ho Yan Ho (Hong Kong, HK). № 13/018366; заявл. 31.01.2011; выдан 17.01.2012.

[11] Biela J., Wirthmueller A., Waespe R., Heldwein M.L., Raggl K., Kolar J.W. Passive and active hybrid integrated EMI filters // IEEE Transactions on Power Electronics. 2009. V. 24. № 5. P. 1340–1349.

[12] Zhao L., Chen R., van Wyk J.D. An integrated common mode and differential mode transmission line RF-EMI filter // 351h Annual IEEE Power Electronics Specialisls Conference. Aachen. 2004. P. 4522–4526.

[13] Han S.M., Huh C.S., Choi J.S. A validation of conventional protection devices in protecting EMP // Progress in Electromagnetic Research. 2011. V. 119. P. 253–263.

[14] Krzikalla R., Weber T., ter Haseborg J.L. Interdigital microstrip filters as protection devices against ultrawideband pulses // IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. May 2003. Istanbul. V. 2. P. 1313–1316.

[15] Hong, Jia-Shen G., Michael J. Lancaster. Microstrip filters for RF/microwave applications // John Wiley & Sons. 2004.

[16] Weber T., ter Haseborg J.L. Hardening of electronics against transmission line coupled UWB-Signals // Proceedings of the XXVIIth URSI General Assembly. 2002.

[17] Gazizov A.T., Zabolotsky A. M., Gazizova O.A. New printed structures for protection against UWB pulses // 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. Erlagol. 29 June–3 July 2015. P. 120–122.

[18] Samaylichenko M.A., Zhechev Y.S., Gazizov T.R. Comparing electrical characteristics of coplanar waveguides and modal filters // 23st International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM). 29 June – 4 July 2022. Erlagol.

[19] Самойличенко М.А. Модальные фильтры для защиты от сверхкоротких импульсов: исследование возможностей эффективного использования в двусторонних печатных платах // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 4. С. 58–71.

[20] Самойличенко М.А., Газизов Т.Р. Влияние соединения опорных проводников на разложение сверхкороткого импульса в модальном фильтре на двухсторонней печатной плате // Журнал радиоэлектроники. 2021. № 9. С. 1–17.

[21] Патент на изобретение №2603843 РФ. Способ резервирования для печатных плат. –Газизов Т.Р., Орлов П.Е., Шарафутдинов В.Р., Кузнецова-Таджибаева О.М., Заболоцкий А.М., Куксенко С.П., Буичкин Е.Н. – №2015137547/07; Заявл. 02.09.15; Опубл. 10.12.16. Бюл. №34.

[22] Kuksenko S.P. Preliminary results of TUSUR University project for design of spacecraft power distribution network: EMC simulation // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. V. 560. № 012110. P 1–7.

[23] Belousov A.O., Chernikova E.B., Samoylichenko M.A., Medvedev A.V., Nosov A.V., Gazizov T.R., Zabolotsky A.M. From symmetry to asymmetry: the use of additional pulses to improve protection against ultrashort pulses based on modal filtration // Symmetry. 2020. V. 12(7). №. 1117. P. 1–38.

Optimization of a Modal Filter on a Double-Sided PCB with Broad Side and Edge Coupling

M.A. Samoylichenko, T.R. Gazizov

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, mary2011@mai.ru

Abstract — This paper presents the results of parametric optimization by heuristic search for a modal filter on a double-sided printed circuit board with broad-side and edge coupling. The device makes it possible to protect radio-electronic equipment from the ultra-wideband interference pulse. The authors performed optimization based on three main criteria: amplitude, range-time, and interval-time. We present the attenuation results for the optimized parameters when changing the boundary conditions at the ends of the passive conductors for short-circuit (SC), open-circuit (OC), and OC-SC. It is shown that when the boundary conditions change, the attenuation is estimated by the amplitude of additional pulses, and not by mode pulses. Attenuation of 4 times in relation to half of the EMF was achieved with loads at the ends of passive conductors of 50 Ω and 10 times with OC-SC. The maximum difference between the maximum and minimum per-unit-length delays of pulses up to 2.45 ns/m was obtained. The alignment of the differences of per-unit-length delays of modes 3 and 2, 7 and 6 (0.77 ns/m) was achieved, and a maximization was obtained for modes 6 and 3 (0.91 ns/m).

Keywords — modal filter, ultrashort pulse, printed circuit board, protection device.

References

[1] Giri D.V., Tesche F.M. Classification of intentional electromagnetic environments (IEME) // IEEE Transactions on Electromagnetic compatibility. 2004. V. 46. № 3. P. 322–328.

[2] Hayashi Y.I., Homma N., Mizuki T., Aoki T., Sone H. Fundamental study on fault occurrence mechanisms by intentional electromagnetic interference using impulses // Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC). Taipei. 26–29 May 2015. P. 585–588.

[3] Radasky W.A., Hoad R. Recent developments in high power EM (HPEM) standards with emphasis on high altitude electromagnetic pulse (HEMP) and intentional electromagnetic interference (IEMI) // IEEE Letters on Electromagnetic Compatibility Practice and Applications. 2020. V. 2. № 3. P. 62–66.

[4] Sabath F. What can be learned from documented Intentional Electromagnetic Interference (IEMI) attacks? // XXXth URSI General Assembly and Scientific Symposium. Istanbul. 13–20 August 2011. P. 1–4.

[5] Albertson R.T., Arthur J., Rashid M.H. Overview of electromagnetic interference // 38th North American Power Symposium. Carbondale. 17–19 September 2006, P. 263–266.

[6] Kaur M., Kakar S., Mandal D. Electromagnetic interference // 3rd International Conference on Electronics Computer Technology. Kanyakumari. 10 April 2011. V. 4. P. 1–5.

[7] Camp M., Garbe H., Nitsch D. Influence of the technology on the destruction effects of semiconductors by impact of EMP and UWB pulses // IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Minneapolis. 19–23 August 2002. V. 1. P. 87–92.

[8] Nitsch D., Camp M., Sabath F., ter Haseborg J.L., Garbe H. Susceptibility of some electronic equipment to HPEM threats // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2004. V. 46. № 3, P. 380–389.

[9] Narayanasamy B., Luo F. A survey of active EMI filters for conducted EMI noise reduction in power electronic converters // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2019. V. 61. № 6. P. 2040–2049.

[10] Пат. U8098495 B2 США, МПК US H05K7/00. Electromagnetic interference filter. / Ho Yan Ho (Hong Kong, HK). № 13/018366; заявл. 31.01.2011; выдан 17.01.2012.

[11] Biela J., Wirthmueller A., Waespe R., Heldwein M.L., Raggl K., Kolar J.W. Passive and active hybrid integrated EMI filters // IEEE Transactions on Power Electronics. 2009. V. 24. № 5. P. 1340–1349.

[12] Zhao L., Chen R., van Wyk J.D. An integrated common mode and differential mode transmission line RF-EMI filter // 351h Annual IEEE Power Electronics Specialisls Conference. Aachen. 2004. P. 4522–4526.

[13] Han S.M., Huh C.S., Choi J.S. A validation of conventional protection devices in protecting EMP // Progress in Electromagnetic Research. 2011. V. 119. P. 253–263.

[14] Krzikalla R., Weber T., ter Haseborg J.L. Interdigital microstrip filters as protection devices against ultrawideband pulses // IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. May 2003. Istanbul. V. 2. P. 1313–1316.

[15] Hong, Jia-Shen G., Michael J. Lancaster. Microstrip filters for RF/microwave applications // John Wiley & Sons. 2004.

[16] Weber T., ter Haseborg J.L. Hardening of electronics against transmission line coupled UWB-Signals // Proceedings of the XXVIIth URSI General Assembly. 2002.

[17] Gazizov A.T., Zabolotsky A. M., Gazizova O.A. New printed structures for protection against UWB pulses // 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. Erlagol. 29 June–3 July 2015. P. 120–122.

[18] Samaylichenko M.A., Zhechev Y.S., Gazizov T.R. Comparing electrical characteristics of coplanar waveguides and modal filters // 23st International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM). 29 June – 4 July 2022. Erlagol.

[19] Samoylichenko M.A. Modal filters for protection against ultrashort pulses: a study of the possibilities of effective use in double-sided printed circuit boards. Systems of Control, Communication and Security. 2021. № 4. P. 58-71 (in Russian)

[20] Samoylichenko M.A., Gazizov T.R. Vliyaniye soyedineniya opornykh provodnikov na razlozheniye sverkhkorotkogo impulsa v modalnom filtre na dvukhstoronney pechatnoy plate (The effect of reference conductor location on the ultrashort pulse decomposition in a modal filter on a double-sided printed circuit board) // Journal of Radio Electronics. 2021. № 9. S. 1–17.

[21] Патент на изобретение №2603843 РФ. Способ резервирования для печатных плат. –Газизов Т.Р., Орлов П.Е., Шарафутдинов В.Р., Кузнецова-Таджибаева О.М., Заболоцкий А.М., Куксенко С.П., Буичкин Е.Н. – №2015137547/07; Заявл. 02.09.15; Опубл. 10.12.16. Бюл. №34.

[22] Kuksenko S.P. Preliminary results of TUSUR University project for design of spacecraft power distribution network: EMC simulation // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. V. 560. № 012110. P 1–7.

[23] Belousov A.O., Chernikova E.B., Samoylichenko M.A., Medvedev A.V., Nosov A.V., Gazizov T.R., Zabolotsky A.M. From symmetry to asymmetry: the use of additional pulses to improve protection against ultrashort pulses based on modal filtration // Symmetry. 2020. V. 12(7). №. 1117. P. 1–38.