

УДК 621.391.825

М.А. Самойличенко, Т.Р. Газизов

Уменьшение массы модального фильтра на двухсторонней печатной плате

Рассматривается уменьшение массы модального фильтра, вырезанного в двухсторонней печатной плате. Уменьшение массы достигнуто за счет уменьшения толщины фольги и удаления одного или двух опорных проводников. Выполнено моделирование распространения сверхкороткого импульса в таких структурах модального фильтра. При уменьшении толщины фольги достигнуто ослабление в 2 раза по отношению к половине ЭДС, а при удалении одного из опорных проводников – в 3 раза.

Ключевые слова: модальная фильтрация, сверхкороткий импульс, бортовое оборудование, уменьшение массы.

Часто встречающейся причиной нарушения работы микросхем является воздействие кондуктивных помех в виде импульсных перенапряжений. Опасными являются сверхкороткие импульсы (СКИ) [1]. Основными особенностями такого воздействия являются широкий спектр и большая амплитуда. Такой импульс опасен из-за высокой проникающей способности, обусловленной малой длительностью воздействия, большой мощностью и широким спектром.

Чувствительным к СКИ является бортовое оборудование космического аппарата (КА). К такому оборудованию предъявляется ряд требований, таких как помехозащищённость, надёжность, электромагнитная совместимость. Также помимо общих требований есть и ряд специфических требований: малая масса, компактность, малое потребление электроэнергии, безотказность в условиях повышенных температур. Поэтому разрабатываемые устройства защиты от опасного СКИ должны удовлетворять всем этим требованиям.

Им соответствуют новые защитные устройства, называемые модальными фильтрами (МФ) [2]. В них происходит разложение СКИ в отрезке связанной или многопроводной линии передачи на моды, каждая из которых распространяется со своей задержкой, так что на выход приходят импульсы с меньшей амплитудой. Например, исследованы многопроводные, встречно-штыревые, зеркально-симметричные МФ [3–5]. Однако они сложны для интеграции в печатные платы (ПП), в частности, в двухсторонние. Это приводит к тому, что их надо изготавливать как отдельные защитные устройства. Поэтому актуально совершенствование МФ.

Один из простых вариантов для реализации – это МФ, вырезанный в двухсторонней печатной плате. Примечательно, что у такого МФ можно уменьшить массу не только посредством уменьшения, например, толщины проводников, но также удаления одного или двух опорных проводников. Цель работы – исследовать эти возможности.

Уменьшение толщины проводников

Поперечное сечение исходного МФ приведено на рис. 1, а. Параметры поперечного сечения: ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость, w – ширина проводников, t – толщина проводников, h –

толщина диэлектрика, s – расстояние между проводниками. В качестве диэлектрика выбран стеклотекстолит ($\epsilon_r = 4,5$) из-за его дешевизны.

Схема включения представлена на рис. 1, б. Значения сопротивлений $R_1=R_2=R_4=R_5=50$ Ом. Параметры входного воздействия: амплитуда ЭДС – 2 В, время нарастания, плоской вершины и спада приняты по 50 пс. Вычисление параметров и форм сигнала выполнено с помощью квазистатического подхода в системе TALGAT [6]. Потери в проводниках и диэлектриках не учитывались.

Моделирование выполнялось при $h = 500$ мкм, w (каждого проводника) = 1000 мкм, $s = 300$ мкм, длине МФ $l = 1$ м, $t = 105, 70, 35, 18$ мкм.

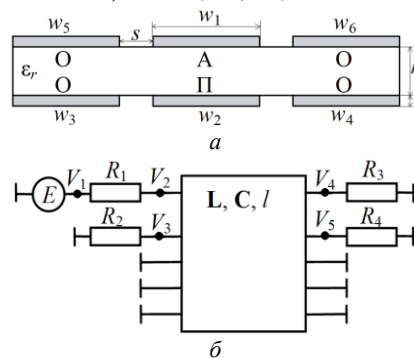


Рис. 1. Поперечное сечение (а) и схема включения МФ (б). Проводники: О – опорный, П – пассивный, А – активный

Ниже приведены матрицы **C** и **L** при $t = 105$ мкм:

$$C = \begin{bmatrix} 139,7 & -21,36 & -21,36 & -79,62 & -8,754 \\ -21,36 & 118,2 & -2,198 & -8,734 & -1,246 \\ -21,36 & -2,198 & 118,2 & -8,734 & -84,80 \\ -79,62 & -8,734 & -8,734 & 139,8 & -21,31 \\ -8,754 & -1,246 & -84,80 & -21,31 & 118,3 \end{bmatrix}, \text{ пФ/м;}$$

$$L = \begin{bmatrix} 508,853 & 203,655 & 370,556 & 308,559 & 336,548 \\ 20,655 & 352,76 & 183,281 & 149,265 & 169,73 \\ 370,556 & 183,281 & 686,56 & 316,081 & 503,361 \\ 308,559 & 149,265 & 316,081 & 454,295 & 336,375 \\ 336,548 & 169,73 & 503,361 & 336,375 & 672,752 \end{bmatrix}, \text{ нГн/м.}$$

На рис. 2 показаны результаты моделирования форм напряжения на входе и выходе МФ. Видно, что при $t = 105$ мкм (рис. 2, а) и 70 мкм (рис. 2, б) на

выходе МФ наблюдаются 3 импульса. Это объясняется тем, что амплитуды первого и третьего импульсов малы. При $t = 35$ мкм (рис. 2, в) и 18 мкм (рис. 2, з) амплитуда первого импульса становится больше и его четко видно. Амплитуда четвертого импульса тоже становится больше при $t = 35$ и 18 мкм, но из-за частичного наложения на третий импульс (при $t = 35$ мкм разность погонных задержек $\tau_4 - \tau_3 = 0,184$ нс/м) его почти не видно. Амплитуда пятого импульса (которая является максимальной) с уменьшением t становится меньше. Полученные значения амплитуд импульсов и погонные задержки приведены в табл. 1, 2.

Таблица 1
Погонные задержки мод (τ_i , нс/м)
при разных значениях t

t , МКМ	τ_1	τ_2	τ_3	τ_4	τ_5
105	4,199	4,597	5,786	5,941	6,411
70	4,353	4,744	5,721	5,931	6,474
35	4,382	4,924	5,811	5,995	6,477
18	4,418	4,939	5,858	6,024	6,497

Таблица 2
Амплитуды (U_i , В) при разных значениях t

t , МКМ	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5
105	–	0,208	0,306	–	0,494
70	–	0,233	0,326	–	0,428
35	0,016	0,220	0,285	–	0,480
18	0,009	0,223	0,286	–	0,478

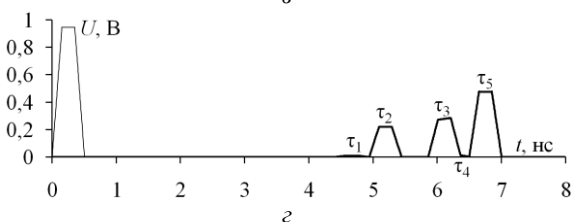
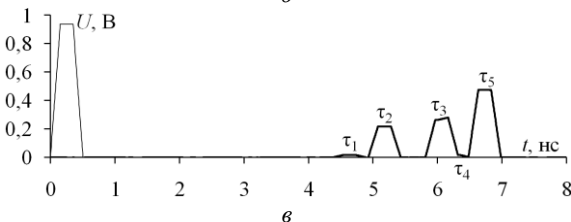
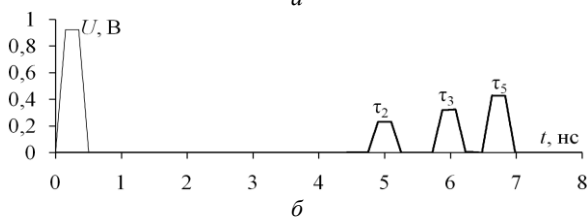
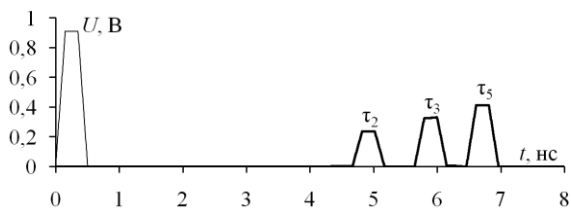


Рис. 2. Формы напряжения на входе МФ (–) и выходе МФ (–) при $t = 105$ (а), 70 (б), 35 (в) и 18 (з) мкм

Удаление опорных проводников

При удалении опорных проводников моделирование выполнялось со следующими параметрами: $w = 1000$ мкм, $s = 300$ мкм, $h = 500$ мкм, $t = 105$ мкм.

Поперечное сечение МФ с полигонами без нижнего левого опорного проводника показано на рис. 3, а, а схема включения – на рис. 3, б.

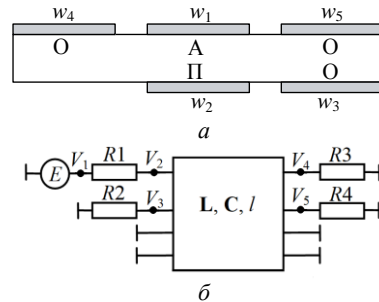


Рис. 3. Поперечное сечение (а) и схема включения МФ (б) без нижнего левого опорного проводника

На рис. 4 показаны результаты моделирования форм напряжения на входе и выходе МФ. Полученные значения амплитуд импульсов и погонных задержки приведены в табл. 3.

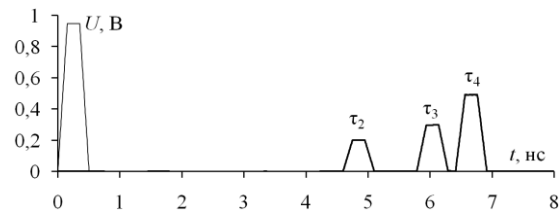


Рис. 4. Формы напряжения на входе (–) и выходе (–) МФ без нижнего левого опорного проводника

Таблица 3
Амплитуды (U_i , В) и погонные задержки мод (τ_i , нс/м)
для МФ без нижнего левого опорного проводника

τ_1	τ_2	τ_3	τ_4	U_1	U_2	U_3	U_4
4,399	4,751	5,736	6,358	–	0,307	0,191	0,501

Поперечное сечение МФ без опорного проводника сверху слева показано на рис. 5, а, а схема включения – на рис. 3, б.

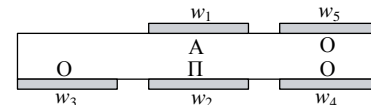


Рис. 5. Поперечное сечение МФ без верхнего левого опорного проводника

На рис. 6 показаны результаты моделирования форм напряжения на входе и выходе МФ.

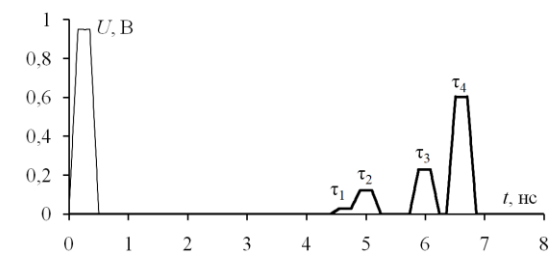


Рис. 6. Формы напряжения на входе (–) и выходе (–) МФ без верхнего левого опорного проводника

Полученные значения амплитуд импульсов и погонных задержек приведены в табл. 4.

Таблица 4
Амплитуды ($U_i, В$) и погонные задержки мод ($\tau_i, нс/м$) без верхнего левого опорного проводника

τ_1	τ_2	τ_3	τ_4	U_1	U_2	U_3	U_4
4,401	4,751	5,736	6,358	0,037	0,127	0,237	0,609

Поперечное сечение МФ без верхнего правого опорного проводника показано на рис. 7, схемная электрическая модель – на рис. 3, б.

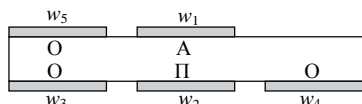


Рис. 7. Поперечное сечение МФ без верхнего правого опорного проводника

На рис. 8 показаны результаты моделирования форм напряжения на входе и выходе МФ. Полученные значения амплитуд импульсов и погонных задержек приведены в табл. 5.

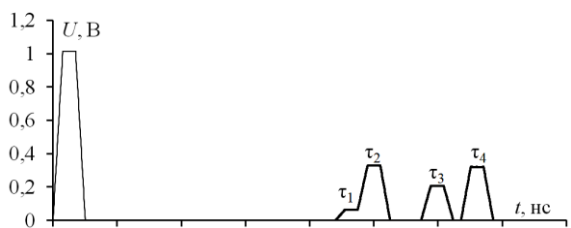


Рис. 8. Формы напряжения на входе (-) и выходе (-) МФ без верхнего правого опорного проводника

Таблица 5
Амплитуды ($U_i, В$) и погонные задержки мод ($\tau_i, нс/м$) без верхнего правого опорного проводника

τ_1 нс/м	τ_2 нс/м	τ_3 нс/м	τ_4 нс/м	U_1 В	U_2 В	U_3 В	U_4 В
4,398	4,750	5,736	6,359	0,070	0,334	0,216	0,325

Из представленных результатов видно, что при удалении одного из опорных проводников сверху на выходе МФ 4 импульса, тогда как при удалении нижнего опорного проводника их 3, что объясняется малой амплитудой первого импульса. Видно, что при удалении сверху правого проводника достигается наилучший результат, так как $U_1 = 0,070 В$; $U_2 = 0,334 В$; $U_3 = 0,216 В$ и $U_4 = 0,325 В$, а разности погонных задержек мод равны: $\tau_4 - \tau_3 = 0,623 нс/м$; $\tau_3 - \tau_2 = 1,236 нс/м$ и $\tau_2 - \tau_1 = 0,352 нс/м$. Удаление левого опорного проводника, как верхнего так и нижнего, влияет только на амплитуду. Так, при удалении верхнего $U_1 = 0,037 В$; $U_2 = 0,127 В$; $U_3 = 0,237 В$ и $U_4 = 0,609 В$, а при удалении нижнего $U_2 = 0,307 В$; $U_3 = 0,191 В$ и $U_4 = 0,501 В$. Разности погонных задержек мод для двух случаев одинаковы и равны: $\tau_4 - \tau_3 = 0,622 нс/м$; $\tau_3 - \tau_2 = 0,985 нс/м$ и $\tau_2 - \tau_1 = 0,352 нс/м$.

Поперечное сечение МФ с полигонами без двух опорных проводников показано на рис. 9, а, а схема включения показана на рис. 9, б.

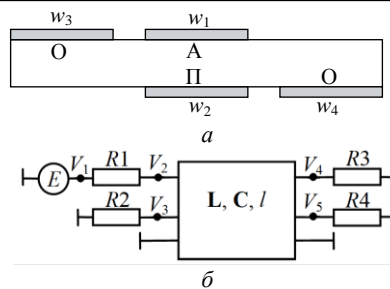


Рис. 9. Поперечное сечение МФ (а) и схема включения МФ (б) без двух опорных проводников по диагонали

На рис. 10 показаны результаты моделирования форм напряжения на входе и выходе МФ. Видно, что входной сигнал раскладывается на последовательность из двух импульсов. Полученные значения амплитуд импульсов и погонные задержки приведены в табл. 6.

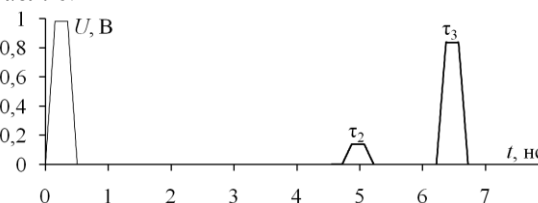


Рис. 10. Формы напряжения на входе (-) и выходе (-) МФ без двух опорных проводников по диагонали

Таблица 6
Амплитуды ($U_i, В$) и погонные задержки мод ($\tau_i, нс/м$) без двух опорных проводников по диагонали

τ_1	τ_2	τ_3	U_1	U_2	U_3
4,524	4,80013	6,20316	–	0,160	0,817

Заключение

Таким образом, показано, что за счет уменьшения массы МФ, вырезанного в двухсторонней ПП можно достичь большего ослабления СКИ. Так, при $t = 18 мкм$ достигнуто ослабление в 2 раза по отношению к половине ЭДС, а при удалении опорного проводника слева сверху – в 3 раза. Выявленное делает актуальным дальнейшее исследование по уменьшению массы таких МФ. Также для достижения наилучшего результата для каждой из рассмотренных структур целесообразно выполнение структурной и параметрической оптимизации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 19-37-51017.

Литература

- Gizatullin Z.M. Investigation of the immunity of computer equipment to the power-line electromagnetic interference / Z.M. Gizatullin, R.M. Gizatullin // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2016. – No. 5. – P 546–550.
- Gazizov T.R. New approach to EMC protection / T.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky // Proc. of the 18-th Int. Zurich Symp. on EMC, Munich, Germany. – 2007. – P. 273–276.
- Белоусов А.О. Многопроводная микрополосковая линия как модальный фильтр для защиты от сверхкоротких импульсов / А.О. Белоусов, Т.Р. Газизов, А.М. Заболотский // Доклады ТУСУР. – 2015. – Т. 37, № 8. – С. 124–128.

4. Khazhibekov R.R. Study of the characteristics of a modal filter with different periodic profiles of the coupling region / R.R. Khazhibekov, A.M. Zabolotsky, M.V. Khrantsov // International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON), Novosibirsk, Russia. – 2017. – P. 506–509.

5. Chernikova E.B. Comparative analysis of microstrip and reflection symmetric four-conductor modal filters / E.B. Chernikova, A.O. Belousov, A.M. Zabolotsky // Proc. of Int. Siberian Conf. on Control and Communications. Tomsk, Russia. – 2019. – P. 1–4.

6. Kuksenko S.P. Preliminary results of TUSUR University project for design of spacecraft power distribution network: EMC simulation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 560, No. 1. – P. 012110.

Самойличенко Мария Александровна
Аспирант каф. телевидения и управления (ТУ)
Томского государственного университета
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: (0000-0002-0889-5983)
Тел.: +8-952-885-69-71
Эл. почта: 1993mary2011@mail.ru

Газизов Тальгат Рашитович
Доцент, зав. каф. ТУ ТУСУРа, НТУ «Сириус»
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: (0000-0002-1192-4853)
Тел.: +7-913-826-07-24
Эл. почта: talgat@tu.tusur.ru