

А.О. Белоусов, Н.О. Власова, Т.Р. Газизов

Параметрическая оптимизация многопроводных модальных фильтров с круговым сечением в диапазоне реальных геометрических параметров

Впервые выполнены имитационное моделирование и оптимизация многопроводных модальных фильтров (МФ) с круговым сечением в диапазоне их реальных геометрических параметров в исполнении с экраном и без него. Рассмотрено 5 структур МФ с количеством проводников 2, 3 и 4. Выполнена параметрическая оптимизация эвристическим поиском, направленным на полное разложение воздействующего сверхкороткого импульса. Это достигнуто за счет обеспечения разной связи между активным и пассивным проводниками. Оптимизация выполнялась по амплитудному и временным критериям. Достигнуто полное разложение воздействующего помехового сигнала во всех МФ с максимальным коэффициентом ослабления 3,7 раза. Кроме этого, достигнуты близкие интервалы времени между импульсами разложения в 4 структурах МФ.

Ключевые слова: параметрическая оптимизация, многопроводные модальные фильтры, круговое сечение, экранирование, сверхкороткий импульс.

За последние годы в различных отраслях промышленности заметно возросло число технических средств (ТС) различного назначения. В то же время рост их количества обостряет проблему обеспечения электромагнитной совместимости, которая связана, в данном случае, со стремительным ростом влияния электромагнитных помех (ЭМП) различной природы на функционирование ТС [1]. Особую опасность представляют кондуктивные помехи, распространяющиеся непосредственно по проводникам. Примером могут служить сверхкороткие импульсы (СКИ) с высоким уровнем напряжения и субнаносекундным временем нарастания. Обладая короткой длительностью и широким спектром, СКИ способны локализоваться в критичных узлах ТС, нарушая их работу и даже выводя полностью ТС из строя. Поэтому актуальна защита ТС, в частности, средств безопасности и управления критичным оборудованием.

Известно, что традиционные устройства защиты, включаемые на входе ТС, не лишены недостатков (малая мощность, недостаточное быстродействие, паразитные параметры, малый срок службы). Поэтому для защиты от мощного СКИ применяется технология модальной фильтрации, суть которой заключается в разложении воздействующего СКИ на последовательность импульсов из-за различия задержек мод [2–4] в многопроводных линиях передачи (МПЛП). Данная технология результативно применяется в защитных устройствах, названных модальными фильтрами (МФ) [5]. Между тем традиционные МФ реализуются преимущественно на связанных и многопроводных полосковых структурах. Однако интерес представляют МФ на основе структур с круговым сечением (защитные кабели), которые имеют несколько важных достоинств по сравнению с МФ на основе полосковых структур: гибкость конструкции, большая длина и возможность использования готовых кабелей. Тем не менее модальная фильтрация в защитных структурах с круговым сечением исследована недостаточно [6]. Так, интерес представляет исследование возможности полного разложения СКИ

на выходе 2-, 3- и 4-проводных МФ с круговым сечением в диапазоне реальных геометрических параметров (для их будущей реализации), а также влияния внешнего экрана на характеристики таких МФ. Цель работы – выполнить такое исследование.

Подходы к моделированию

Моделирование выполнено в системе TALGAT [7]. Сначала построены геометрические модели поперечного сечения МФ. Затем вычислены матрицы погонных коэффициентов электростатической (C) и электромагнитной (L) индукций.

В рамках данной работы потери не учитывались, чтобы исключить их влияние на данном этапе исследования. Далее составлены эквивалентные схемы для моделирования и заданы окончания и воздействие. Наконец, вычислен временной отклик на импульсное воздействие.

Для исследования выбраны МФ, ранее исследованные в работах [8, 9]. Поперечные сечения приведены на рис. 1, где ϵ_{ri} – относительная диэлектрическая проницаемость, а r_i – радиус элемента поперечного сечения. В работе исследованы МФ 1 (с числом проводников $N = 2$), МФ 2 ($N = 2$), МФ 3 ($N = 3$), МФ 4 ($N = 3$) и МФ 5 ($N = 4$). Рассмотрим подробнее исследуемые МФ с круговым сечением:

– МФ 1 представляет собой центральный опорный проводник, который покрыт диэлектриком, вокруг которого симметрично расположены два проводника, а вся структура покрыта диэлектриком;

– МФ 2 представляет собой экранированную структуру, в центре которой расположен диэлектрический «стержень», вокруг которого на небольшом расстоянии симметрично расположены два проводника в диэлектрическом заполнении;

– МФ 3 представляет собой опорный проводник, покрытый диэлектриком, вокруг которого расположены три проводника, а вся структура покрыта диэлектриком;

– МФ 4 представляет собой экранированную структуру, в центре которой расположен диэлектрический «стержень», вокруг которого на небольшом

расстоянии расположены три проводника в диэлектрическом заполнении;

– МФ 5 представляет собой экранированную структуру, внутри которой, на некотором расстоянии относительно центра расположены четыре проводника в диэлектрическом заполнении.

При моделировании МФ 1–5 значения окончаний проводников (R) приняты равными 50 Ом. В качестве входного воздействия использован источник трапециевидных импульсных сигналов с ЭДС 5 В и общей длительностью 150 пс. Эквивалентные схемы МФ длиной 1 м представлены на рис. 1, *e–з*. Вычисленные формы напряжений на выходе МФ 1–5 после оптимизации приведены на рис. 2.

Результаты моделирования

Приведем диапазоны значений реальных геометрических параметров (мм) типовых проводов и кабелей, близких по структуре поперечного сечения к рассматриваемым МФ. Провод АППВ 3*2,5: радиусы проводников варьируются в диапазоне 1,15–1,45, толщина изоляции – 0,5–1,1, длина разделительного основания – 0,8–1 и толщина разделительного основания – 0,6–0,8. Кабель АВВГ-П 3х6(ож)-0,66: радиусы проводников варьируются в диапазоне 1,3–1,5, толщина изоляции – 0,5–1,1 и толщина оболочки – 0,7–1,5. Расстояние между оплеткой и изоляцией состав-

ляет в среднем 0,15. Кабель NYM 4x10-0,66: радиус проводников варьируются в диапазоне 1,7–2,15, толщина изоляции вокруг проводников – 0,8–1,1, толщина внешней изоляции – 1,3–1,6, диаметр внутренней изоляции – 15–16 и общий диаметр – 18–19,5.

В результате параметрической оптимизации МФ 1–5 получены следующие значения (мм): для МФ 1 – $r_1 = 0,9, r_2 = 1,6, r_3 = 3,5, r_4 = 3,6$ при $\epsilon_{r1} = 1, \epsilon_{r2} = 6, \epsilon_{r3} = 3$; для МФ 2 – $r_1 = 0,9, r_2 = 0,7, r_3 = 4,3, r_4 = 4,5$ при $\epsilon_{r1} = 1, \epsilon_{r2} = 10, \epsilon_{r3} = 3$; для МФ 3 – r_1 (проводник 1) = 0,9, r_1 (проводник 2) = 0,88, r_1 (проводник 3) = 0,89, $r_2 = 1,6, r_3 = 3,5$ при $\epsilon_{r1} = 1, \epsilon_{r2} = 10, \epsilon_{r3} = 3$; для МФ 4 – r_1 (проводник 1) = 0,5, r_1 (проводник 2) = 0,35, r_1 (проводник 3) = 0,52, $r_2 = 1,35, r_3 = 2,7, r_4 = 3,5$ при $\epsilon_{r1} = 1, \epsilon_{r2} = 5, \epsilon_{r3} = 10$; для МФ 5 – r_1 (проводник 1) = 0,9, r_1 (проводник 2) = 0,5, r_1 (проводник 3 и 4) = 0,7, $r_3 = 3, r_4 = 4, r_5$ (проводник 1) = 0,97, r_5 (проводник 2) = 0,55, r_5 (проводник 3 и 4) = 0,85 при $\epsilon_{r1} = 1, \epsilon_{r3} = 3, \epsilon_{r4}$ (проводник 1) = 20, ϵ_{r4} (проводник 2) = 17, ϵ_{r4} (проводник 3) = 10, ϵ_{r4} (проводник 4) = 5. В результате полученные значения лежат в диапазоне реальных параметров известных кабелей.

В табл. 1 приведены основные характеристики (амплитуды входного импульса $U_{вх}$, а также импульсов разложения U_i и разность погонных задержек $\Delta\tau_i$) МФ 1–5 после их оптимизации.

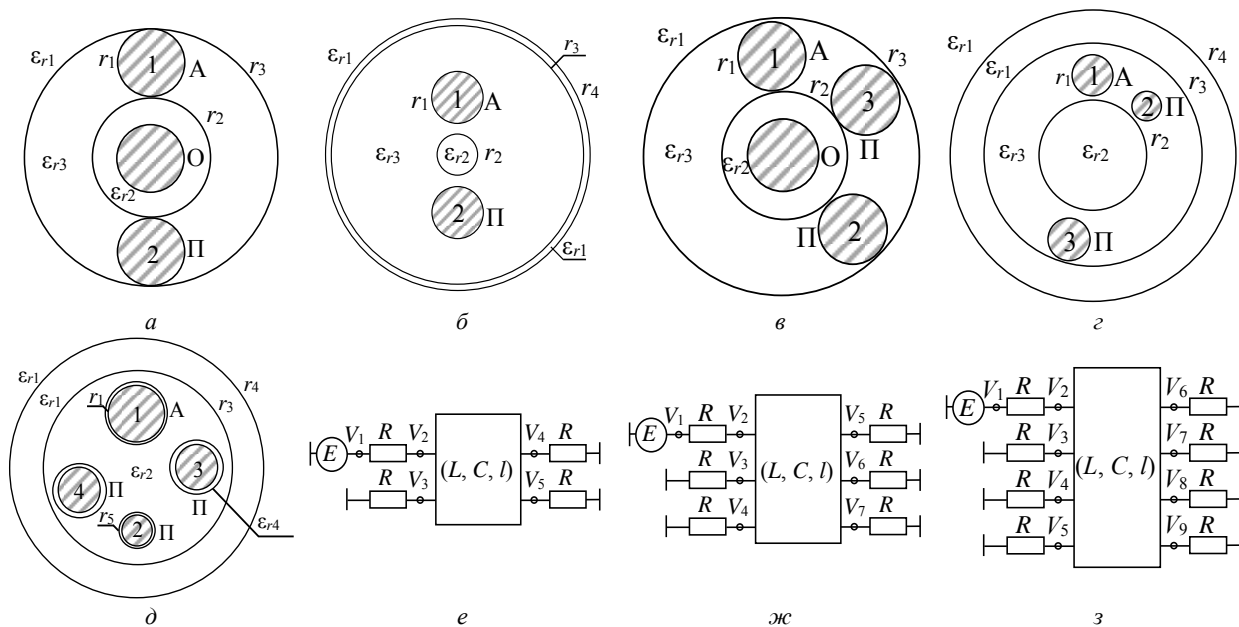


Рис. 1. Поперечные сечения МФ 1 (*a*), 2 (*б*), 3 (*в*), 4 (*г*) и 5 (*д*) после оптимизации и их эквивалентные схемы (*e–з*)

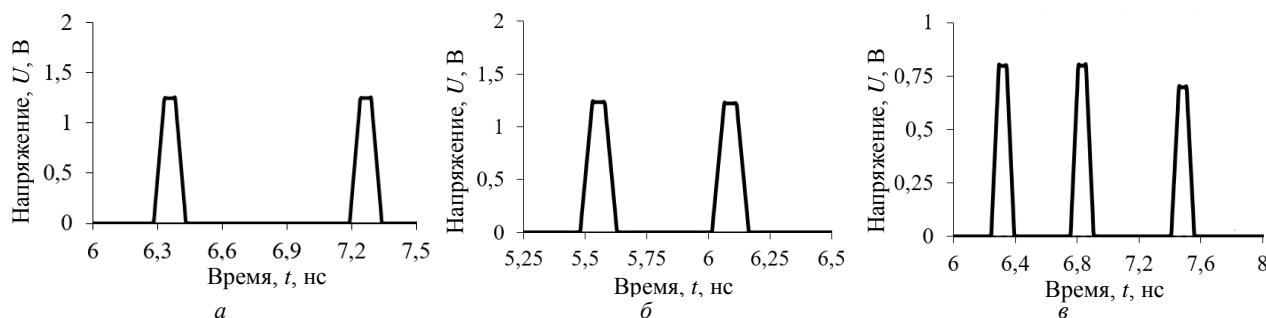


Рис. 2 (начало)

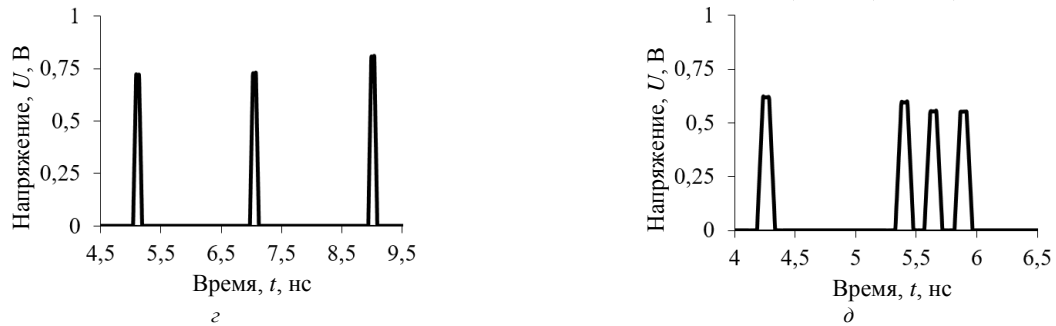


Рис. 2 (окончание). Формы напряжений на выходе МФ 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г) и 5 (д) после оптимизации

Амплитуды импульсов разложения (U_i) на выходе МФ 1–5 и значения разностей погонных задержек мод ($\Delta\tau_i$)

МФ	$U_{вх}$, В	U_1	U_2	U_3	U_4	$\Delta\tau_1$	$\Delta\tau_2$	$\Delta\tau_3$
1	2,49	1,25	1,24	–	–	0,77	–	–
2	2,45	1,23	1,22	–	–	0,38	–	–
3	2,3	0,8	0,8	0,7	–	0,31	0,5	–
4	2,3	0,71	0,72	0,8	–	1,74	1,81	–
5	2,3	0,62	0,59	0,55	0,55	1	0,03	0,11

Из рис. 2, а видно, что к концу линии приходят 2 импульса вдвое меньшей амплитуды (по отношению к $U_{вх}$). При этом импульсы разложения не накладываются друг на друга, уменьшая тем самым максимальное значение выходного напряжения U_{max} . Из таблицы следует, что значение $\Delta\tau_1$ составляет 0,77 нс/м, что позволяет увеличить длительность входного импульса до 0,9 нс (согласно отклику) при том же коэффициенте ослабления.

Из рис. 2, б видно, что к концу линии приходят 2 импульса, каждый из которых также в 2 раза меньше $U_{вх}$. Импульсы разложения, как и в случае с МФ 1, не накладываются друг на друга. Значение $\Delta\tau_1$ составляет 0,38 нс/м, что позволяет увеличить длительность входного импульса до 0,5 нс при том же коэффициенте ослабления.

Из рис. 2, в видно, что к концу линии приходят 3 импульса. При этом первый – в 2,88 раза, второй – в 2,88 раза, а третий – в 3,33 раза меньше значения $U_{вх}$. Также видно, что импульсы разложения, как и в случае с МФ 1, не накладываются друг на друга. Значение U_{max} составляет 0,8 В, что в 2,88 раза меньше значения $U_{вх}$. Значение $\Delta\tau_1$ составляет 0,31 нс/м, а $\Delta\tau_2$ – 0,5 нс/м. Поскольку минимальное значение $\Delta\tau$ составляет 0,31 нс/м, то возможно увеличение длительности входного импульса до 0,46 нс при том же коэффициенте ослабления.

Из рис. 2, г видно, что к концу линии приходят 3 импульса. При этом первый – в 3,23 раза, второй – в 3,2 раза, а третий – в 2,87 раза меньше значения $U_{вх}$. Также видно, что выходные импульсы не накладываются друг на друга. Значение U_{max} составляет 0,8 В, что в 2,87 раза меньше значения $U_{вх}$. Значение $\Delta\tau_1$ составляет 1,74 нс/м, а $\Delta\tau_2$ – 1,81 нс/м. Поскольку минимальное значение $\Delta\tau$ составляет 1,74 нс/м, то возможно увеличение длительности входного импульса до 1,89 нс при том же коэффициенте ослабления.

Из рис. 2, д видно, что к концу линии приходят 4 импульса. При этом первый – в 3,7 раза, второй – в 3,9 раза, а третий и четвертый – в 4,18 раза меньше

значения $U_{вх}$. Значение U_{max} составляет 0,62 В, что в 3,7 раза меньше значения $U_{вх}$. Значение $\Delta\tau_1$ составляет 1 нс/м, $\Delta\tau_2$ – 0,03 нс/м, а $\Delta\tau_3$ – 0,11 нс/м, следовательно, не происходит наложения импульсов друг на друга. Поскольку минимальное значение $\Delta\tau$ составляет 0,03 нс/м, то возможно увеличение длительности входного импульса до 0,18 нс при том же коэффициенте ослабления.

Из данных, приведенных в таблице, видно, что при оптимизации с учетом реальных параметров удалось добиться полного разложения воздействующего СКИ в МФ 1–5. При оптимизации МФ 3 и МФ 4 удалось выравнять амплитуды первых двух импульсов, а для МФ 4 достигнуто выравнивание интервалов времени между импульсами разложения. При оптимизации МФ 5 удалось попарно выравнять амплитуды импульсов 1 и 2 и импульсов 3 и 4, однако не удалось добиться выполнения интервально-временного критерия (выравнивание интервалов времени между импульсами разложения). Между тем полученные при оптимизации параметры позволяют приблизиться к согласованию структур с трактом (поскольку полученное значение $U_{вх}$ близко к половине ЭДС).

Заключение

Впервые выполнены имитационное моделирование и оптимизация многопроводных МФ с круговым сечением в диапазоне реальных геометрических параметров при их исполнении в экране и без него. Известно, что защитный экран снижает характеристики защитных устройств, функционирующих на основе эффекта модальной фильтрации из-за особенностей расположения опорного проводника (экран) относительно активного и пассивного проводников. Тем не менее выполнена оптимизация по амплитудному и временным критериям и достигнуто полное разложение воздействующего СКИ во всех МФ за счет обеспечения разной связи между активными и пассивными проводниками. В результате оптимизации достигнуто полное разложение воздействующего СКИ во всех МФ с максимальным ослаблением 3,7 раза

(МФ 5). Кроме этого, достигнуты относительно равные интервалы времени между импульсами разложения в МФ 1–4.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России по проекту FEWM-2020-0039.

Литература

1. 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. – Vol. 61, No. 5. – P. 546–550.

2. Belousov A.O. Complete ultrashort pulse decomposition in modal filters with circular symmetry / A.O. Belousov, T.T. Gazizov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/862/5/052050/pdf>. – 2020. – Vol. 862, No. 5. – P. 1–7.

3. Газизов Т.Р. Исследование модальных искажений импульсного сигнала в многопроводных линиях с неоднородным диэлектрическим заполнением / Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий, О.М. Кузнецова-Таджибаева // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2004. – Т. 11, № 11. – С. 18–22.

4. Заболоцкий А.М. Модальные фильтры для защиты бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов. – Томск: Изд-во Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники, 2003. – 151 с.

5. Газизов Т.Р. Модальное разложение импульса в отрезках связанных линий как новый принцип защиты от коротких импульсов / Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий // Технологии электромагнитной совместимости. – 2006. – № 4(19). – С. 40–44.

6. Белоусов А.О. Модальное разложение сверхкороткого импульса в многопроводной линии передачи с круговой симметрией / А.О. Белоусов, А.М. Заболоцкий // Матер.

11-й Междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления». – Томск: В-Спектр, 2015. – Ч. 2. – С. 14–18.

7. 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. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/560/1/012110/pdf>. – 2019. – P. 1–7.

8. Belousov A.O. Parametric optimization of the cables with the modal filtration effect / A.O. Belousov, N.O. Vlasova // Journal of Physics: Conference Series. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1862/1/012004/pdf>. – 2021. – Vol. 1862, No. 1. – P. 1–6.

9. Belousov A.O. Parametric optimization of shielded multiconductor modal filters with circular cross section / A.O. Belousov, N.O. Vlasova // Proceedings of 22 International conference on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM–2021). – Eragol, Altai, June 29–July 3, 2021. – P. 1–4.

Белоусов Антон Олегович

Канд. техн. наук, м.н.с. НИЛ «ФИЭМС»,
доцент каф. телевидения и управления (ТУ) ТУСУРа
ORCID: 0000-0002-0154-8014
Эл. почта: ant1lafleur@gmail.com

Власова Наталья Олеговна

Инженер НИЛ «ФИЭМС», магистрант ТУ ТУСУРа
Эл. почта: ostrolistaya97@mail.ru

Газизов Тальгат Рашитович

Зав. каф. ТУ, д-р техн. наук, доцент ТУСУРа
ORCID: 0000-0002-1192-4853
Эл. почта: talgat@tu.tusur.ru