

УДК 621.396.41

В.П. Костелецкий, Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий

Разработка сильноточного модального фильтра с уменьшенной массой для силовой шины электропитания космического аппарата

Представлены результаты квазистатического моделирования модального фильтра с уменьшенным поперечным сечением проводников, не подвергающихся значительным токовым нагрузкам. Рассмотрены временные характеристики в дифференциальном и синфазном режимах распространения. Показана зависимость коэффициента ослабления от толщины проводников.

Ключевые слова: облегченный, сильноточный, модальный фильтр, дифференциальный режим, синфазный режим, коэффициент ослабления, сверхкороткий импульс, устройство защиты.

Эксплуатация электронного оборудования в условиях космического пространства предъявляет повышенные требования к надежности. Необходимо учитывать следующие факторы: устойчивость к вибрации, перегрузкам, перепаду температур, влажность, стабильность параметров по мере набора суммарной дозы облучения и выживаемость после контакта с тяжелыми заряженными частицами [1]. Одной из актуальных задач является защита от электромагнитных воздействий [2], среди которых весьма опасен сверхкороткий импульс (СКИ), поскольку его спектр перекрывает широкий диапазон частот, вследствие чего СКИ способен преодолевать традиционные средства защиты [3]. Для защиты от СКИ примечателен отдельный вид устройств, в которых используются модальные искажения [4, 5]. Ввиду своих конструктивных особенностей такие устройства являются надежными и имеют небольшую массу, но для космоса они должны быть еще легче.

Цель работы – разработка устройства для защиты от СКИ с уменьшенной массой под номинальный ток 50 А, ослабляющего помехи в дифференциальном и синфазном режимах.

Проектирование защитного устройства

При проектировании за основу взят асимметричный модальный фильтр (МФ) с лицевой связью. Он имеет большую разность задержек мод и меньшую амплитуду импульсов на выходе, чем МФ с боковой связью [6]. В системе токоведущих частей МФ активные проводники, с точки зрения нагрузочной способности по току, являются критическими узлами, это обусловлено конструктивными особенностями и предъявляемыми к такого рода элементам требованиями, которые закладываются при проектировании [7, 8]. В соответствии с ГОСТ В 23584-79 [9] основой для расчета площади поперечного сечения токоведущей жилы является допустимая плотность тока. Токоведущие части МФ, подвергающиеся токовым нагрузкам, рассчитаны на номинальный ток в 50 А.

Конфигурация проводников МФ

Для анализа влияния толщины проводников, не подвергающихся значительным токовым нагрузкам, выполнено моделирование при следующих параметрах поперечного сечения: $w = 10$ мм, $w_1 = 20$ мм, $s = 2$ мм, $t = 1100$ мкм, $t_1 = 35$ мкм, $h = 330$ мкм,

$\epsilon_{r1} = 1$, $\epsilon_{r2} = 4,5$. Длина структуры (l) равна 150 мм. Поперечные сечения структур МФ исходной конфигурации и с уменьшенной массой приведены на рис. 1.

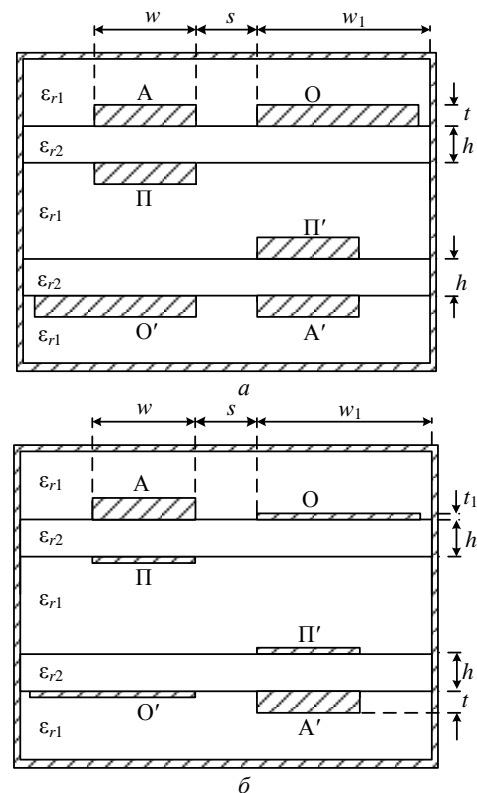


Рис. 1. Поперечные сечения исходного (а) и облегченного (б) МФ

Компьютерное моделирование МФ

Компьютерное моделирование выполнено без учета потерь в проводниках и диэлектриках. Допускалось, что в МФ распространяется только Т-волна. В качестве тестового воздействия использован одиночный импульс с длительностью фронта, спада и плоской вершины по 100 пс. Вычисления матриц коэффициентов электростатической (C) и электромагнитной (L) индукций, а также форм сигналов выполнены в программном обеспечении TALGAT. Использован квазистатический подход, основанный на методе моментов [10]. Для увеличения точности моделирования наиболее значимые участки структу-

ры поперечного сечения МФ поделены на сегменты, размер которых составляет 30 мкм для исходного МФ и 11 мкм для МФ с уменьшенной массой. На рис. 2 представлена схема электрических соединений МФ.

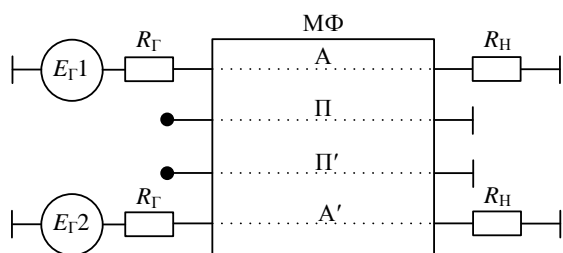


Рис. 2. Схема электрических соединений МФ

Для моделирования дифференциального режима на МФ подаются воздействия с амплитудой ЭДС 0,5 В для $E_{Г1}$ и $-0,5$ В для $E_{Г2}$. Для синфазного режима $E_{Г1} = E_{Г2} = 1$ В. Номиналы сопротивлений $R_{Г}$ и $R_{Н}$ равны 50 Ом.

Расчет массы МФ

Расчет массы МФ осуществлен на основе плотности используемых материалов и параметров поперечного сечения структуры для исходной и для облегченной версий МФ как

$$m_{и} = 4twlp_{М} + 2t_{и}lp_{М} + 2hlp_{FR4}(2w + s + w_{и}), \quad (1)$$

$$m_{о} = 2twlp_{М} + 2t_{о}lp_{М} + 2hlp_{FR4}(2w + s + w_{о}), \quad (2)$$

где $p_{М}$ и p_{FR4} – плотности меди и стеклотекстолита марки FR4 соответственно. Принято $p_{М} = 8,92$ г/см³, а для p_{FR4} , находящейся в пределах от 1,6 г/см³ до 1,9 г/см³, использовано среднее значение. Масса МФ составила 125 г для исходного и 39,52 г для облегченного. По результатам расчета массу МФ удалось уменьшить в 3,16 раза.

Результаты моделирования

Формы напряжения на выходе МФ приведены на рис. 3. В дифференциальном режиме максимальная амплитуда импульсов на выходе составила 75 мВ для исходного и 80 мВ для облегченного МФ, а в синфазном – 80 и 82 мВ соответственно. Отметим, что везде максимальная амплитуда определяется четвертым импульсом.

Приведены расчетные матрицы для исходной и облегченной структур МФ:

$$C = \begin{bmatrix} 1,27 & -1,23 & -0,36 \cdot 10^{-4} & -9,77 \cdot 10^{-6} \\ -1,23 & 1,27 & -3,52 \cdot 10^{-4} & -3,6 \cdot 10^{-4} \\ -3,6 \cdot 10^{-4} & -3,52 \cdot 10^{-4} & 1,27 & -1,23 \\ -9,77 \cdot 10^{-6} & -0,36 \cdot 10^{-4} & -1,23 & 1,27 \end{bmatrix}, \text{ нФ/м,}$$

$$L = \begin{bmatrix} 164 & 145 & 9,94 & 9,03 \\ 145 & 162 & 10,9 & 9,94 \\ 9,94 & 10,9 & 162 & 145 \\ 9,03 & 9,94 & 145 & 164 \end{bmatrix}, \text{ нГн/м,}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1,27 & -1,23 & -5,9 \cdot 10^{-4} & -2,2 \cdot 10^{-4} \\ -1,23 & 1,27 & -11,5 \cdot 10^{-4} & -5,9 \cdot 10^{-4} \\ -5,9 \cdot 10^{-4} & -11,5 \cdot 10^{-4} & 1,27 & -1,23 \\ -2,2 \cdot 10^{-4} & -5,9 \cdot 10^{-4} & -1,23 & 1,27 \end{bmatrix}, \text{ нФ/м,}$$

$$L = \begin{bmatrix} 160 & 140 & 5,65 & 5,40 \\ 140 & 159 & 5,92 & 5,65 \\ 5,65 & 5,92 & 159 & 140 \\ 5,40 & 5,65 & 140 & 160 \end{bmatrix}, \text{ нГн/м.}$$

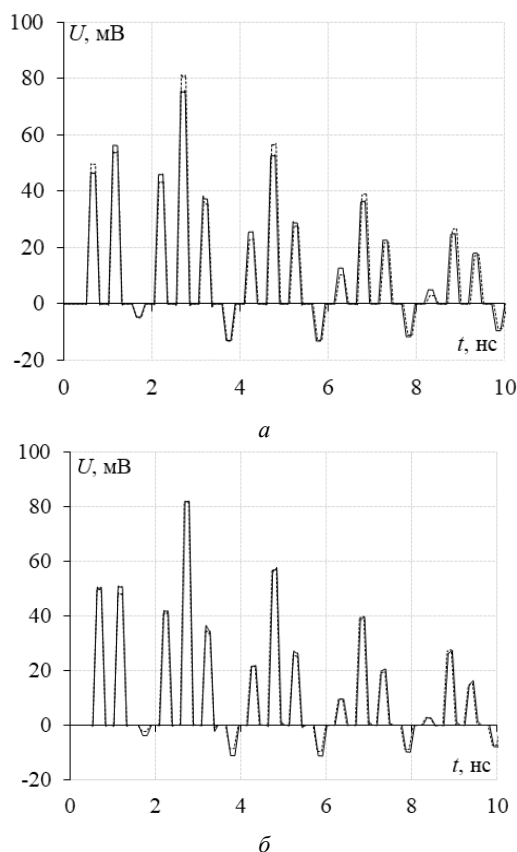


Рис. 3. Формы напряжения на выходе МФ в дифференциальном (а) и синфазном (б) режимах при $t_1 = 1100$ мкм (—), 35 мкм (---)

В ходе разработки МФ получена зависимость его коэффициента ослабления (K) от толщины проводников (t_1), не подвергающихся значительным токовым нагрузкам, которая изображена на рис. 4.

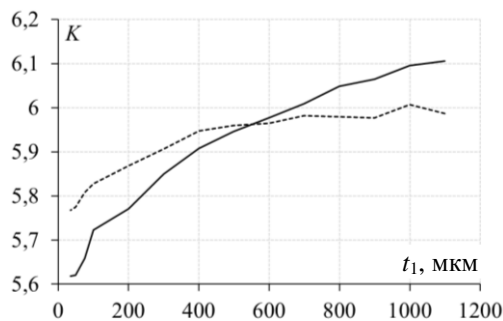


Рис. 4. Зависимость минимального коэффициента ослабления МФ от толщины проводников в дифференциальном (—) и синфазном (---) режимах

Заключение

С уменьшением толщины проводников, не подвергающихся значительным токовым нагрузкам, в дифференциальном и синфазном режимах, наблюдается незначительное уменьшение ослабления рас-

смотренного МФ. Так, при изменении толщины проводников от 1100 до 35 мкм (в 31 раз), давшем уменьшение массы МФ в 3,16 раза, коэффициент ослабления МФ уменьшился лишь на 8% для дифференциального режима и на 3,5% – для синфазного. Таким образом, рассмотренный подход целесообразен.

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

Литература

1. Чеченин, Н.Г., Кадменский А.Г., Мотавех Х.А., Панасюк М.И. Воздействие высокоэнергетичных космических протонов и ионов на элементы бортовой аппаратуры космических аппаратов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2012. – № (4). – С. 17–27.
2. Газизов Т.Р. Электромагнитная совместимость и безопасность радиоэлектронной аппаратуры. – Томск: ТМЛ-Пресс, 2007. – 256 с.
3. Mora N. et al. Study and classification of potential IEMI sources // System Design and Assessment Notes. – 2014. – Vol. 41.
4. Chernikova E.B. Using reflection symmetry to improve the protection of radio-electronic equipment from ultrashort pulses / E.B. Chernikova, A.O. Belousov, T.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky // Symmetry. – 2019. – Vol. 11(7), No. 883. – P. 1–25.
5. Gazizov A.T., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. UWB pulse decomposition in simple printed structures // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2016. – Vol. 58, No. 4. – P. 1136–1142.
6. Самотин И.Е. Устройства защиты вычислительной техники и систем управления путем модального разложения импульсов помех в кабельных и полосковых структурах: дис. ... канд. техн. наук / ТУСУР. – Томск, 2011. – 199 с.

7. Джонсон Г., Грэхем М. Конструирование высокоскоростных цифровых устройств. – М.: Вильямс, 2006. – 619 с.

8. Нагорный С.И., Донцов В.В. О подходах к определению требований, предъявляемых к средствам вычислительной техники, выполненной в защищенном исполнении // Спецтехника и связь. – 2010. – № 1. – С. 46–56.

9. ГОСТ В 23584–79. Монтаж электрический радиоэлектронной аппаратуры и приборов. Общие технические требования. – М., 1981. – 15 с.

10. Куксенко С.П., Газизов Т.Р. Усовершенствование алгоритма вычисления методом моментов емкостных матриц структуры проводников и диэлектриков в диапазоне значений диэлектрической проницаемости // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2012. – № 17 (10). – С. 13–21.

Костелецкий Валерий Павлович

Аспирант, ассистент каф. телевидения и управления (ТУ) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0003-1275-6406
Эл. почта: kosteletskiy.vp@gmail.com

Газизов Тальгат Рашитович

Д-р техн. наук, доцент, зав. каф. ТУ ТУСУРа Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0002-1192-4853
Эл. почта: talgat@tu.tusur.ru

Заболоцкий Александр Михайлович

Д-р техн. наук, доцент, профессор каф. ТУ ТУСУРа Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0002-1801-7922
Эл. почта: zabolotsky_am@mail.ru