

УДК 621.37.037

И.В. Дмитренко, А.М. Заболоцкий

## Анализ частотного отклика модальных фильтров для подавления излучаемых эмиссий бортовой аппаратуры космического аппарата

Построены модели модальных фильтров с торцевой связью, с активным и пассивным проводниками на одной стороне подложки и опорным на другой, с лицевой связью. Вычислены матрицы погонных емкостей и индуктивностей, разности погонных задержек четной и нечетной мод. Выполнено моделирование частотных откликов модальных фильтров. Обнаружена возможность изменения знака разности погонных задержек мод в структуре с активным и пассивным проводниками на одной стороне подложки и опорным на другой.

**Ключевые слова:** модальные фильтры, частотный отклик, моделирование, бортовая аппаратура, космический аппарат.

В настоящее время повышается интерес к новым методам и средствам ослабления излучаемых эмиссий для бортовой аппаратуры (БА) космических аппаратов (КА). К последним предъявляются такие требования, как радиационная, вибрационная устойчивость, малые массогабаритные показатели, простота и низкая стоимость. В этой связи представляют интерес пассивные устройства, в частности на основе многосвязных полосковых структур с неуравновешенной связью [1]. К таким устройствам можно отнести и модальные фильтры (МФ). Исследованы разные структуры МФ: с торцевой связью, с активным и пассивным проводниками на одной стороне подложки и опорным на другой (далее треугольного), с лицевой связью [2], однако частотные характеристики МФ остаются мало исследованными. Кроме того, не показана возможность их использования для подавления сигнала на заданных частотах. Между тем, это очень актуально, особенно для БА КА. Так, существует стандарт [3], в котором представлены требования на уровень излучаемых эмиссий для БА КА (рис. 1). На рис. 1 допустимые уровни излучения приводятся в дБмкВ/м, а частота – в МГц. Как видно, на некоторых частотах уровень излучаемых эмиссий на 40 дБ ниже общего уровня. Тем временем известно, что излучаемые эмиссии можно подавить ослаблением кондуктивных, а значит, используя МФ.

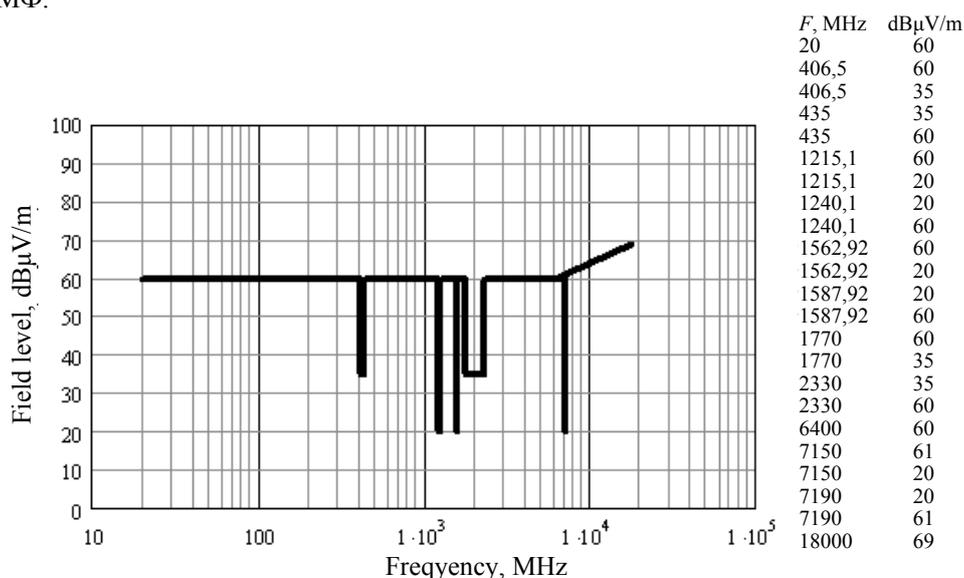


Рис. 1. Требования к уровню излучаемых эмиссий по [3]

Цель данной работы – показать возможность использования МФ для подавления излучаемых эмиссий БА КА на примере частоты работы глобальных навигационных систем. Для достижения

заданной цели представляется необходимым решить следующие задачи: построить геометрические модели поперечного сечения МФ; обеспечить согласование с радиочастотным трактом; рассчитать параметры исследуемых МФ; вычислить частотные отклики (зависимости модуля выходного напряжения МФ от частоты гармонического воздействия источника ЭДС с амплитудой 1 В) для случаев без учета потерь и с учетом потерь в проводниках и диэлектрике, в том числе с учетом частотной зависимости комплексной диэлектрической проницаемости для материала.

Для исследования выбраны структуры, которые использовались ранее [2]. Поперечные сечения структур показаны на рис. 2.

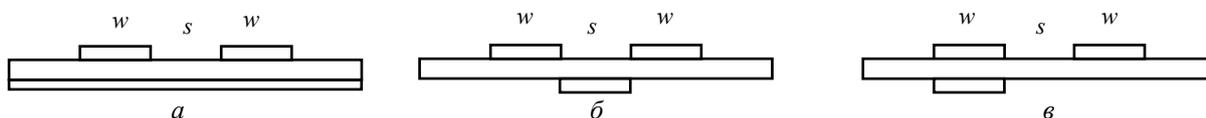


Рис. 2. Поперечные сечения МФ: *a* – с торцевой связью; *б* – треугольного; *в* – с лицевой связью

Материалом для каждой структуры выбран стеклотекстолит фольгированный двусторонний (толщина стеклотекстолита 0,25 мм, толщина фольги 105 мкм,  $\epsilon_r = 5,4$ ). Схема включения фильтров изображена на рис. 3.



Рис. 3. Схема включения МФ

Моделирование производилось в системе TALGAT, поскольку данное ПО полностью подходит для достижения поставленной цели [4]. Для каждой структуры были выбраны ширина проводников  $w$  и расстояние между ними  $s$  для согласования с 50-омным трактом (при моделировании полагалось, что  $R_1=R_2=R_3=R_4=50$  Ом). Длины линий рассчитывались по формуле

$$l = \frac{1}{2f|\tau_e - \tau_o|}, \quad (1)$$

где  $l$  – длина линии;  $f$  – частота, на которой осуществляется подавление;  $|\tau_e - \tau_o|$  – модуль разности погонных задержек четной ( $e$ ) и нечетной ( $o$ ) мод МФ. Для подавления сигнала выбрана частота 1,5 ГГц, так как она используется глобальными системами позиционирования. Параметры МФ сведены в таблицу. ( $Z_e$  и  $Z_o$  определены как собственные значения матрицы характеристических импедансов, полученной из матриц  $\mathbf{L}$  и  $\mathbf{C}$ .)

Параметры исследуемых МФ

Название структуры	С торцевой связью		Треугольного		С лицевой связью	
$\mathbf{L}$ , нГн/м	298	103	303	91	574,4	513,3
	103	298	91	303	513,3	578,9
$\mathbf{C}$ , пФ/м	127,8	-25,6	125,2	-15,3	425,1	-409
	-25,6	127,8	-15,3	125,2	-409	424,7
$Z_e$ , Ом	64,83		59,85		265,45	
$Z_o$ , Ом	36,67		38,83		8,84	
$(Z_e Z_o)^{0,5}$ , Ом	48,76		48,2		48,08	
$\tau_e$ , нс/м	5,32		6,578		4,105	
$\tau_o$ , нс/м	6,2		5,457		7,26	
$\Delta\tau$ , нс/м	0,886		-1,121		3,155	
$w$ , мм	0,35		1		2	
$s$ , мм	0,15		0,4		0,9	
$l$ , мм	358		283		101	

Из таблицы видно, что волновые сопротивления отличаются на 4% от сопротивления измерительного тракта, что полагается допустимым. В структурах с торцевой связью и треугольной сопротивлением четной и нечетной мод имеют небольшую разницу, в то время как в структуре с лицевой связью сопротивление нечетной моды резко падает, а четной – возрастает (что показывает предпоч-

тельность последней структуры). Это вызвано тем, что связь между активным и пассивным проводниками значительно усиливается по сравнению с остальными структурами. Также видна смена знака разности погонных задержек в треугольной структуре, чего не было выявлено ранее [5]. Данная особенность может быть использована для разложения и последующего (возможно частичного) восстановления сигналов [6]. Модуль разности погонных задержек четной и нечетной мод сигнала возрастает от МФ с торцевой связью к МФ с лицевой связью, соответственно по формуле (1) уменьшается длина МФ.

Далее вычислены частотные отклики МФ без учета и с учетом потерь (рис. 4). Отклики МФ с торцевой связью и треугольного практически не различаются, нули четко выражены на требуемой частоте. В отклике МФ с лицевой связью видны возникающие отражения, сигнал подавляется и на частотах ниже требуемой, из-за чего сильно сужается полоса пропускания данного МФ, соответственно может ослабляться полезный сигнал. Такие МФ можно использовать в цепях питания, так как в них отсутствует полезный сигнал, но зачастую распространяются наводки. При моделировании с учетом потерь выполнено моделирование частотного отклика с учетом потерь в проводниках и диэлектрике МФ, в том числе с частотной зависимостью комплексной диэлектрической проницаемости для материала FR-4 по модели Джорджевича [4].

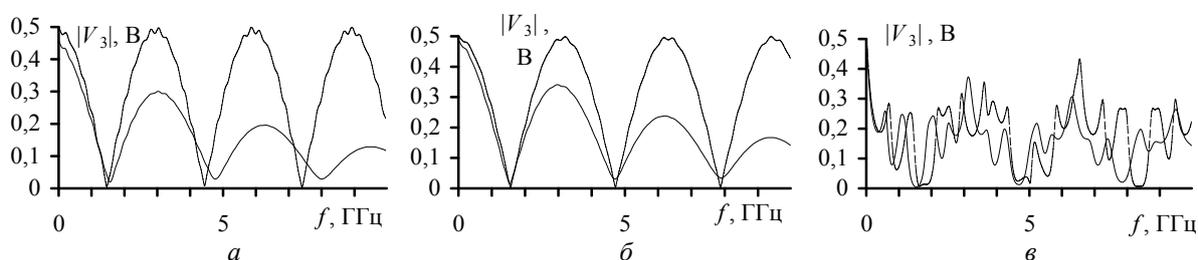


Рис. 4. Вычисленные частотные отклики без учета потерь (---) и с учетом потерь и частотной зависимости диэлектрической (исправлено на графиках  $U$  на  $V_3$ ) проницаемости (—) для МФ: а – с торцевой связью; б – треугольного; в – с лицевой связью

Из графиков видно, что моделирование без потерь показывает подавление сигнала лишь за счет разности погонных задержек четной и нечетной мод. В случае с потерями уровень сигнала уменьшается с ростом частоты, при этом сигнал не подавляется на 100% вследствие неполной компенсации по амплитуде четной и нечетной мод. Кроме этого, наблюдается небольшой сдвиг по частоте в отличие от случая без потерь. На частоте 1,5 ГГц ослабление составляет для структуры с торцевой связью  $-64,8$  дБ; для треугольной  $-67,9$  дБ; для структуры с лицевой связью  $-91,9$  дБ.

Таким образом, в работе приведены результаты исследования МФ на предмет подавления сигнала на требуемой частоте. Рассмотрено моделирование как без учета потерь, так и с учетом потерь в проводнике и диэлектрике. Показано, что с помощью МФ можно существенно снизить уровень кондуктивных, а значит, и излучаемых эмиссий. Исследуемые модели МФ обладают небольшими габаритами, что говорит о возможности их применения в БА КА. Кроме этого, дополнительно уменьшить длины линий можно, применяя диэлектрики с более высоким  $\epsilon_r$ , а также производя дополнительную оптимизацию, используя генетические алгоритмы.

В заключение представляется важным отметить, что моделирование в данной работе позволило ясно выявить влияние потерь на частотный отклик МФ, что трудно выполнить экспериментально. Авторами планируется экспериментальная проверка полученных результатов. Но в свете актуальности совершенствования БА отечественных КА полученные результаты моделирования представляются актуальными.

Исследование выполнено за счет средств Российского научного фонда по проекту 14-19-01232 в ТУСУРе.

#### Литература

1. Малютин Н.Д. Многосвязные полосковые структуры и устройства на их основе. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1990. – 164 с.

2. Заболоцкий А.М. Модальные фильтры для защиты бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2013. – 151 с.
3. AIAA S-121-2009 Electromagnetic Compatibility Requirements for Space Equipment and Systems / American Institute of Aeronautics and Astronautics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.booksfiles.org/xiazai/AIAA\\_S\\_121\\_2009\\_pre.pdf](http://www.booksfiles.org/xiazai/AIAA_S_121_2009_pre.pdf), свободный (дата обращения: 16.12.2015).
4. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT / С.П. Куксенко, А.М. Заболоцкий, А.О. Мелкозеров, Т.Р. Газизов // Доклады ТУСУРа. – 2015. – № 2(36). – С. 45–50.
5. Самотин И. Е. Устройства защиты вычислительной техники и систем управления путем модального разложения импульсов помех в кабельных и полосковых структурах: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2011. – 199 с.
6. Экспериментальное подтверждение модального разложения и восстановления импульса / И.Г. Бевзенко, Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий и др. // Матер. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления», Томск, 29–30 сентября 2008 г. – Томск: В-Спектр, 2009. – С. 81–84.

---

**Дмитренко Илья Васильевич**

Магистрант каф. ТУ ТУСУРа

Тел.: 8-923-417-3576

Эл. почта: [ilyadmitren@mail.ru](mailto:ilyadmitren@mail.ru)**Заболоцкий Александр Михайлович**

Канд. техн. наук, доцент каф. ТУ ТУСУРа

Тел.: 8 (382-2) 41-34-39

Эл. почта: [zabolotsky\\_am@mail.ru](mailto:zabolotsky_am@mail.ru)

Dmitrenko I.V., Zabolotsky A.M.

**Analysis of the frequency response of the modal filter for rejection of radiated emissions of spacecraft onboard equipment**

The models of following modal filters were built: with an end-of coupling, with active and passive conductors on one side of the substrate and the support on the other, with the front bond. The matrix of linear capacitance and inductance, the difference between the delays of even and odd modes of the signal were calculated. The frequency responses of the modal filter was received. The possibility of changing of the difference sign in linear modes delays in the structure with active and passive conductor on one side of the substrate and the support on the other are found.

**Keywords:** modal filters, frequency response, modeling.