

В.А. Трубоченинов, Н.О. Кузьмин, В.А. Сурков, Е.С. Жечев

## Соединительные платы для проведения измерений модальных фильтров с круговым сечением

Описана разработка соединительных печатных плат (ПП) для модальных фильтров с круговым сечением, с помощью которых выполнен анализ частотных и временных характеристик фильтров. В системе ADS получены коэффициенты передачи и отражения трёх структур соединительных ПП в частотном диапазоне от 0 до 2 ГГц. Используя субтрактивный метод изготовления ПП, подготовлены макеты на двухстороннем фольгированном стеклотекстолите.

**Ключевые слова:** печатная плата, модальный фильтр с круговым сечением, измерения, электромагнитная совместимость.

Из-за увеличения плотности монтажа электронных компонентов, рабочих мощностей и частот сигналов растут требования к обеспечению электромагнитной совместимости (ЭМС) радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). Промышленное и специализированное электромеханическое, электрическое и электронное оборудование при своей работе способно генерировать электромагнитные помехи, оказывающие негативное влияние на работу электронных устройств, таких как датчики, приемопередающие устройства, программируемые контроллеры и т.д. [1].

Невыполнение требований ЭМС РЭА способно привести к частичному или полному её отказам. Помимо излучаемых помех, крайне важно защищать электронное оборудование от кондуктивных воздействий, проникающих в РЭА по проводникам [2]. Одним из опасных видов такого рода помех являются импульсы малой длительности или сверхкороткие импульсы (СКИ) [3]. Классические методы помехозащиты зачастую не способны должным образом подавить СКИ из-за его широкого спектра, малой длительности и большой мощности [4]. Для защиты РЭА от СКИ известна технология модальной фильтрации и устройства на ее основе – модальные фильтры (МФ) [5, 6]. Чаще всего такие устройства реализуются в виде микрополосковых и полосковых структур на печатных платах (ПП) [7, 8].

Однако такой способ изготовления МФ слабо применим при защите межсоединений различных функциональных блоков РЭА. Тогда применяют МФ с круговым сечением, представляющие собой кабель с сильно электрически связанными проводниками [9]. Ранее проведен ряд вычислительных экспериментов во временной и частотной областях, однако верификационный эксперимент не был выполнен [10, 11]. При изготовлении МФ с круговым сечением разместить отводы или переходы для соединения с измерительным оборудованием затруднительно. Ранее изготовлены три МФ с круговым сечением. Однако, для проведения экспериментального исследования их частотных и временных характеристик необходимы специализированная оснастка или соединительные ПП.

Цель данной работы – представить результаты разработки и анализа соединительных ПП для МФ с круговым сечением.

### Структура, материалы и методы

Поперечные сечения изготовленных МФ с круговым сечением представлены на рис. 1. Изоляция всех кабелей выполнена из ПВХ-пластика.

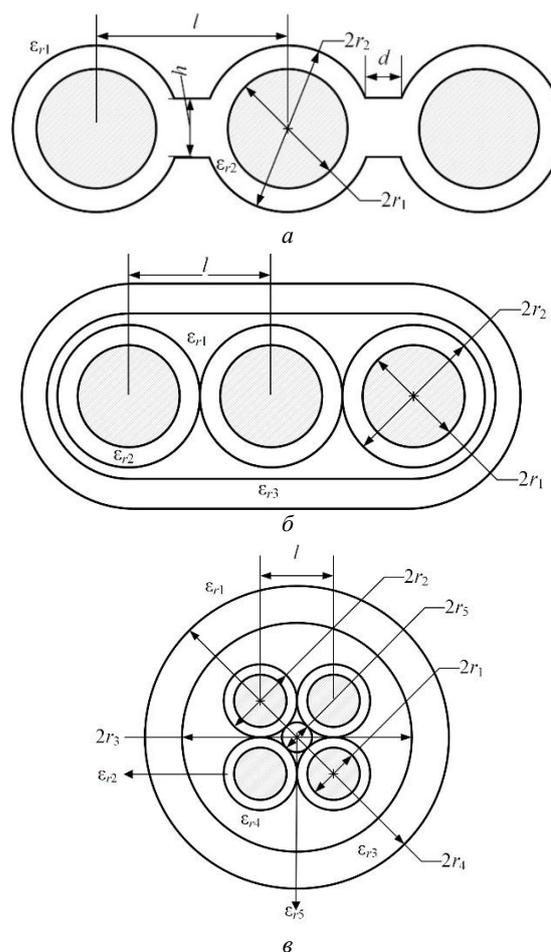


Рис. 1. Поперечное сечение МФ с круговым сечением: 1 (а), 2 (б) и 3 (в)

Геометрические параметры МФ 1 (мм): радиус проводников  $r_1 = 1,3$ ; радиус изоляции  $r_2 = 2,07$ ; длина разделительного основания (изоляция)  $d = 0,9$ ; толщина разделительного основания (изоляция)  $h = 0,6$ . Значения относительных диэлектрических проницаемостей  $\epsilon_{r1} = 1$  и  $\epsilon_{r2} = 3,4$ .

Геометрические параметры МФ2 (мм): радиус проводников  $r_1 = 1,4$ ; радиус изоляции  $r_2 = 2,4$ ; толщина внешней изоляции  $h = 0,95$ ; расстояние между оплеткой и изоляцией  $b = 0,15$ . Значения  $\epsilon_{r1} = 1$ ,  $\epsilon_{r2} = 3,0$ , и  $\epsilon_{r3} = 3,5$ .

Геометрические параметры МФ 3 (мм): радиус проводников  $r_1 = 1,88$ ; радиус изоляции  $r_2 = 2,82$ ; толщина внешней изоляции  $h = 1,5$ ; радиус внутренней изоляции  $r_3 = 7,75$ ; радиус диэлектрика в виде ПВХ-шнура  $r_5 = 1,22$ ; радиус структуры  $r_4 = 9,3125$ . Значения  $\epsilon_{r1} = 1$ ,  $\epsilon_{r2} = 3,4$ ,  $\epsilon_{r3} = 4,6$ ,  $\epsilon_{r4} = 2,8$  и  $\epsilon_{r5} = 4,6$ .

ПП должны удовлетворять следующим условиям: вносимое затухание в диапазоне от 0 до 2 ГГц должно быть не более 1 дБ; работа в коаксиальном тракте; возможность подключения коаксиальных согласованных нагрузок. Исходя из указанных требований в системе проектирования EasyEDA [12], разработаны 2 макета соединительных ПП.

На рис. 2 представлены фотошаблоны ПП. Геометрические размеры шаблона для МФ1 и 2:  $a = 26,1$  и  $b = 21$  мм, а для МФ3 –  $a = 32$  и  $b = 32$  мм. В конфигурациях МФ1 и 2 центральный проводник является опорным, а два крайних – активным и пассивным. Измерительное оборудование в тракте 50 Ом подключается к активному проводнику, при этом на ближний и дальний концы пассивного проводника подключаются согласованные нагрузки. В случае МФ3 опорным проводником может быть любой проводник или их комбинация. Однако наилучший результат показывает конфигурация с двумя опорными проводниками, находящимися по диагонали относительно друг друга.

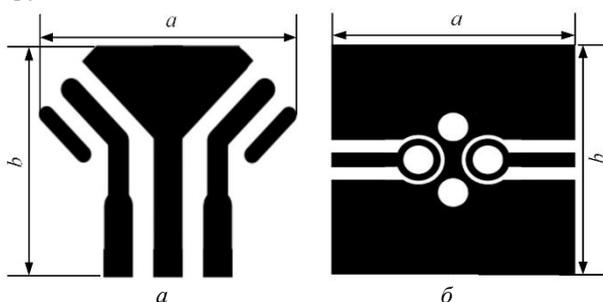


Рис. 2. Фотошаблон верхних слоев соединительных ПП для МФ1, 2 (а) и 3 (б)

В качестве материала выбран двухсторонний фольгированный стеклотекстолит с толщиной основания 1,5 мм. Нижний слой фотошаблонов представляет собой сплошной полигон. Для макета МФ3 на нижнем слое предусмотрены зазоры между отверстиями и полигоном, необходимые для того, чтобы активный и пассивный проводники не имели электрической связи с полигоном. (Подразумевается, что залуженные проводники МФ с круговым сечением припаиваются к дорожкам макетов, обеспечивая надежный контакт.)

Для изготовления макетов ПП выбран субтрактивный метод. Так, с помощью пленочного фоторезиста, ультрафиолетовой лампы и разработанных фотошаблонов на ПП переносился необходимый рисунок. После его проявления в растворе кальцинированной

соды заготовки травились в растворе хлорного железа. Полученные ПП лудились с помощью припоя ПОС-63. Затем к ним припаивались коаксиально-микрополосковые переходы SMA-9223/1.6 и проводники МФ.

### Результаты моделирования

Для анализа частотных характеристик макетов выполнено их электродинамическое моделирование в системе ADS [13]. Структура разбивалась на ячейки, максимальный и минимальный размер которых автоматически подбирался средой моделирования. Далее на основе коэффициентов передачи и отражения проверялась сходимость результатов. Моделирование макетов ПП проводилось в частотном диапазоне от 0 до 2 ГГц.

На рис. 3 представлены частотные зависимости модулей коэффициентов отражения  $|S_{11}|$  и передачи  $|S_{21}|$  макетов ПП.

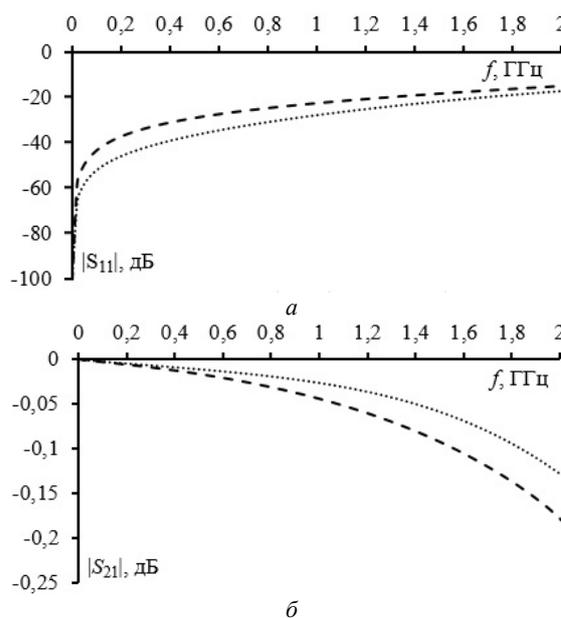


Рис. 3. Частотные зависимости  $|S_{11}|$  (а) и  $|S_{21}|$  (б) макетов ПП для МФ 1, 2 (—) и 3 (···)

Из рисунка видно, что платы согласованы, а уровень вносимых затуханий не превышает 0,2 дБ. Характеристика вносимых потерь, представленная в виде коэффициента передачи, является монотонно убывающей. Из графиков точно видно, что в частотном диапазоне от 0 до 2 ГГц отсутствуют различные резонансы. Однако характеристики, полученные в ходе моделирования, могут сильно отличаться от полученных в ходе реального эксперимента. Так, существенное влияние будут оказывать жилы проводов МФ и их монтаж на дорожки ПП. На уровень вносимых потерь также будут оказывать влияние реальные значения потерь в диэлектрике из-за частотной зависимости относительной диэлектрической проницаемости подложки. При этом следует учитывать уровень вносимого затухания коаксиально-микрополосковых переходов. Однако в заданном частотном диапазоне даже у дешевых изделий характеристики измеримы с полученными для соединительных ПП.

На рис. 4 представлены изготовленные макеты соединительных ПП с подключенными МФ. Видно, что на ПП установлены коаксиально-микроразветвляющие переходы, а залуженные проводники МФ запаиваются в соответствующие контактные площадки.



Рис. 4. Изготовленные макеты соединительных ПП с подключенными МФ1 (а), 2 (б) и 3 (в)

### Заключение

В работе представлены изготовленные макеты соединительных ПП для МФ с круговым сечением. По результатам электродинамического моделирования выявлено, что уровень вносимых потерь не превышает 0,2 дБ. Конфигурация ПП позволяет подключить измерительное оборудование как к активному, так и к пассивному проводникам МФ. Также с помощью коаксиальных нагрузок можно задавать различные граничные условия. В дальнейшем разработанные ПП будут использованы при проведении экспериментальных исследований во временной и частотной областях.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-19-00446) в ТУСУРе.

### Литература

1. Genender E. Probabilistic risk analysis technique of intentional electromagnetic interference at system level / E. Genender, H. Garbe, F. Sabath // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2014. – Vol. 56, No. 1. – P. 200–207.
2. Гизатуллин Р.М. Помехоустойчивость и информационная безопасность вычислительной техники при электромагнитных воздействиях по сети электропитания / Р.М. Гизатуллин, З.М. Гизатуллин. – Казань, 2014. – 142 с.

3. Study and classification of potential IEMI sources / N. Mora, F. Vega, G. Lugin, F. Rachidi, M. Rubinstein // System and assessment notes. – 2014. – 41 p.

4. Weber T. Linear and nonlinear filters suppressing UWB pulses / T. Weber, R. Krzikalla, J. L. terHaseborg // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2004. – Vol. 46, No. 3. – P. 423–430.

5. Заболоцкий А.М. Модальное разложение импульса в отрезках связанных линий как новый принцип защиты от коротких импульсов / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов // Техноlogии ЭМС. – 2006. – № 4. – С. 40–44.

6. Заболоцкий А.М. Теоретические основы модальной фильтрации / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов // Техника радиосвязи. – 2014. – № 3. – С. 79–83.

7. Gazizov A.T. Measurement and simulation of time response of printed modal filters with broad-side coupling / A.T. Gazizov, A.M. Zabolotskii, T.R. Gazizov // Journal of communications technology and electronics. – 2018. – Vol. 63, No. 3. – P. 270–276.

8. Zhechev Y.S. Research of the new structure of reflection symmetric modal filter / Y.S. Zhechev, E.B. Chernikova, A.O. Belousov // IEEE 20th International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM). – 2019. – P. 108–112.

9. Gazizov T.R. Modal decomposition of UWB pulse in power cable structures: Simple experiment showing useful possible applications / T.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky, I.E. Samotin // Book of abstracts EUROEM. – 2008. – Vol. 21. – P. 62.

10. Самотин И.Е. Устройства защиты вычислительной техники и систем управления путем модального разложения импульсов помех в кабельных и полосковых структурах: дис. ... канд. техн. наук. – Том. гос. ун-т, 2011. – 119 с.

11. Белоусов А.О. Модальное разложение сверхкороткого импульса в многопроводных линиях передачи с круговой симметрией / А.О. Белоусов, А.М. Заболоцкий // 11-я Междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления». – 2015. – № 1-2. – С. 14–18.

12. Работа в EasyEDA [Электронный ресурс]. – Режим доступа свободный <https://easyeda.com/> (дата обращения: 25.07.2021).

13. Создание макета ПП в ADS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: свободный <https://www.keysight.com/ru/ru/products/software/pathwave-design-software/pathwave-advanced-design-system.html> (дата обращения: 26.07.2021).

### Трубченинов Вячеслав Анатольевич

Студент каф. телевидения и управления (ТУ) ТУСУРа  
Эл. почта: slava.trubcheninov@mail.ru

### Кузьмин Никита Олегович

Студент каф. ТУ ТУСУР  
Эл. почта: kuzjmin.nikita23@gmail.com

### Сурков Вячеслав Андреевич

Студент каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: vaceslavsurkov56@gmail.com

### Жечев Евгений Сергеевич

Аспирант каф. ТУ ТУСУРа  
ORCID: 0000-0003-4469-7033  
Эл. почта: zhechev75@gmail.com