

УДК 621.372

Экспериментальные исследования модального фильтра на основе круглой кабельной структуры

Гордеева В. О., Белоусов А. О.

Постановка задачи: внимание к электромагнитной обстановке современных радиоэлектронных средств (РЭС) в научном сообществе растёт с каждым годом. Это связано, в первую очередь, с их возрастающей восприимчивостью к электромагнитным помехам (ЭМП). Причинами этого являются рост быстродействия РЭС (увеличение верхней частоты спектра используемых сигналов), плотность их монтажа и трассировки, снижение рабочих токов и напряжений сигналов и др. ЭМП способны оказать негативное влияние на работу РЭС и даже привести к их разрушению и дестабилизации. Это подчёркивает важность и значимость исследований в области обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) критичных РЭС. Особый интерес представляют сверхширокополосные помехи, одной из разновидностей которых являются мощные сверхкороткие импульсы (СКИ), отличающиеся быстрым нарастанием и большой амплитудой. Для защиты РЭС от СКИ предложены устройства на основе технологии модальной фильтрации. Их называют модальными фильтрами (МФ) и традиционно реализуют в виде полосковых структур: отдельными устройствами или в существующих межсоединениях печатных плат. Однако недавние исследования в этой области позволяют также говорить об эффективности МФ на основе кабельных структур. Таким образом, представляют интерес реализация прототипа МФ на основе кабельной структуры, а также сравнение результатов измерений и вычислительного эксперимента. Между тем основные этапы разработки прототипов МФ на основе полосковых структур давно отработаны, в то время как прототипирование кабельных требует внимания и проработки. **Целью работы** является разработка и верификация прототипа МФ на основе круглой кабельной структуры. **Используемые методы:** оптимизация выполнялась в системе квазистатического анализа. Для вычислительных экспериментов использованы системы квазистатического (основанная на методе моментов) и электродинамического (основанная на методе конечных элементов и методе конечных разностей во временной области) анализа. При измерении частотных зависимостей модуля коэффициента передачи использован векторный анализатор электрических цепей «Панорама» P4226. **Новизна:** впервые представлена методика разработки прототипа МФ на основе круглой кабельной структуры, создан прототип МФ с её использованием и сравнены результаты натурных и вычислительных экспериментов. **Результат:** представлена общая методика прототипирования и измерения МФ на основе круглой кабельной структуры, а также разработан прототип МФ на её основе. Выполнена предварительная параметрическая оптимизация МФ в системе квазистатического анализа. Результаты измерений МФ в двух вариантах (с использованием соединительных печатных плат и без них) сравнены с результатами вычислительных экспериментов в системах квазистатического и электродинамического анализа. Характер зависимостей модуля коэффициента передачи МФ в полосе частот до 2 ГГц схож для всех видов анализа. Для МФ с печатными платами полоса пропускания составила 680 МГц при моделировании в системе квазистатического анализа, 700 МГц – электродинамического и 580 МГц при измерении. В диапазоне частот от 0 до 1 ГГц измеренный модуль коэффициента отражения МФ не превышает минус 8 дБ. Несмотря на то, что длина прототипа МФ (113 мм) почти в 10 раз меньше используемой при оптимизации (1 м), он способен ослабить воздействующую помеху общей длительностью 80,5 пс (по уровню 0,5) в 4,67, 5,2 и 6,17 раза по результатам моделирования в системах квазистатического и электродинамического анализа, а также измерений.

Библиографическая ссылка на статью:

Гордеева В. О., Белоусов А. О. Экспериментальные исследования модального фильтра на основе круглой кабельной структуры // Системы управления, связи и безопасности. 2024. № 2. С. 173-192. DOI: 10.24412/2410-9916-2024-2-173-192

Reference for citation:

Gordeyeva V. O., Belousov A. O. Experimental study of a modal filter based on a round cable structure. *Systems of Control, Communication and Security*, 2024, no. 2, pp. 173-192 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2024-2-173-192

Практическая значимость: предложенная общая методика прототипирования и измерения МФ на основе круглой кабельной структуры расширяет инструментарий разработчиков и инженеров, позволяя создавать различные модификации защитных устройств (как на основе круговых в сечении, так и абсолютно новых), а разработанный МФ примечателен возможностью практического применения для защиты РЭС от СКИ в самых различных сферах ввиду небольшой массы (до 120 г), радиационной стойкости, надежности и высоких защитных характеристик.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, сверхкороткий импульс, оптимизация, эволюционные алгоритмы, модальные фильтры, кабельные структуры.

Актуальность

Современные радиоэлектронные системы (РЭС) играют ключевую роль в различных сферах человеческой деятельности, начиная от бытовых приборов и заканчивая военной аппаратурой. Вместе с тем, по мере увеличения функционала и разнообразия РЭС, возникают проблемы, связанные с обеспечением их электромагнитной совместимости (ЭМС). Сложность конструкций РЭС, рост верхней частоты спектра используемых сигналов, увеличение плотности монтажа и уязвимость к преднамеренным электромагнитным воздействиям создают новые вызовы для обеспечения надежной работы РЭС в сложной электромагнитной обстановке. Одной из основных проблем ЭМС является восприимчивость цепей к кондуктивным помехам, которые передаются непосредственно через проводящие структуры РЭС [1]. В этой связи, особое внимание следует уделить электромагнитным помехам (ЭМП). Как известно, они могут приводить к нарушению штатного функционирования РЭС, сбои в работе которых могут привести к различным негативным последствиям [2, 3]. Это, в свою очередь, актуализирует рост числа исследований, посвященных повышению помехозащищенности различных РЭС [4–6]. Большой интерес, ввиду своих особенностей, представляют сверхширокополосные помехи, в виде сверхкоротких импульсов (СКИ) [7, 8]. Они представляют собой импульсные сигналы большой амплитуды и малой длительности, способные проникать в РЭС различными способами, например, по сигнальным или питающим цепям [9, 10].

Для защиты РЭС от СКИ предложена технология модальной фильтрации, принцип действия которой заключается в разложении СКИ на последовательность импульсов меньшей амплитуды. Устройства, функционирующие согласно данному принципу, называют модальными фильтрами (МФ) [11]. Традиционно МФ реализуют в виде полосковых структур, однако явление модального разложения возможно и в кабельных (защитных кабелях) [11]. Такие МФ имеют ряд достоинств перед полосковыми, например, гибкость конструкции, большую длину и возможность использования готовых кабелей [12, 13].

В процессе проектирования МФ всегда актуален выбор оптимальных геометрических и электрофизических параметров разрабатываемой структуры (в основном, из-за специфики требований, применяемых к МФ). Для поиска таких параметров применяются различные методы оптимизации. Как правило, полосковые МФ оптимизируются с использованием эволюционных алгоритмов глобальной оптимизации. Кроме этого, используются стохастические вероятностные и детерминированные алгоритмы в задачах комплексной оптимизации

МФ. Для наиболее эффективной оптимизации МФ на основе кабельных структур, в свою очередь, обычно применяются модифицированный алгоритм эволюционных стратегий (ЭС) и эвристический поиск. МФ на основе кабельных структур уже оптимизировались в диапазоне реальных геометрических параметров с использованием эвристического поиска в рамках предыдущих исследований [13, 14]. При этом продемонстрированы защитные характеристики макетов МФ, созданных с использованием 3 видов широко используемых кабелей: 3-проводных круглого и плоского, а также 4-проводного круглого [13]. Однако изготовление отдельного прототипа МФ на основе кабельной структуры из доступных материалов ранее не выполнялось, но это актуально. Причиной является возможность варьирования геометрических параметров элементов поперечного сечения, а также используемых изоляционных материалов при разработке прототипа МФ для повышения итоговых защитных характеристик. Таким образом, целью данной работы является создание прототипа МФ на основе кабельной структуры, измерение его характеристик и сравнение полученных результатов с результатами вычислительного эксперимента.

1. Моделирование и выбор материалов

Вначале предварительно рассмотрены 4 структуры МФ для определения наиболее подходящего к изготовлению: 2-проводный МФ, экранированный 2-проводный МФ, 3-проводный МФ и экранированный 3-проводный МФ (число проводников без учета опорного). Диапазоны параметров для оптимизации взяты в пределах реальных параметров. Так, для реализации проводников выбран распространенный одножильный провод ПВ-1 с медной жилой и изоляцией из ПВХ-пластиката, обладающий большой вариативностью в размерах сечений жилы и небольшой ценой. Поскольку диапазоны радиусов сечений проводящей медной жилы варьируются в широких пределах, 0,4–4 мм (площадь сечения 0,5–50 мм²), для оптимизации выбран диапазон наиболее распространенных – 0,5–1,8 мм при толщине изоляции 0,6–1 мм.

Моделирование и оптимизация выполнялись в системе квазистатического анализа TALGAT [15]. МФ оптимизированы посредством модифицированного алгоритма ЭС по методике оптимизации кабельных структур, подробно описанной в [13]. Оптимизация выполнялась одновременно по трем критериям: амплитудный, диапазонно-временной и согласования [16]. Оптимизируемыми параметрами для всех МФ выбраны: радиусы пассивных проводников (r_{12} и r_{13}), а также радиусы (R_i) и углы их расположения относительно начала координат (φ_i). Фиксированными параметрами при оптимизации приняты радиусы активного (r_{11}) и опорного (r_{10}) проводников, толщина изоляции вокруг опорного (h_0) и активного (h_1), а также угол расположения активного относительно начала координат (φ_A). Толщина изоляции вокруг пассивных проводников (h_2 и h_3) в процессе оптимизации изменялись в соответствии с r_{12} и r_{13} . Так, если значение r_{1i} находится в диапазоне 0,5–0,55 мм, то $h_i=0,6$ мм, для 0,55–1 мм – 0,7 мм, для 1–1,6 мм – 0,8 мм и для 1,6–1,8 мм – 1 мм. Радиус внешнего диэлектрика (r_3) изменялся в соответствии с размерами проводников во избежание их

наложения при построении. Оптимизируемые и фиксированные параметры показаны на примере 3-проводного МФ на рис. 1 [13]. Для всех МФ опорный проводник располагался в центре, а параметры активного проводника приняты: $\varphi=95^\circ$, $r_{11}=1,4$ мм (при $h_1=0,8$ мм). Для 3-проводных МФ $r_{10}=0,5$ мм (при $h_0=0,6$ мм), для 2-проводного – $r_{10}=1,4$ мм (при $h_0=0,8$ мм), а для экранированного 2-проводного МФ – $r_{10}=1,8$ мм (при $h_0=1$ мм). Поперечные сечения исследуемых МФ представлены на рис. 2а, их эквивалентные схемы – на рис. 3. В экранированных структурах экран моделировался как проводник, расположенный поверх структуры и закороченный на землю, как показано на рис. 3б, г. Длина всех МФ принята $l=1$ м, сопротивления на концах проводников $R_\Gamma=R_H=R=50$ Ом. Параметры воздействующего СКИ: ЭДС 5 В, длительности фронта, плоской вершины и импульса по 50 пс, а общая – 150 пс.

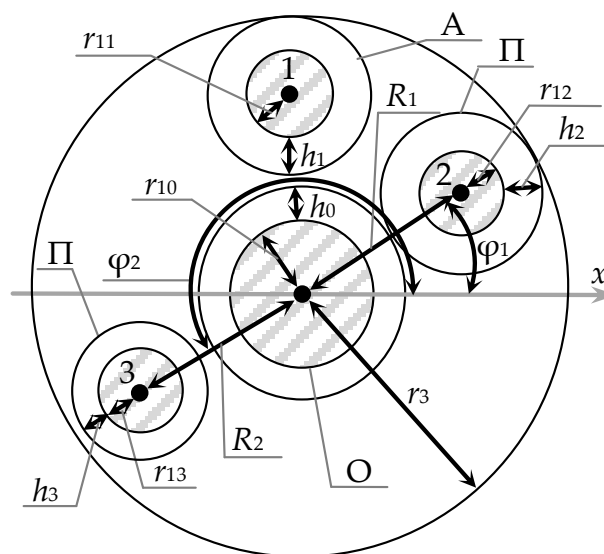


Рис. 1. Оптимизируемые и фиксированные геометрические параметры МФ

Результаты оптимизации посредством ЭС частично корректировались посредством эвристического поиска для учета технологических допусков материалов при изготовлении. Помимо прочего, для всех МФ r_3 – 1 мм для соответствия внутреннему диаметру тефлоновой трубки (используемой при разработке прототипа МФ для стабилизации его формы). Поскольку алгоритм выдает результаты в допустимом диапазоне с высокой точностью (до 15 знаков после запятой), полученные значения округлялись, например, $R_1=4,517989272896422$ мм и $\varphi=274,8931077125756$ до $R_1=4,5$ мм и $\varphi=275^\circ$.

В результате оптимизации получены следующие значения параметров: для 2-проводного МФ без экрана $r_{12}=1,4$ мм, $R_1=4,5$ мм, $\varphi=275^\circ$; для 2-проводного МФ с экраном $r_{12}=1,8$ мм, $R_1=5,9$ мм, $\varphi=275^\circ$; для 3-проводного МФ без экрана $r_{12}=1,1$ мм, $R_1=4,9$ мм, $\varphi_1=5^\circ$, $r_{13}=1,8$ мм, $R_2=3,94$ мм, $\varphi_2=285^\circ$; для 3-проводного МФ с экраном: $r_{12}=0,5$ мм, $R_1=3,34$ мм, $\varphi_1=352^\circ$, $r_{13}=1,8$ мм, $R_2=4$ мм, $\varphi_2=259^\circ$. Полученные формы напряжений на входе и выходе всех МФ представлены на рис. 4. В таблице 1 сведены напряжение на входе ($U_{вх}$), максимальное напряжение на выходе (U_{max}) и разности погонных задержек мод ($\Delta\tau_i$) исследуемых МФ.

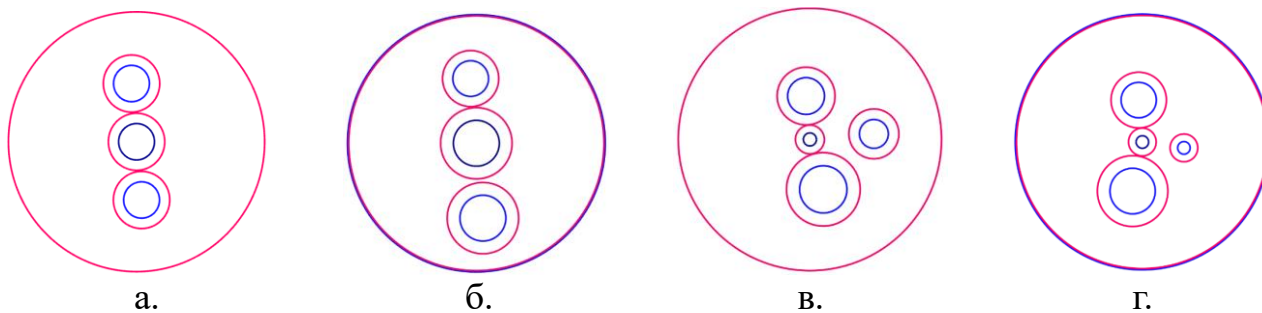


Рис. 2. Поперечные сечения рассматриваемых МФ в общем виде

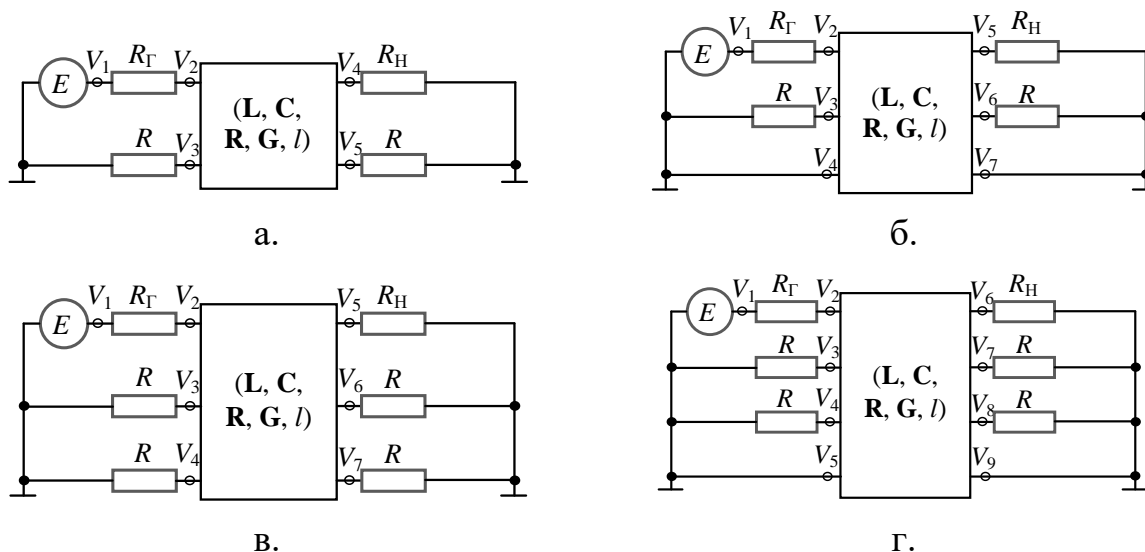


Рис. 3. Эквивалентные схемы 2-проводного МФ с экраном (б) и без (а), а также 3-проводного МФ с экраном (г) и без (в)

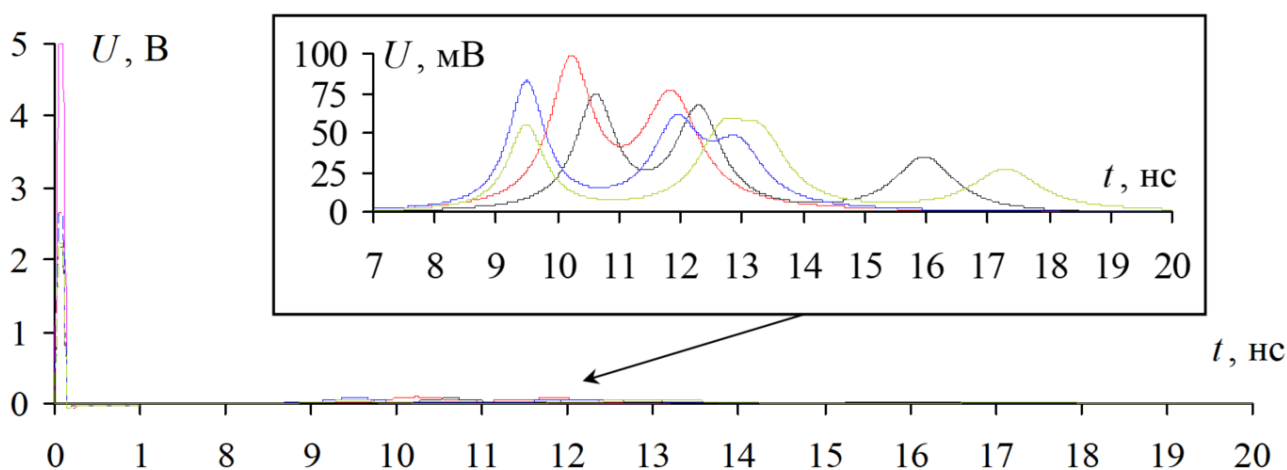


Рис. 4. Формы ЭДС (---) и напряжений на входе (---) и выходе (—): 2-проводного МФ с экраном (—) и без (—), а также 3-проводного МФ с экраном (—) и без (—)

Таблица 1 – Выходные параметры исследуемых МФ

МФ	$U_{вх}, В$	$U_{max}, мВ$	$\Delta t_1, нс/м$	$\Delta t_2, нс/м$	$\Delta t_3, нс/м$
2-проводный без экрана	2,66	99,2	1,63	–	–
2-проводный с экраном	2,21	74,6	1,67	3,67	–
3-проводный без экрана	2,64	82,8	0,99	2,45	–
3-проводный с экраном	2,25	59,5	3,19	0,64	3,97

Как видно из таблицы 1, в результате оптимизации наименьший уровень (59,5 мВ) U_{max} получен для экранированного 3-проводного МФ, однако согласование с трактом 50 Ом лучше для 3-проводного МФ без экрана. При этом, U_{max} для 2-проводного МФ является самым высоким (99,2 мВ, отличаясь на 21,56% от наименьшего), однако согласование с трактом 50 Ом близко к наилучшему результату 3-проводного МФ (отличаясь лишь на 0,38%). Наихудшее согласование у экранированного 2-проводного МФ, однако U_{max} ближе всего к лучшему результату (экранированный 3-проводный МФ) с отличием в 11,26%. Минимальные значения Δt получены для 3-проводных МФ с экраном и без и составили 0,64 нс/м (между 2 и 3 импульсами) и 0,99 нс/м (между 1 и 2 импульсами), соответственно. Помимо прочего, асимметричное расположение проводников в 3-проводных МФ, а также наличие внешнего экрана, дополнительно усложняют изготовление таких МФ. Между тем можно предположить, что демонстрация эффективной защиты посредством 2-проводного МФ (который проще всего реализовать) может означать достижимость того же для 3-проводных МФ (по аналогии с ростом числа сигнальных проводников полосковых МФ [16]). Исходя из этого, для прототипирования выбран 2-проводный МФ без экрана (рис. 2а).

2 Разработка прототипа модального фильтра на основе круглой кабельной структуры

Для прототипа использованы: трубка фторопластовая с внутренним диаметром 2 см и толщиной стенки 2 мм (рис. 5а); провод марки ПВ-1 радиусом сечения 2,2 мм (рис. 5б); лист фторопласта 4х300х300 мм; радиопоглощающий материал (РПМ) ЗИПСИЛ 410 РПМ-Л с отвердителем (рис. 5в, г). Начальная длина МФ $l=100$ мм, что достаточно для проверки ослабления воздействующего СКИ, поскольку существенное влияние потерь затруднит демонстрацию полного разложения в явном виде даже при $l=1$ м.

С использованием станка с числовым программным управлением (ЧПУ) из листа фторопласта изготовлены круглые пластины с отверстиями (рис. 6а), которые служат для фиксации проводов в общей конструкции кабеля по всей длине. Для МФ длиной 100 мм использовано 6 пластин (толщиной 4 мм каждая), располагаемых через 18 мм (± 1 мм) (рис. 6б). Далее, как показано на рис. 7а, в, конструкция помещена внутрь фторопластовой трубки через специальное отверстие (шириной 1,5 мм в статичном состоянии), также выполненное при помощи станка с ЧПУ и позволяющего, помимо прочего, заполнить каж-

дую секцию прототипа МФ требуемым изоляционным материалом (в данном случае, РПМ). С учетом этого, итоговая длина МФ составила 113 мм.

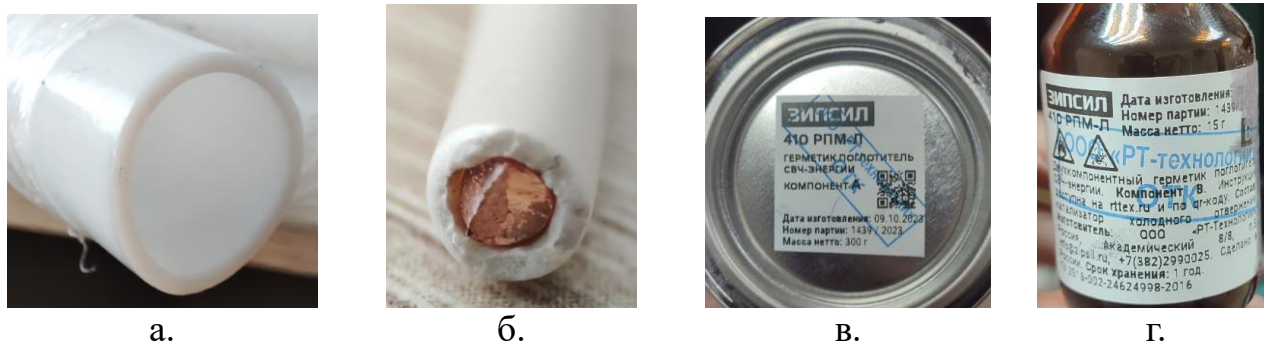


Рис. 5. Трубка фторопластовая (а), провод ПВ-1 (б) и РПМ (в, г)

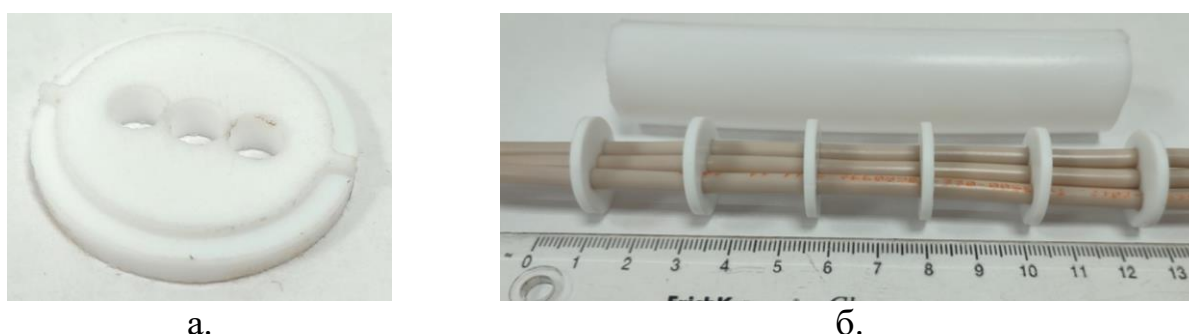


Рис. 6. Фторопластовая пластина для крепления проводов (а) и закрепленные провода (б)

Для заполнения прототипа, РПМ весом 150 г разведен с 2 г отвердителя. Далее РПМ заливался внутрь конструкции МФ (при помощи шприца) через продольное отверстие. Заполненный прототип оставлен на сутки до застывания РПМ, после чего он очищен от лишнего РПМ, оставшегося на поверхности в процессе заполнения. Прототип МФ с застывшим РПМ показан на рис. 7б.

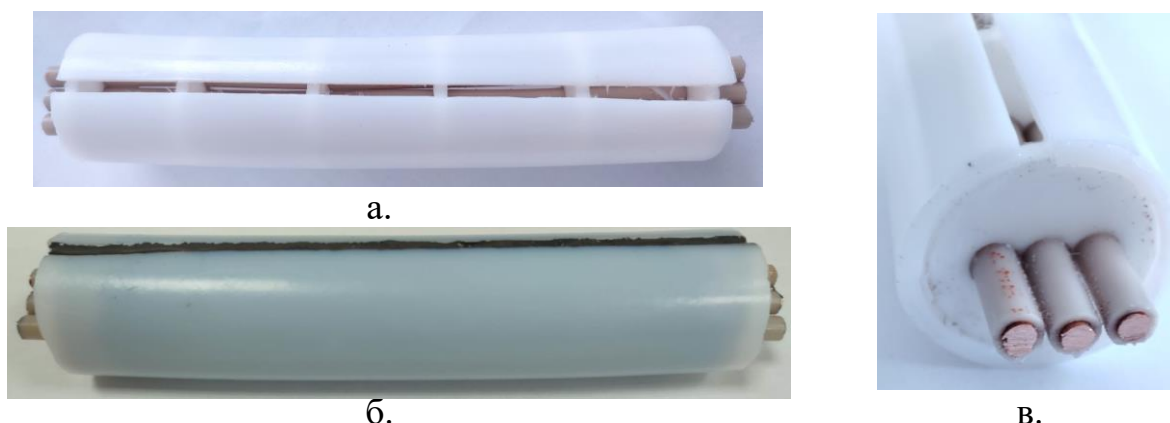


Рис. 7. Внешний вид прототипа МФ без РПМ и с ним

3. Электродинамический анализ и измерения

Для измерения прототипа необходимо его соединение с SMA-соединителями. Для этого изготовлены печатные платы, соединяемые с МФ на концах (рис. 8а). Как отмечалось ранее, в МФ центральный проводник принят опорным. Разработаны печатные платы для соединения с SMA-соединителями в тракте 50 Ом. Так, на концах активного проводника печатных плат установлены SMA-соединители для соединения МФ с измерительным трактом. Готовая плата (с металлизированным слоем на обратной стороне) с SMA-соединителем на одной стороне МФ показана на рис. 8б. Общий вид модели кабеля с двумя платами показан на рис. 9а, а изготовленного прототипа – на рис. 9б.

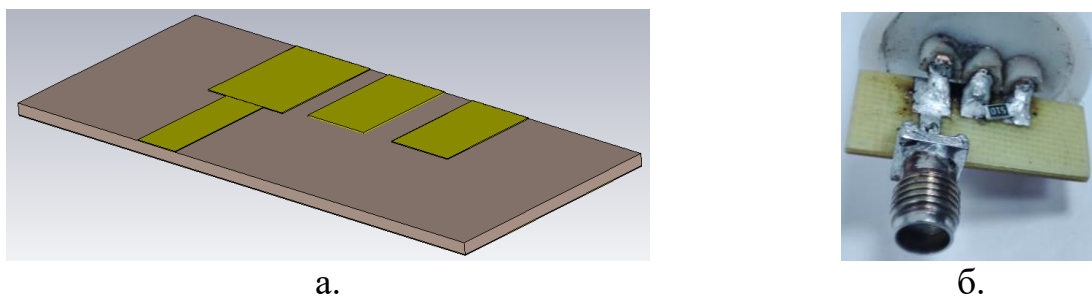


Рис. 8. 3D модель печатной платы (а) и готовая плата с SMA-соединителем (б)

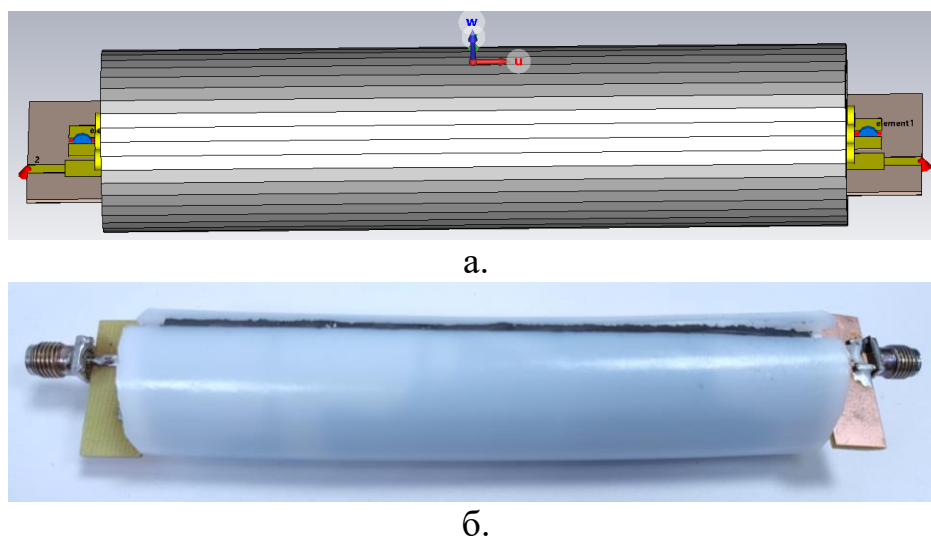


Рис. 9. Геометрическая модель МФ с печатной платой (а) и общий вид прототипа МФ (б)

Измерение частотных зависимостей коэффициента передачи $|S_{21}|$ МФ осуществлялось с помощью векторного анализатора электрических цепей «Панорама» P4226 (рис. 10). Перед измерениями, для устранения систематической погрешности и влияния кабельных сборок, выполнена двухпортовая SOLT-калибровка в частотном диапазоне от 10 МГц до 20 ГГц. Измерения и моделирование МФ с печатными платами выполнялось в тракте 50 Ом.

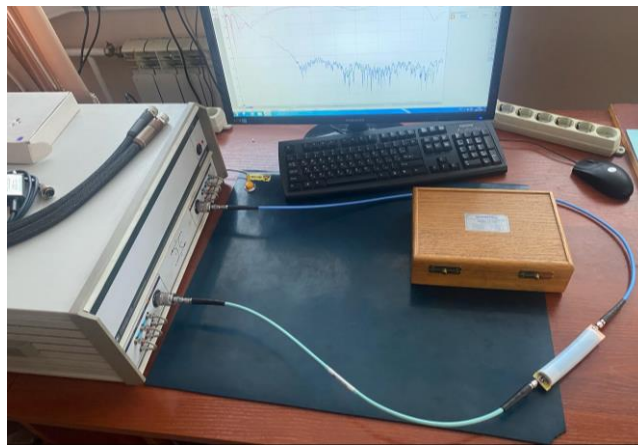


Рис. 10. Измерение частотных характеристик МФ с помощью «Панорама» P4226

Второй вариант монтаж SMA-соединителей на концах одного из сигнальных проводников для соединения МФ с трактом без печатных плат. При этом в МФ центральный проводник также принят опорным. Общий вид модели кабеля без печатных плат показан на рис. 11а, а его прототип – на рис. 11б. На рис. 12 также представлены увеличенные фрагменты модели и прототипа МФ, где проводники А – активный, П – пассивный и О – опорный. Измерение частотных зависимостей $|S_{21}|$ МФ осуществлялось также. Процесс измерения частотных зависимостей $|S_{21}|$ прототипа МФ без печатных плат показан на рис. 13.

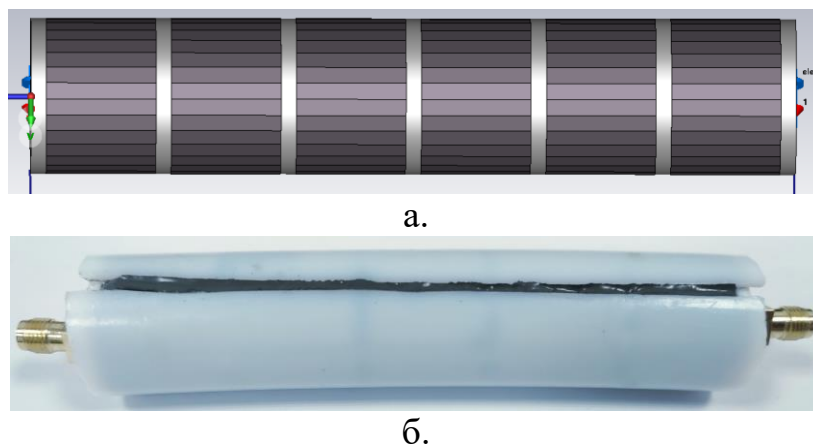


Рис. 11. Модель МФ (а) и общий вид прототипа МФ (б) без печатных плат

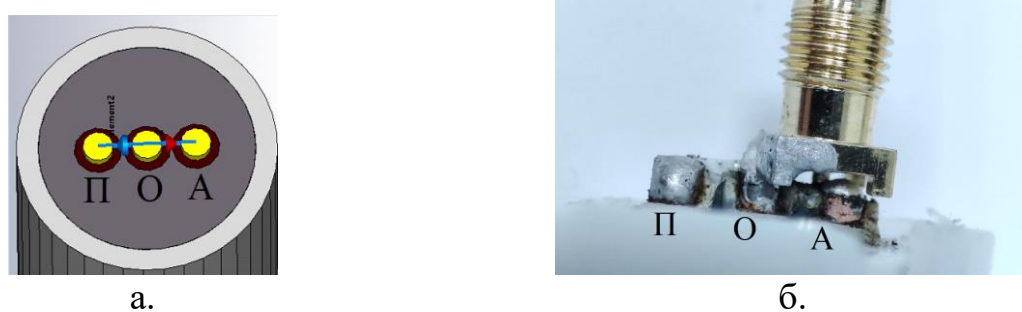


Рис. 12. Увеличенные модель (а) и прототип (б) МФ без печатных плат

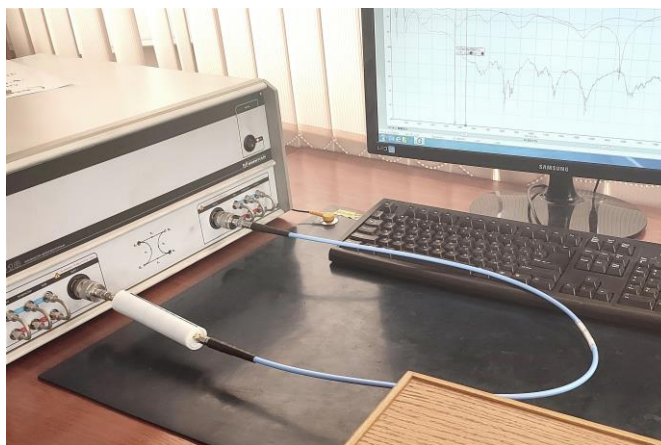


Рис. 13. Измерение частотных характеристик МФ без печатных плат с помощью «Панорама» P4226

4. Результаты моделирования и измерения

4.1. Исследование с переходными печатными платами

На рис. 14 показаны частотные зависимости прототипа МФ с печатными платами, измеренные с помощью «Панорама» P4226. На рис. 15 сведены зависимости $|S_{21}|$ до частоты 20 ГГц исследуемого МФ, полученные посредством моделирования МФ с печатными платами в системах квазистатического и электродинамического анализа, а также измерения.

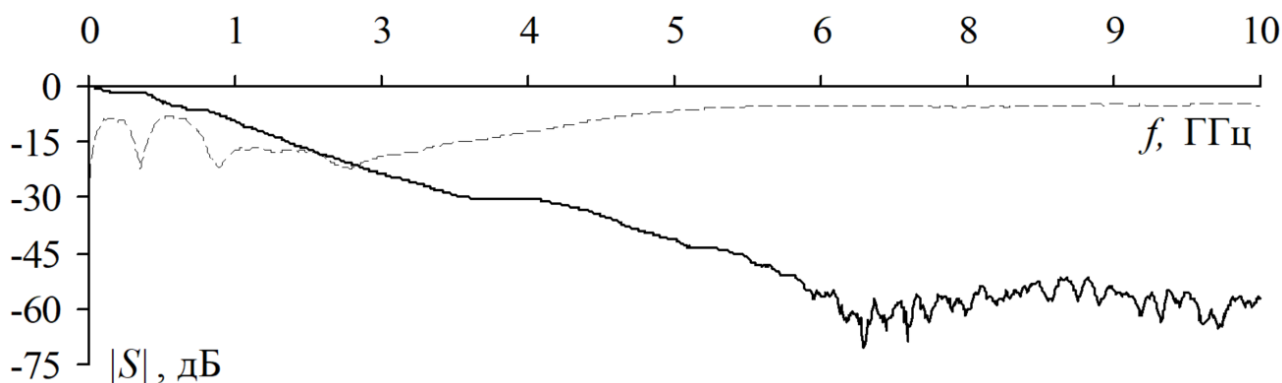


Рис. 14. Измеренные частотные зависимости $|S_{11}|$ (- -) и $|S_{21}|$ (—) МФ с печатными платами

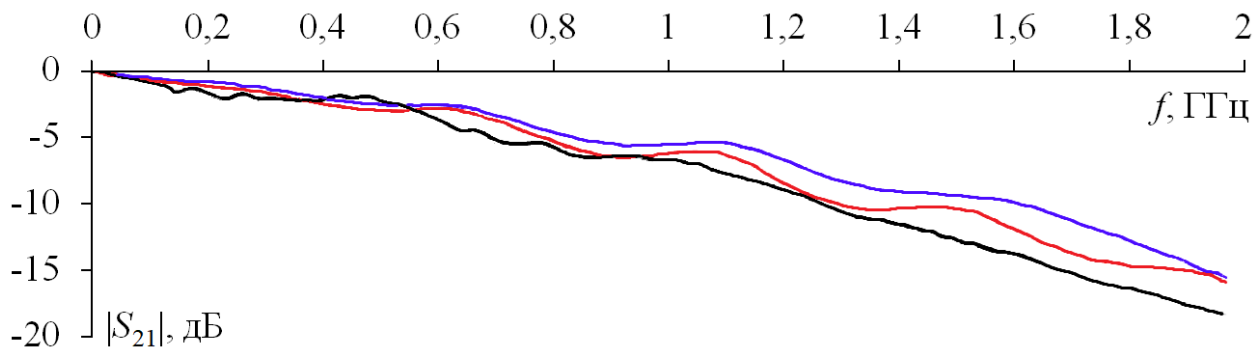


Рис. 15. Частотные зависимости $|S_{21}|$ исследуемого МФ, полученные в системах квазистатического (—) и электродинамического анализа (—), а также при измерениях (—)

Из рис. 14 следует, что по измерениям до 1 ГГц $|S_{11}| < -8$ дБ, а во всем диапазоне (до 10 ГГц) – $|S_{11}| < -5$ дБ. Рис. 15 демонстрирует схожий характер зависимостей $|S_{21}|$ МФ до 2 ГГц для всех видов анализа. Полоса пропускания МФ (по уровню минус 3 дБ) составила 680 МГц при квазистатическом моделировании, 700 МГц при электродинамическом и 580 МГц при измерении. Максимальное отклонение 2,3 дБ для двух видов анализа наблюдается на частоте 1,8 ГГц, 2,7 дБ для измерений и квазистатического анализа на частоте 2 ГГц и 4 дБ для измерений и электродинамического анализа на частоте 1,6 ГГц.

Печатная плата из рис. 8 моделировалась в системе квазистатического анализа двумя отрезками линии передачи (2-проводным отрезком П1 и 1-проводным – П2) по 5 мм. Схема соединения прототипа МФ на основе кабельной структуры (К) с печатными платами (П1 и П2) представлена на рис. 16. На рис. 17 сведены результаты измерения и моделирования в системах электродинамического и квазистатического анализа. Поскольку заявленная диэлектрическая проницаемость РПМ составляла 20, предварительное моделирование выполнялось именно с этим значением. Однако после сравнения с измеренной задержкой выявлено, что значение ϵ_r меньше заявленного и составляет 17 (приведено на рис. 17). При моделировании во временной области, в качестве воздействия использовался Гауссов импульс с амплитудой ЭДС 1 В, длительностями фронта и спада – 58 пс и плоской вершины – 31 пс (по уровням 0,1–0,9), а общей длительностью (по уровню 0,5) – 80,5 пс. Длина МФ 113 мм, а сопротивления на концах проводников 50 Ом.

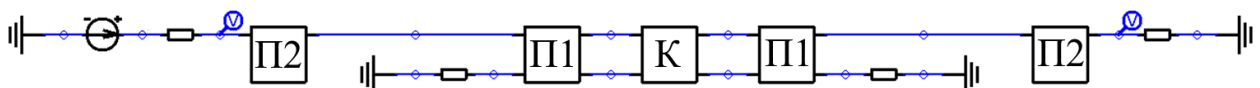


Рис. 16. Схема соединения МФ с печатными платами в системе квазистатического анализа

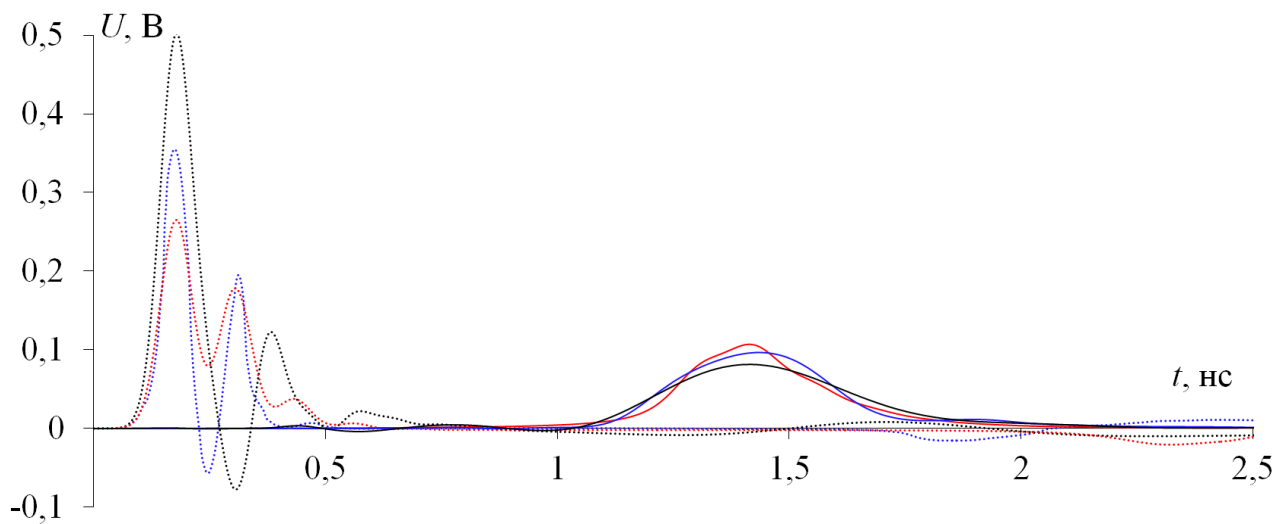


Рис. 17. Формы напряжения на входе/выходе МФ, полученные в системе квазистатического ($\cdots / \text{—}$) и электродинамического анализа ($\cdots / \text{—}$), а также при измерениях ($\cdots / \text{—}$)

Из рис. 17 видно, что формы напряжений на выходе МФ, полученные посредством моделирования и измерений, сопоставимы друг с другом (по амплитудам и по задержкам). Так, уровень максимального напряжения на выходе МФ составил 0,107 В в системе квазистатического и 0,096 В в системе электродинамического анализа, а также 0,081 В при измерении. При этом в начале МФ наблюдаются импульсы, вызванные отражениями от неоднородностей (печатные платы-SMA-соединители), схожей формы и близкие по задержкам, но разной амплитуды. В результате, разработанный МФ способен ослабить воздействующую помеху общей длительностью 80,5 пс (по уровню 0,5) в 4,67 раза по результатам моделирования в системе квазистатического анализа и в 5,2 раза в системе электродинамического анализа, а также в 6,17 раза по измерениям. Причиной различий служат погрешности компьютерного моделирования и различие частотных зависимостей электрофизических характеристик используемых диэлектрических материалов.

4.2. Исследование без переходных печатных плат

На рис. 18 показаны частотные зависимости прототипа МФ без печатных плат в диапазоне от 0 до 10 ГГц, измеренные прибором «Панорама» P4226, а на рис. 19 – полученные в системах квазистатического и электродинамического анализа, а также измерением до 2 ГГц.

Из рис. 18 следует, что по измерениям до 10 ГГц $|S_{11}| < -7,5$ дБ. Как видно из рис. 19, характер зависимостей $|S_{21}|$ до 2 ГГц схож для всех видов анализа, однако имеются незначительные отличия с 1,2 ГГц. Максимальное отклонение $|S_{21}|$ 12 дБ для двух видов анализа наблюдается на частоте 2 ГГц, 6,4 дБ для измерений и квазистатического анализа на частоте 2 ГГц и 5,6 дБ для измерений и электродинамического анализа на частоте 2 ГГц. Полоса пропускания МФ составила 581 МГц при моделировании в системе квазистатического анализа и

572 МГц в системе электродинамического анализа, а также 585 МГц при измерении. Заметно, что до 0,1 ГГц зависимость $|S_{21}|$ по электродинамическому анализу, осциллирует (от 0 до 60 МГц). Это связано с особенностями моделирования МФ (настройка сетки, учет параметров РПМ и др.). Схема соединения прототипа МФ на основе кабельной структуры (К) в системе квазистатического анализа представлена на рис. 20. Полученные формы напряжения, при воздействии и параметрах МФ из подраздела 4.1, сведены на рис. 21.

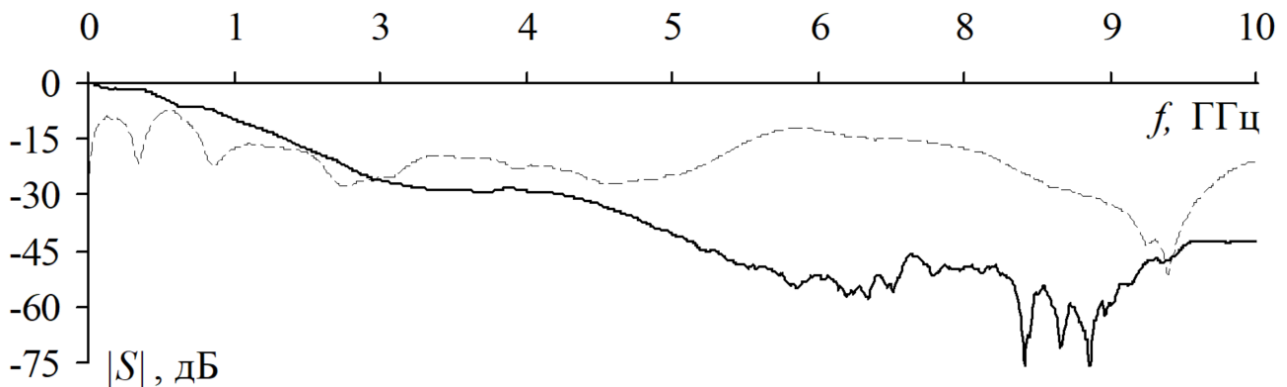


Рис. 18. Частотные зависимости $|S_{11}|$ (- -) и $|S_{21}|$ (—) МФ без печатных плат

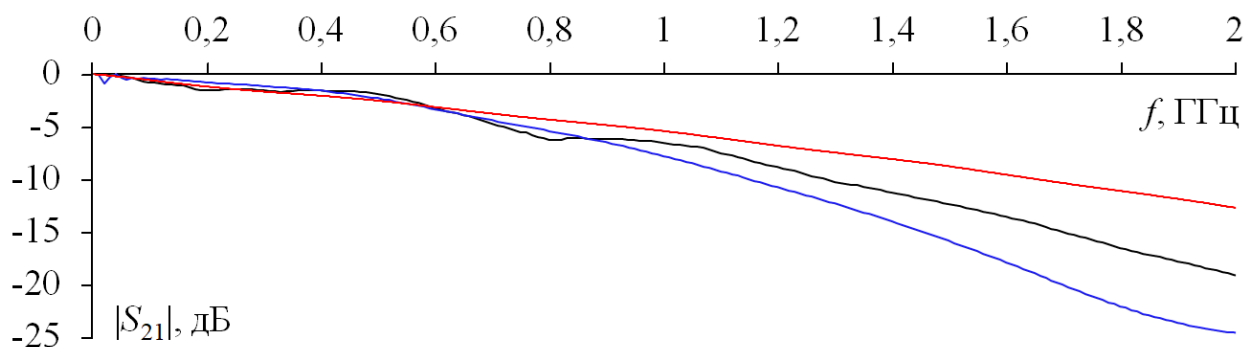


Рис. 19. Частотные зависимости $|S_{21}|$ исследуемого МФ без печатных плат, полученные в системе квазистатического (—) и электродинамического (—) анализа, а также при измерениях (—)

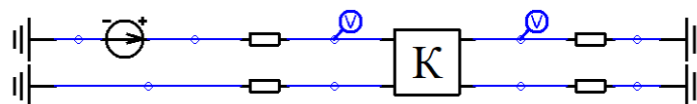


Рис. 20. Схема соединения МФ без печатных плат в системе квазистатического анализа

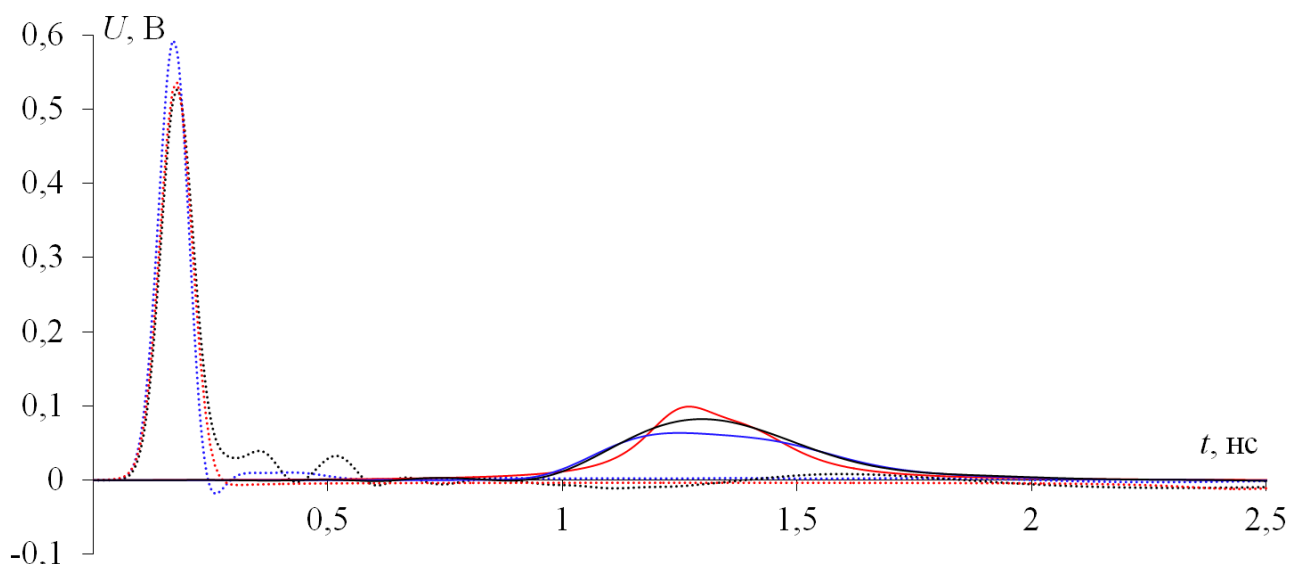


Рис. 21. Формы напряжения на входе/выходе исследуемого МФ, полученные в системе квазистатического ($\cdots / \text{—}$) и электродинамического ($\cdots / \text{—}$) анализа, а также при измерениях ($\cdots / \text{—}$)

Из рис. 21 видно, что формы напряжения на выходе МФ, полученные посредством моделирования и измерений, сопоставимы друг с другом (как по амплитудам, так и по задержкам). Так, уровень максимального напряжения на выходе МФ составил 0,099 В в системе квазистатического и 0,064 В в системе электродинамического анализа, а также 0,082 В при измерении. Также видно значительное уменьшение отражений от неоднородностей (в отличие от МФ с печатными платами) в начале МФ (рис. 17). В результате, разработанный МФ способен ослабить воздействующую помеху общей длительностью 80,5 пс (по уровню 0,5) в 5,05 раза по результатам моделирования в системе квазистатического анализа и в 7,8 раза для системы электродинамического анализа, а также в 6,1 раза в результате измерения. Природа различий обусловлена причинами, описанными в подразделе 4.1.

Выводы

В работе показано создание прототипа МФ на основе 3-проводной кабельной структуры из доступных материалов: фторопластовая трубка, лист фторопласта, провода ПВ-1, РПМ. Детализирована общая методика прототипирования и измерения МФ на основе круглой кабельной структуры. С помощью векторного анализатора цепей «Панорама» Р4226 измерены частотные характеристики прототипа МФ в двух вариантах (с использованием соединительных печатных плат и без них), на основе которых получены отклики во временной области. Сравнены результаты измерений с результатами моделирования МФ в системах квазистатического и электродинамического анализа.

Из частотных характеристик видно, что МФ обладает свойствами фильтра нижних частот. При использовании переходных печатных плат, характер зависимостей $|S_{21}|$ МФ в полосе частот до 2 ГГц схож для всех видов анализа.

Полоса пропускания МФ находится в пределах 580–700 МГц для измерения и двух видов анализа. В этом случае, разработанный МФ способен ослабить воздействующую помеху общей длительностью 80,5 пс (по уровню 0,5) в 6,17 раз по результатам измерения. Однако при этом в начале временного отклика МФ наблюдаются отражения, вызванные неоднородностями. В то же время, для МФ без переходных печатных плат уровень отражений значительно снижается. Характер зависимостей $|S_{21}|$ данного МФ в полосе частот до 2 ГГц также схож для всех видов анализа при незначительных отличиях с 1,2 ГГц. Полоса пропускания МФ находится в пределах 572–585 МГц для результатов вычислительных экспериментов и измерения. При этом МФ способен ослабить ту же воздействующую помеху в 6,1 раз по результатам измерения. При этом до 1 ГГц, по измерениям $|S_{11}| < -7,5$ дБ для обоих вариантов исполнения МФ.

Различия в результатах обусловлены погрешностями компьютерного моделирования в системах электродинамического и квазистатического анализа, отличием частотных зависимостей электрофизических характеристик используемых диэлектрических материалов от реальных, а также непостоянной плотностью РПМ (поскольку ручное смешивание жидкого компонента и отвердителя не гарантирует их равномерного распределения). Также видно, что, несмотря на удобство измерений МФ с печатными платами, их наличие оказывает влияние на полученный результат. Так, в начале вычисленного временного отклика МФ с печатными платами наблюдаются импульсы, вызванные отражениями от неоднородностей (печатные платы-SMA-соединители), схожей формы и близкие по задержкам, но разной амплитуды. Кроме этого, существует различие в значениях полосы пропускания МФ с платами и без них: 7,85% при квазистатическом и 10,06% при электродинамическом анализе, а также 0,43% при измерениях. Также имеется различие в амплитудах выходных напряжений МФ: 3,88% при квазистатическом и 20% при электродинамическом анализе, а также 0,61% при измерениях.

Таким образом, предложенная общая методика прототипирования и измерения МФ на основе круглой кабельной структуры расширяет инструментарий разработчиков и инженеров, позволяя создавать различные модификации защитных устройств (как на основе круговых в сечении, так и абсолютно новых). Наконец, итоговые габариты МФ, при необходимости, могут быть пропорционально уменьшены с сохранением защитных характеристик. Данная задача видится перспективной для проработки и планируется к выполнению в дальнейшем для замены типовых проводных соединений беспилотного летательного аппарата Darwin 129 на защитные кабельные МФ.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского Научного Фонда № 24-29-00578.

Литература

1. Гизатуллин З. М. Помехоустойчивость средств вычислительной техники внутри зданий при широкополосных электромагнитных воздействиях.

Монография. – Казань: Издательство Казанского государственного технического университета, 2012. – 254 с.

2. Hamamah F., Ahmad W. W., Gomes C., Isa M. M., Homam M. Concerns on the Risk of Malaysian Civil and Defense Systems Due to Intentional Electromagnetic Interference // 2019 IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics (APACE). 2019. P. 1–6. doi: 10.1109/APACE47377.2019.9021096.

3. Alnamir H. Study of Low Frequency Electromagnetic Interference Problems in Hospital Environment // 2019 11th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE). 2019. P. 1–5. doi: 10.1109/ATEE.2019.8724736.

4. Fei Y., Haoquan H., Ruiming L., Lutong L., Zhipeng L. New electromagnetic protection devices based on filtering // IEEE 5th International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC-Beijing). 2017. P. 1–3. doi: 10.1109/EMC-B.2017.8260382.

5. Gao G., Huang Y., Zeng S., Li K., Zhang Y., Zhu J. Transparent and hard TiO₂/Au electromagnetic shielding antireflection coatings on aircraft canopy PMMA organic glass // Applied Surface Science. 2024. Vol. 658. doi: 10.1016/j.apsusc.2024.159830.

6. M'ziou N. Electromagnetic compatibility problems of indirect lightning stroke on Overhead Power Lines // Mathematics and Computers in Simulation. 2020. Vol. 167. P. 429–442. doi: 10.1016/j.matcom.2018.04.007.

7. Mora N., Vega F., Lugin G., Rachidi F., Rubinstein M. Study and classification of potential IEMI sources // System and assessment notes. Note 41. 8 July 2014. P. 1–48.

8. Zhang J., Ning C., Heng J., Yu S., Zhang Z. Ultra-Short Pulse Generation From Optical Parametric Oscillators With a Cavity-Length Detuning // IEEE Photonics Technology Letters. 2022. Vol. 34. № 5. P. 263–266. doi: 10.1109/LPT.2022.3149528.

9. Gaynutdinov R. and Chermoshentsev S. Studies of Electromagnetic Disturbances in Coupling Path by Application of Intentional Ultrashort Electromagnetic Pulses // 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS). 2019. P. 1–4. doi: 10.1109/ICOECS46375.2019.8949973.

10. Wu Y., Xu X., Jiang T. Research on Matrix Description of Electromagnetic Interference between Cables // 2021 IEEE 9th International Conference on Computer Science and Network Technology (ICCSNT). 2021. P. 82–84. doi: 10.1109/ICCSNT53786.2021.9615463.

11. Gazizov A. T., Zabolotsky A. M., Gazizov T. R. UWB Pulse Decomposition in Simple Printed Structures // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2016. Vol. 58. № 4. P. 1136–1142. doi: 10.1109/TEMC.2016.2548783.

12. Belousov A. O. and Vlasova N. O. Parametric optimization of the cables with the modal filtration effect // Journal of Physics: conference Series. 2021. Vol. 1862. № 1. P. 1–6. doi: 10.1088/1742-6596/1862/1/012004.

13. Belousov A. O., Vlasova N. O., Gordeyeva V. O. and Gazizov T. R. Breaking the Symmetry of Cable Structures as an Instrument for Improving Modal

Decomposition to Protect Critical Equipment Against UWB Pulses // Symmetry. 2022. Vol. 14 (6). № 1228. P. 1–34. doi: 10.3390/sym14061228.

14. Vlasova N. O. and Belousov A. O. Optimization of protective cables in the range of real geometric parameters // Journal of Physics: conference Series. 2022. Vol. 2291. № 1. P. 1–6. doi: 10.1088/1742-6596/2291/1/012012.

15. Куксенко С. П., Газизов Т. Р., Квасников А. А., Демаков А. В., Иванов А. А., Ключкин Д. В., Алхадж Хасан А., Максимов А. Е., Осинцев А. В. Разработка программного обеспечения для моделирования радиоэлектронных средств с учетом электромагнитной совместимости в ТУСУР // Наноиндустрия. 2023. Т. 16. № S9–1(119). С. 170–178.

16. Belousov A. O. and Gazizov T. R. Systematic approach to optimization for protection against intentional ultrashort pulses based on multiconductor modal filters // Complexity. 2018. Vol. 2018. P. 1–15. doi: 10.1155/2018/5676504.

References

1. Gizatullin Z. M. *Pomekhoustojchivost' sredstv vychislitel'noj tekhniki vnutri zdaniy pri shirokopolosnyh elektromagnitnyh vozdeystviyah. Monografija* [The Immunity of Computer Equipment inside Buildings with Broadband Electromagnetic Effects. Monography]. Kazan, Kazan State Technical University Publ., 2012. 254 p. (In Russian).

2. Hamamah F., Ahmad W. W., Gomes C., Isa M. M., Homam M. Concerns on the Risk of Malaysian Civil and Defense Systems Due to Intentional Electromagnetic Interference. *IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics (APACE)*, Melacca, Malaysia, 2019, pp. 1–6. doi: 10.1109/APACE47377.2019.9021096.

3. Alnamir H. Study of Low Frequency Electromagnetic Interference Problems in Hospital Environment. *11th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, Bucharest, Romania, 2019, pp. 1–5. doi: 10.1109/ATEE.2019.8724736.

4. Fei Y., Haoquan H., Ruiming L., Lutong L., Zhipeng L. New electromagnetic protection devices based on filtering. *IEEE 5th International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC-Beijing)*, Beijing, China, 2017, pp. 1–3. doi: 10.1109/EMC-B.2017.8260382.

5. Gao G., Huang Y., Zeng S., Li K., Zhang Y., Zhu J. Transparent and hard TiO₂/Au electromagnetic shielding antireflection coatings on aircraft canopy PMMA organic glass. *Applied Surface Science*, 2024, vol. 658, doi: 10.1016/j.apsusc.2024.159830.

6. M'ziou N. Electromagnetic compatibility problems of indirect lightning stroke on Overhead Power Lines. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2020, vol. 167, pp. 429–442. doi: 10.1016/j.matcom.2018.04.007.

7. Mora N., Vega F., Lugin G., Rachidi F., Rubinstein M. Study and Classification of Potential IEMI Sources. *System and Assessment Notes, Note 41*, 2014, pp. 1–48.

8. Zhang J., Ning C., Heng J., Yu S., Zhang Z. Ultra-Short Pulse Generation From Optical Parametric Oscillators With a Cavity-Length Detuning. *IEEE*

Photonics Technology Letters, 2022, vol. 34, no. 5, pp. 263–266. doi: 10.1109/LPT.2022.3149528.

9. Gaynutdinov R., Chermoshentsev S. Studies of Electromagnetic Disturbances in Coupling Path by Application of Intentional Ultrashort Electromagnetic Pulses. *IEEE International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS)*, Ufa, Russia, 2019, pp. 1–4. doi: 10.1109/ICOECS46375.2019.8949973.

10. Wu Y., Xu X., Jiang T. Research on Matrix Description of Electromagnetic Interference Between Cables. *IEEE 9th International Conference on Computer Science and Network Technology (ICCSNT)*, Dalian, China, 2021, pp. 82–84. doi: 10.1109/ICCSNT53786.2021.9615463.

11. 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, pp. 1136–1142. doi: 10.1109/TEMC.2016.2548783.

12. Belousov A. O., Vlasova N. O. Parametric optimization of the cables with the modal filtration effect. *Journal of Physics: conference Series*, 2021, vol. 1862, no. 1, pp. 1–6. doi: 10.1088/1742-6596/1862/1/012004.

13. Belousov A. O., Vlasova N. O., Gordeyeva V. O., Gazizov T. R. Breaking the Symmetry of Cable Structures as an Instrument for Improving Modal Decomposition to Protect Critical Equipment Against UWB Pulses. *Symmetry*, 2022, vol. 14 (6), no. 1228, pp. 1–34. doi: 10.3390/sym14061228.

14. Vlasova N. O., Belousov A. O. Optimization of protective cables in the range of real geometric parameters. *Journal of Physics: conference Series*, 2022, vol. 2291, no. 1, pp. 1–6. doi: 10.1088/1742-6596/2291/1/012012.

15. Kuksenko S. P., Gazizov T. R., Kvasnikov A. A., Demakov A. V., Ivanov A. A., Klyukin D. V., Alhadge Hasan A., Maksimov A. E., Osintsev A. V. Razrabotka programmnoy obespecheniya dlya modelirovaniya radioelektronnykh sredstv s uchetom elektromagnitnoy sovmestimosti v TUSUR [Developing Software for Modelling Radioelectronic Equipment with Respect to Electromagnetic Compatibility in TUSUR]. *Nanoidustria*, 2023, vol. 16, no. 119, pp. 170–178.

16. Belousov A. O., Gazizov T. R. Systematic approach to optimization for protection against intentional ultrashort pulses based on multiconductor modal filters. *Complexity*, 2018, vol. 2018, pp. 1–15. doi: 10.1155/2018/5676504.

Статья поступила 11 июня 2024 г.

Информация об авторах

Гордеева Виктория Олеговна – аспирант кафедры телевидения и управления, младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Безопасность и электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств». Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: электромагнитная совместимость, защита от

электромагнитных помех, методы оптимизации, эволюционные алгоритмы.
E-mail: vikki.gern@gmail.com

Белоусов Антон Олегович – кандидат технических наук, доцент и докторант кафедры телевидения и управления, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Безопасность и электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств». Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Научный сотрудник центра экспертизы и испытаний. Сахалинский государственный университет. Область научных интересов: электромагнитная совместимость, проектирование защитных устройств на основе модальной фильтрации, оптимизация защитных устройств.
E-mail: ant1lafleur@gmail.com

Адрес: 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 40.

Experimental study of a modal filter based on a round cable structure

V. O. Gordeyeva, A. O. Belousov

Problem formulation. Attention to the electromagnetic environment of modern radio-electronic equipment (REE) in the scientific community is growing every year. This is primarily due to their increasing susceptibility to electromagnetic interference (EMI). The reasons for this are the increase in the performance of REE (increase in the upper spectra frequency of the signals used), the density of their installation and routing, the decrease in operating currents and signal voltages, etc. EMI can have a negative impact on the operation of REE and even lead to their destruction and destabilization. This emphasizes the importance and significance of research in the field of ensuring electromagnetic compatibility (EMC) of critical REE. Of particular interest are ultra-wideband interference, one of the varieties of which is high-power ultrashort pulses (USPs), characterized by a fast rise time and large amplitude. To protect REE from USPs, devices based on modal filtering technology are used. They are called modal filters (MFs) and are traditionally implemented as stripline structures, either as separate devices or in existing printed circuit board interconnects. However, recent research in this area also suggests the effectiveness of MFs based on cable structures. Thus, it is of interest to implement a prototype MF based on a cable structure, as well as compare the measurement results with the results of a computational experiment. Meanwhile, the main stages of developing MF prototypes based on strip structures have long been worked out, while prototyping cable structures requires attention and elaboration. **The purpose of the work** is to develop and verify a prototype MF based on a circular cable structure. **Methods:** optimization was performed in a quasi-static analysis system. For computational experiments, we used quasi-static (based on the method of moments) and electrodynamic (based on the finite element method and finite difference time domain) analysis systems. When measuring the frequency dependences of the transmission coefficient we used the Panorama P4226 vector circuit analyzer. **Novelty:** a methodology for developing a prototype MF based on a round cable structure is presented for the first time; a prototype of the MF was created using it and the measurement results were compared with the results of computational experiments. **Results:** a general methodology for prototyping and measuring MFs based on a round cable structure is presented, and a prototype MF based on it is developed. Preliminary parametric optimization of the MF was carried out in a quasi-static analysis system. We compared the results of MF measurements in two versions (using connecting printed circuit boards and without them) with the results of computational experiments in systems of quasi-static and electrodynamic analysis. The nature of the dependences of the transmission coefficient the MF in the frequency band up to 2 GHz is similar for all types of analysis. Using the example of an MF with printed circuit boards, the bandwidth was 680 MHz when modeling in a quasi-static system, 700 MHz in an electrodynamic analysis system, and 580 MHz when measured. In the frequency range from 0 to 1 GHz, the measured value of the reflection coefficient MF do not exceed minus 8 dB. Despite the fact that the length of the prototype MF (113 mm) is almost 10 times less than that used in optimization (1 m), it is capable of attenuating the interference with a total duration of

80.5 ps (at a level of 0.5) by 4.67, 5.2 and 6.17 times according to the results of modeling in systems of quasi-static and electrodynamic analysis, as well as measurements. **Practical relevance:** The proposed general methodology for prototyping and measuring MFs based on a circular cable structure expands the tools of developers and engineers, allowing the creation of various modifications of protective devices (both based on circular cross-sections and completely new ones). The developed MF is notable for the possibility of practical application for protecting REE from USPs in a variety of fields due to its low weight (up to 120 g), radiation resistance, reliability and high protective characteristics.

Key words: electromagnetic compatibility, ultrashort pulse, optimization, evolutionary algorithms, modal filters, cable structures.

Information about Authors

Viktoriya Olegovna Gordeyeva – Graduate at the Department of Television and Control, Junior researcher of the research laboratory «Safety and electromagnetic compatibility of radio-electronic means». Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. Field of research: electromagnetic compatibility, electromagnetic interference protection, optimization methods, evolutionary algorithms. E-mail: vikki.gern@gmail.com

Anton Olegovich Belousov – Ph.D. of Engineering Sciences, Associate Professor and Doctoral Student at the Department of Television and Control, Senior Research Fellow of the research laboratory «Safety and electromagnetic compatibility of radio-electronic means». Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. Researcher at the Center for Expertise and Testing. Sakhalin State University. Field of research: electromagnetic compatibility, design of protective devices based on modal filtration, optimization of protective devices. E-mail: ant1lafleur@gmail.com

Address: Russia, 634050, Tomsk, Lenina prospekt, 40.