

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.8.10>

УДК: 621.391.825

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ЗАЩИТЫ ОТ СВЕРХКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ ДЛЯ ЦЕПЕЙ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ БОРТОВОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

В.П. Костелецкий, Е.Б. Черникова, Е.С. Жечев, А.М. Заболоцкий

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
634050, Томск, пр. Ленина, д. 40

Статья поступила в редакцию 23 июня 2022 г.

Аннотация. Правильная и бесперебойная работа бортовой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), работающей в экстремальных условиях космического пространства, является важным требованием при разработке и эксплуатации космических аппаратов (КА), так как ее нарушение может нанести непоправимый ущерб. Рассматривается обеспечение помехозащищенности силовой шины электропитания (СШЭП) бортовой РЭА КА. При проектировании СШЭП решалась задача обеспечения целостности питания путем разработки устройства защиты от кондуктивных помех, включая защиту от сверхкоротких импульсов (СКИ). Длительность таких воздействий лежит в наносекундном и субнаносекундном диапазонах. Из-за широкого спектра такие помехи преодолевают традиционные средства защиты. Для защиты от СКИ, предложены устройства, называемые модальными фильтрами (МФ). Конструкция МФ позволяет интегрировать его в СШЭП и обеспечить эффективную защиту от СКИ. Между тем для получения комплексного эффекта защиты КА от излучаемого и кондуктивного СКИ большой амплитуды предлагается совместно использовать МФ и помехозащитный фильтр (ПФ) на элементах с сосредоточенными параметрами. Впервые представлены рекомендации по

поэтапной разработке устройства защиты СШЭП от СКИ, которое представляет из себя гибрид, состоящий из МФ и ПФ. Экспериментальные исследования показали, что такой гибрид ослабляет синфазные и дифференциальные помехи в диапазоне частот до 5 ГГц в 5,81 и 11,9 раз, соответственно. Кроме того, устройство обладает небольшими размерами и весом, что важно при использовании в космической отрасли.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, силовая шина электропитания, устройство защиты, модальный фильтр, сверхкороткий импульс, синфазный и дифференциальный режимы.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по проекту FEWM-2022-0001.

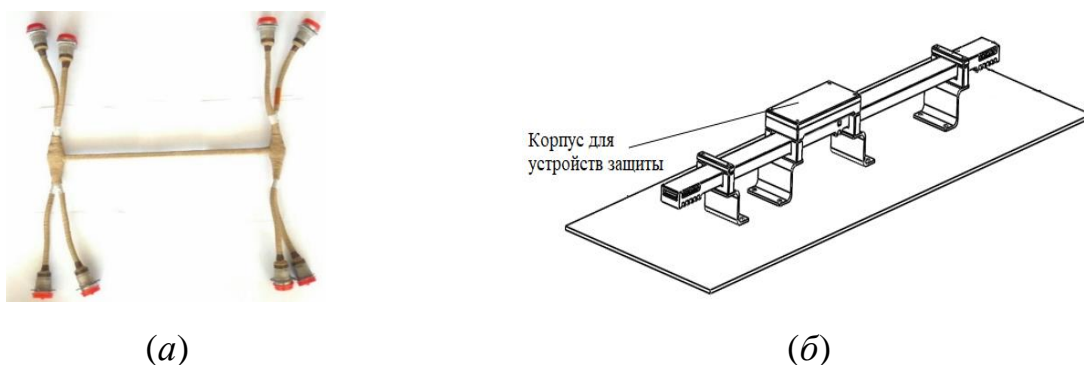
Автор для переписки: Черникова Евгения Борисовна, chiernikova96@mail.ru

Введение

К современной радиоэлектронной аппаратуре (РЭА) предъявляются крайне высокие требования по надежности и помехозащищенности, поскольку ее стабильное функционирование крайне важно, особенно в экстремальных условиях. При использовании РЭА в космической отрасли важно, чтобы она была устойчива к значительному изменению температуры, длительным перегрузкам, сильным вибрациям, влажности, радиации [1]. Правильная и бесперебойная работа бортовой РЭА, работающей в экстремальных условиях космического пространства, является важным требованием при разработке и эксплуатации современных космических аппаратов (КА), так как она полностью зависит от качества функционирования электроники. Для обеспечения этого требования применяется ряд различных мероприятий, в том числе касающихся электромагнитной совместимости (ЭМС) [2]. В силовой электронике КА актуальна проблема влияния паразитных параметров, которые могут привести к неустойчивой работе активных элементов, возникающей из-за перенапряжений, дисбаланса токов, резонанса в конденсаторах (в паразитных LC-контурах) и т.д. [3]. Для минимизации влияния паразитных параметров электрических

соединений в контурах тока между источником и потребителем в КА используется силовая шина электропитания (СШЭП). Прототип такой СШЭП представлен на рис. 1.

Проектирование СШЭП является комплексной задачей, которая в том числе состоит из разработки устройства защиты. Его необходимость заключается в том, что в современных системах электропитания переходные процессы, протекающие вследствие коммутации силовых ключей преобразователей, порождают кондуктивные и излучаемые электромагнитные помехи (ЭМП) в синфазном и дифференциальном режимах [4]. Кроме того, для повышения эффективности преобразования, увеличивают рабочие частоты источников вторичного питания, что негативно сказывается на электромагнитной обстановке. Кондуктивные ЭМП, распространяясь по цепям питания, могут нанести ущерб компонентам или ухудшить работу электроники. Целостность питания зависит от распространяющихся ЭМП, которые могут влиять на качество как входных, так и выходных линий [5]. Одним из опасных видов кондуктивных помех являются сверхкороткие импульсы (СКИ) [6]. Воздействие СКИ даже малой амплитуды на электронику приводит к необратимым повреждениям или временным сбоям [7]. Фильтр от СКИ, установленный на СШЭП КА, должен обладать не только высокими помехозащитными свойствами, но и характеристиками, позволяющими эффективно работать в условиях космоса. Таким образом, актуален и важен поиск новых подходов к разработке фильтра для СШЭП от СКИ.



(а) (б)
Рис. 1. СШЭП бортовой РЭА КА (а) и СШЭП с интегрированным устройством защиты от помех (б)

К наиболее распространенным методам подавления кондуктивных ЭМП, и СКИ, в частности, относят фильтры на элементах с сосредоточенными параметрами, которые применяются для уменьшения амплитуды токов или напряжений одной, или нескольких фиксированных частот. В [8] представлен помехозащитный фильтр (ПФ) от синфазных и дифференциальных помех для шины питания КА. Такой фильтр обеспечивает минимальное влияние на работу защищаемой цепи при отсутствии ЭМП, обладает необходимой реакцией на высокую скорость нарастания тока и напряжения, а также достаточную пропускную способность по току. Однако элементы фильтра обладают паразитными параметрами, что необходимо учитывать при проектировании защитных устройств.

Ранее предложена технология модальной фильтрации, применяемая для защиты РЭА от СКИ. Она подразумевает использование связанных линий с неоднородным диэлектрическим заполнением для разложения помехового импульса на импульсы меньшей амплитуды из-за разностей погонных задержек мод [9]. Устройства, работающие по данной технологии, называют модальными фильтрами (МФ) и защитными меандровыми линиями (МЛ). Их преимуществами являются: отсутствие активных компонентов, простота изготовления, стойкость к воздействию радиации, возможность многократного использования после помеховых воздействий, работа при высоких амплитудах напряжения помехи, низкая стоимость, малая масса. При выборе подходящей структуры поперечного сечения МФ для использования его в СШЭП учитывалось то, что он должен обладать высокой пропускной способностью по постоянному току, а также обеспечивать требуемое ослабление синфазных и дифференциальных кондуктивных помех. Рассматривались МЛ, многопроводные микрополосковые МФ, зеркально-симметричные МФ, МФ с пассивным проводником в вырезе опорной плоскости, МФ с лицевой связью. В результате выбран МФ с лицевой связью для защиты оборудования КА от СКИ [10]. На основе данного МФ разработано устройство для ослабления СКИ, работающее в синфазном и дифференциальном режимах [11].

Между тем для получения комплексного эффекта защиты КА от излучаемого и кондуктивного СКИ высокой амплитуды предлагается совместное использование МФ с ПФ на сосредоточенных параметрах. Ранее не было представлено поэтапных рекомендаций проектирования каждого из устройств в отдельности и их гибридного исполнения. Таким образом, цель данной работы – разработать устройство защиты цепей электропитания бортовой РЭА от СКИ.

1. Разработка конструкции устройства защиты и методы ее анализа

Для достижения требуемых уровней помехоустойчивости, помехозащищенности и надежности СШЭП КА необходимо разработать устройство защиты, которое должно обеспечивать требуемое ослабление синфазных и дифференциальных кондуктивных помех (включая защиту от СКИ). Для реализации данного требования подходит гибридный фильтр, конструкция которого включает 2 устройства: ПФ на элементах со сосредоточенными параметрами, используемый для защиты от дифференциальных и синфазных низкочастотных помех, и МФ, защищающий от СКИ в дифференциальном и синфазном режимах. Обоснование и выбор оптимальной структуры МФ для сборки выполнены по результатам сравнения существующих МФ. В результате более предпочтительным оказался МФ с лицевой связью, так как предложенная конструкция способна пропускать постоянный ток до 10 А. При этом она обеспечивает небольшое значение среднего геометрического характеристического импеданса для четной и нечетной мод, большое значение коэффициента связи и разности погонных задержек мод [10]. В используемой структуре увеличена ширина опорного проводника для удобства соединения с корпусной землей. Для достижения наибольшего ослабления рекомендованными нагрузками в начале и конце пассивного проводника – холостой ход и короткое замыкание, соответственно.

Разрабатываемый МФ должен ослаблять помехи как в синфазном, так и в дифференциальном режимах. Для этого рекомендуется использовать два МФ с

лицевой связью, объединенных в одну конструкцию (рис. 2). При разработке МФ для защиты СШЭП от СКИ учтено требование обеспечения нагрузочной способности по току 10 А, для эксплуатации устройства в силовоточных цепях питания. Кроме того, немаловажным фактором при проектировании являются массогабаритные характеристики, обоснованные размером экранирующего корпуса, в котором будет размещен гибридный фильтр.

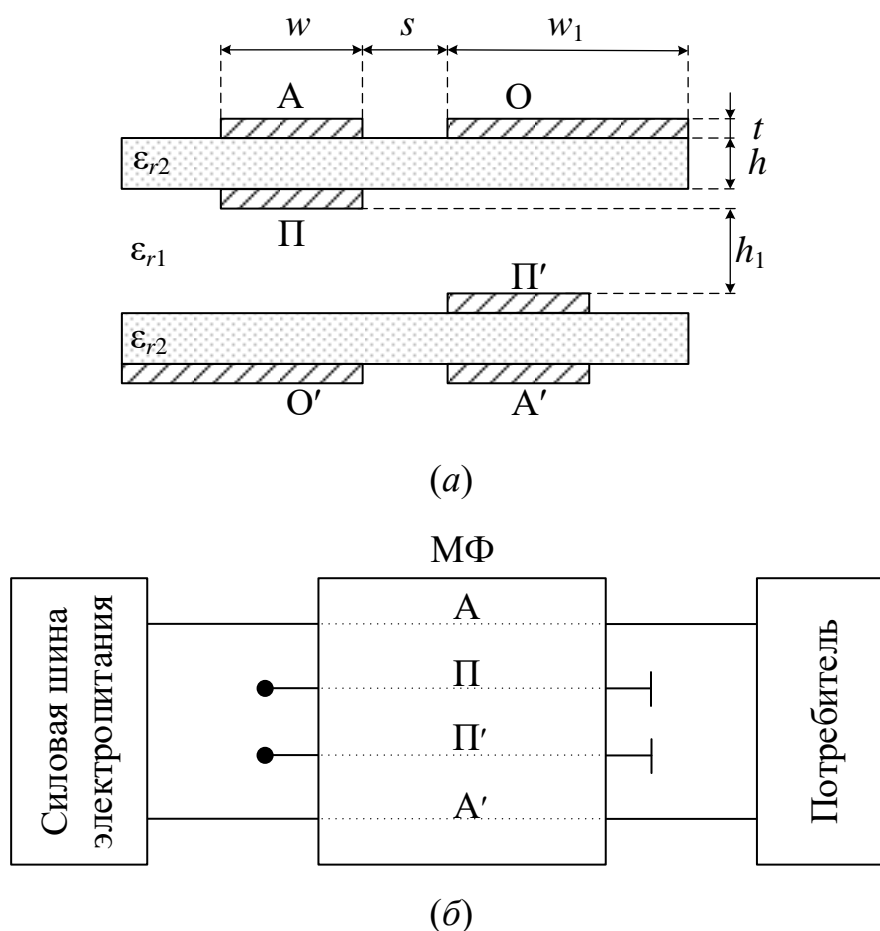


Рис. 2. Поперечное сечение (а) и структурная схема (б) МФ, работающего в синфазном и дифференциальном режимах

Параметры поперечного сечения получены с помощью эвристической оптимизации по критериям минимизации амплитуды СКИ на выходе при учете площади поперечного сечения, необходимого для токовой нагрузки 10 А. Из ГОСТ В 23584-79 следует, что для обеспечения постоянной токовой нагрузки 10 А поперечное сечение токоведущей жилы должно составлять не менее 1,1 мм². При ширине и толщине сигнальных проводников $w = 10$ мм и $t = 0,105$ мм площадь поперечного сечения токоведущей жилы

составляет $1,05 \text{ мм}^2$, что на $4,54 \%$ меньше требуемого по ГОСТ В 23584-79. Однако стоит учесть, что проводники МФ покрывают оловянно-свинцовым припоем ПОС-61, после чего их токовая пропускная способность возрастает до необходимых значений. Расстояние между проводниками (s) обусловлено токами утечки по поверхности и принято равным 2 мм . Для уменьшения массы МФ толщина диэлектрика h уменьшена до $0,34 \text{ мм}$. Оптимальное расстояние между структурами $h_1 = 2,54 \text{ мм}$.

На рис. 3а представлено поперечное сечение МФ для защиты СШЭП от СКИ, где h_2 – расстояние между конструкциями двух МФ с лицевой связью, равное $2,54 \text{ мм}$. Структурная схема представлена на рис. 3б.

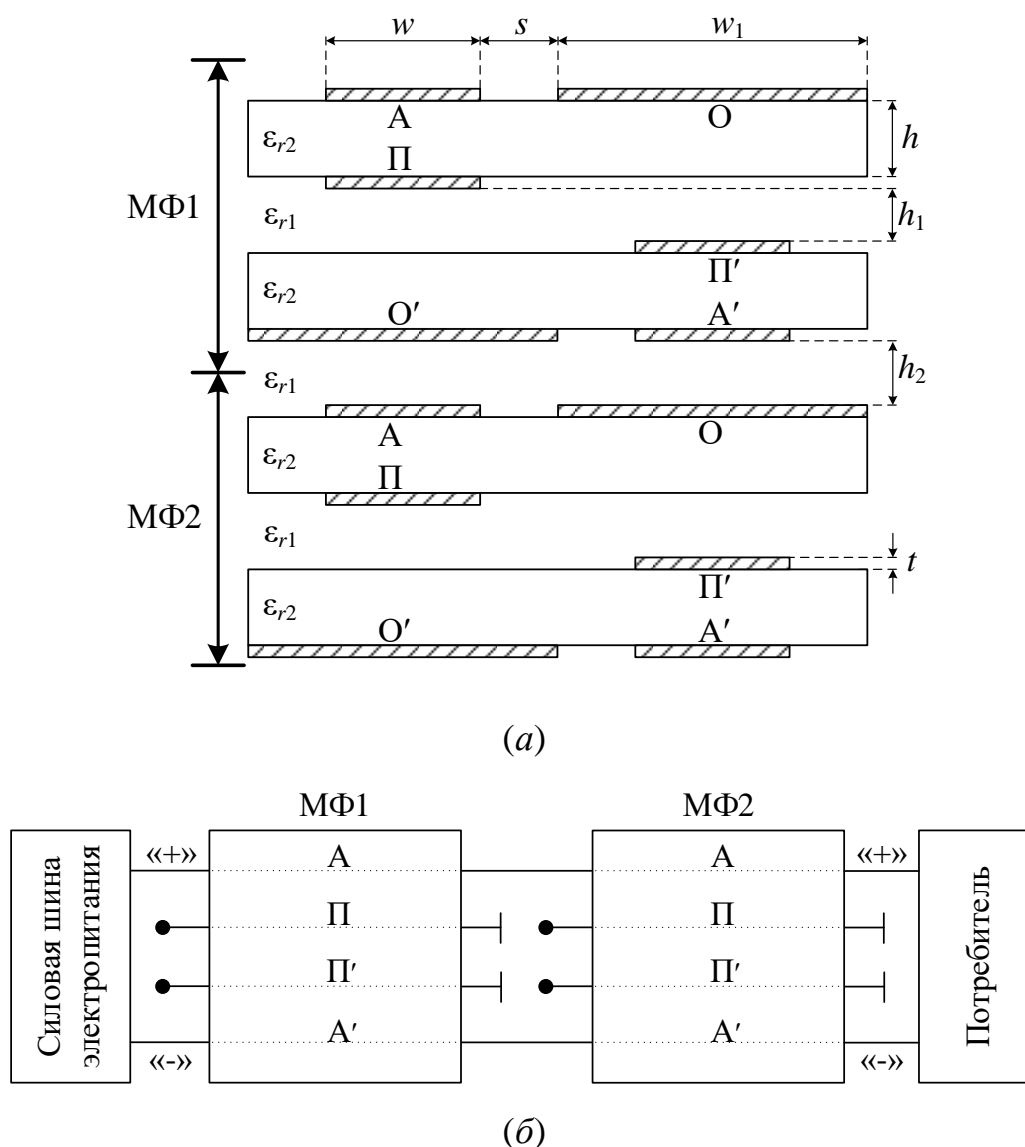


Рис. 3. Поперечное сечение (а) и структурная схема (б) устройства защиты СШЭП от СКИ на основе МФ

Для повышения уровня ослабления рекомендуется увеличить длину МФ, что приведет к увеличению значения разности погонных задержек мод. Кроме того, помеха, проходя большую длину, рассеивает свою энергию за счет потерь. Между тем непосредственное увеличение длины приводит к увеличению габаритов устройства. Исходя из этого, необходимо выполнить каскадное соединение двух МФ, разместив их друг над другом. При каскадном соединении отрезков связанных линий происходит последовательное деление каждого импульса на два импульса меньшей амплитуды. Последовательное соединение n отрезков обеспечивает при определенных условиях разложение на 2^n импульсов, что приведет к уменьшению максимальной амплитуды и, как следствие, улучшению характеристик устройства защиты [12]. Длина МФ1 составляет 40 мм, а МФ2 – 40 мм. Такие значения являются максимально возможными при заданных габаритах устройства, при этом они позволяют добиться эффективного ослабления СКИ.

Для достижения требуемых уровней помехоустойчивости, помехозащищенности, надежности и минимизации массы, рекомендуется разработать ПФ на элементах с сосредоточенными параметрами. Расчет сильноточного ПФ для СШЭП КА основан на определении полосы пропускания для синфазной и дифференциальной помех, импеданса фильтра и нагрузочной способности по току, а также минимизации габаритов. Для достижения требуемой индуктивности дросселей определено максимальное количество витков и материал сердечника, обуславливающие рабочие температуру, частоту и высокочастотные потери. Методика расчета RLC-параметров фильтра основывается на данных, предложенных в [13].

Для реализации синфазного и дифференциальных дросселей рекомендуется использовать кольцевые сердечники В64290-L45-X38 с параметрами: внешний диаметр – 16 мм, внутренний диаметр – 9,6 мм, высота кольца – 6,3 мм. Ферритовый сердечник изготовлен из материала Т38, применяемого в широкополосных трансформаторах и фильтрах электромагнитных помех, который обладает начальной магнитной

проницаемостью $\mu_r = 10000$. Количество витков для дифференциального дросселя (L_{DM}) составило 12, а для синфазного (L_{CM}) – 4, намотанных сдвоенным проводом диаметром токоведущей жилы по 0,9 мм. Суммарная площадь поперечного сечения проводников равна 1,27 мм², что с запасом перекрывает требования ГОСТ В 23584-79 (запас составил 15,45 %).

Индуктивность каждой из обмоток составляет $L_{CM} = 100$ мкГн, $L_{DM} = 1100$ мкГн. В качестве конденсаторов должны быть использованы керамические конденсаторы для поверхностного монтажа GRM43QB33A333KW01L с емкостью $C_{CM} = 33$ нФ, $C_{DM} = 66$ нФ. Принципиальная схема ПФ на элементах со сосредоточенными параметрами представлена на рис. 4.

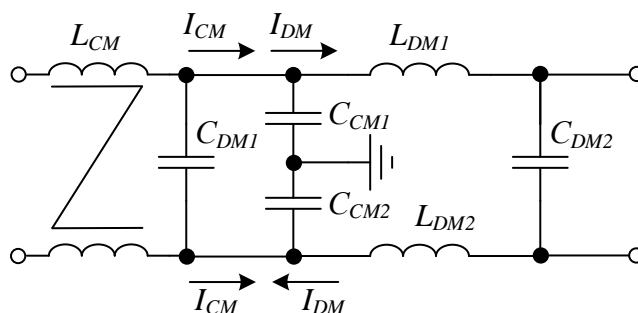


Рис. 4. Принципиальная схема помехозащитного фильтра для СШЭП КА

Гибридное использование ПФ на элементах со сосредоточенными параметрами и МФ позволяет расширить возможности каждого из устройств, а также скомпенсировать недостатки, тем самым повышая уровень помехозащиты. Такая конфигурация в совокупности определяет устройство защиты СШЭП КА от синфазных и дифференциальных кондуктивных помех, включая защиту от СКИ. Поперечное сечение гибридного фильтра представлено на рис. 5а, а структурная схема – на рис. 5б.

При эксплуатации СШЭП устройство защиты рекомендуется разместить в алюминиевом корпусе. Геометрические размеры корпуса составляют 92×45×35,5 мм, а толщина стенок $t = 2$ мм (рис. 6а). Для получения достоверных результатов анализа эффективности экранирования (ЭЭ, дБ) построение точной трехмерной модели для проведения ее электродинамического моделирования.

Количественная характеристика ЭЭ определяется как отношение значений напряженности поля в точке, помещенной в корпус и без корпуса. На рис. 6а показано воздействие плоской электромагнитной волны. Вектор Пойнтинга направлен под прямым углом к стенке корпуса. Частота воздействия изменяется от 0 до 18 ГГц. В качестве материала корпуса используется алюминий с удельной электрической проводимостью $\sigma = 3,6 \cdot 10^7$ См/м и относительной магнитной проницаемостью $\mu_r = 1$. Минимальная толщина стенок равна 1,25 мм. Геометрические размеры апертур корпуса приведены на рис. 6б. Расстояние между центрами апертур d составляет 10 мм, ширина l и высота w апертур равны 8 и 4 мм, соответственно.

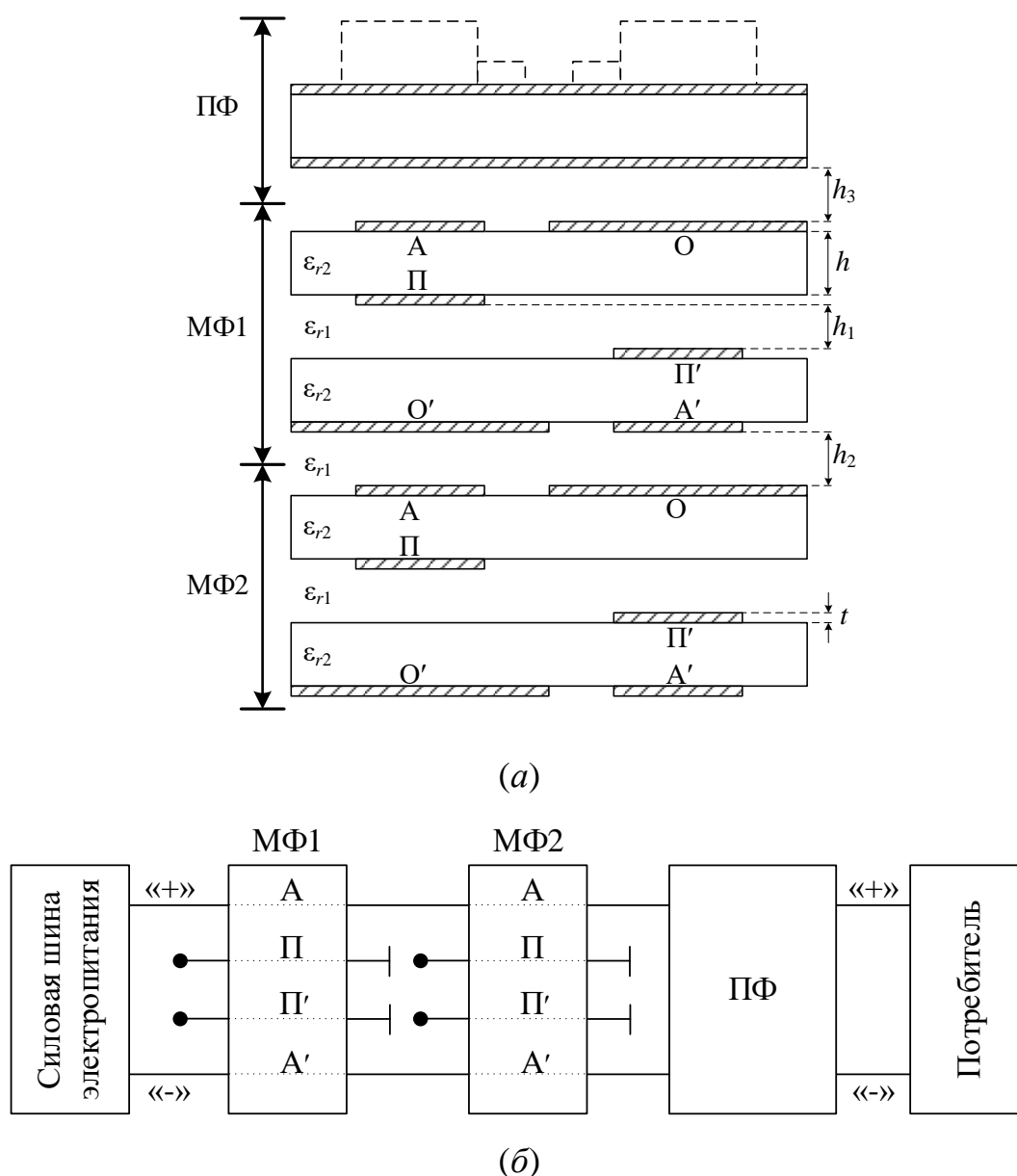


Рис. 5. Поперечное сечение (а) и структурная схема (б) гибридного фильтра

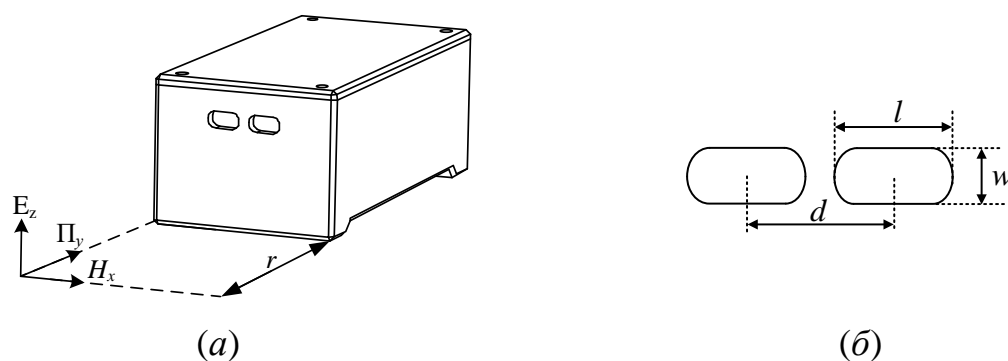


Рис. 6. Корпус устройства защиты (а) и размеры апертур (б)

Для измерения S -параметров в дифференциальном и синфазном режимах использован четырехпортовый векторный анализатор цепей E5071C. Частотные характеристики получены в диапазоне от 300 кГц до 15 ГГц. Для получения временных откликов в ПО ADS на основе измеренных S -параметров задается N -портовое устройство, после чего на его вход подается воздействие. В качестве тестового воздействия использован оцифрованный сигнал с осциллографа вычислительного комбинированного С9-11, с длительностью 300 пс по уровню 0,5 и амплитудой э.д.с. 500 мВ (рис. 7).

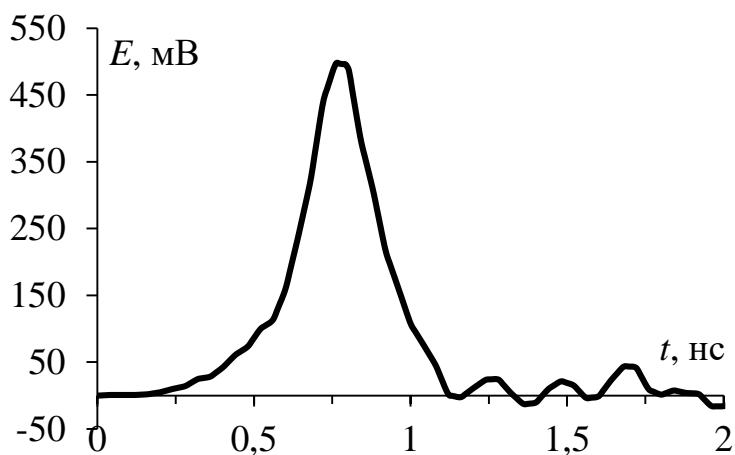


Рис. 7. Форма э.д.с. входного воздействия

Для подтверждения достоверности результатов, полученных посредством экспериментальных исследований, рекомендуется выполнить электродинамическое моделирование. При электродинамическом моделировании с учетом потерь в качестве материала проводников используется медь (относительная магнитная проницаемость $\mu_r = 1$, электрическая проводимость $\sigma = 5,8 \cdot 10^7$ См/м), а в качестве подложки используется

диэлектрик, значение ϵ_r которого варьируется в диапазоне от 4,3 до 4,6 в зависимости от частоты сигнала. Таким образом, при моделировании принято среднее значение ϵ_r равное 4,5, а тангенса угла диэлектрических потерь $tg\delta = 0,025$.

2. Результаты разработки фильтрующего устройства и их анализ

В результате разработаны макеты двухкаскадного экранированного МФ, защищающего от дифференциальных и синфазных помех для СШЭП КА (рис. 8а), ПФ на элементах со сосредоточенными параметрами (рис. 8б), гибридного фильтра (рис. 8в) и устройства защиты в составе прототипа СШЭП (рис. 8г).

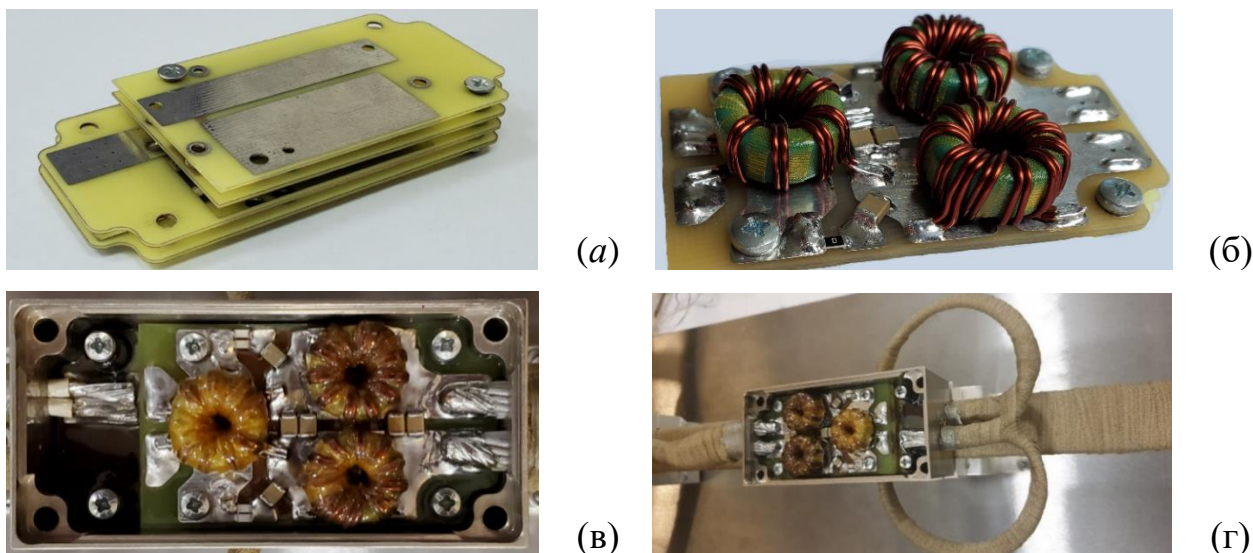


Рис. 8. Макеты МФ (а), ПФ (б), гибридного фильтра в экранирующем корпусе без крышки (в) и в составе прототипа СШЭП (г)

Выполнен эксперимент в частотной и временной областях прототипа МФ в дифференциальном и синфазном режимах. Экспериментальные частотные зависимости $|S_{21}|$ представлены на рис. 9. Формы напряжения на выходе МФ в дифференциальном и синфазном режимах, полученные при эксперименте и моделировании, показаны на рис. 10. По форме кривых, изображенных на рис. 9, видно, что амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) устройства эквивалентна фильтру нижних частот (ФНЧ). Частоты среза $|S_{21}|$ составили 73,8 Гц в дифференциальном и 93,8 МГц в синфазном режимах.

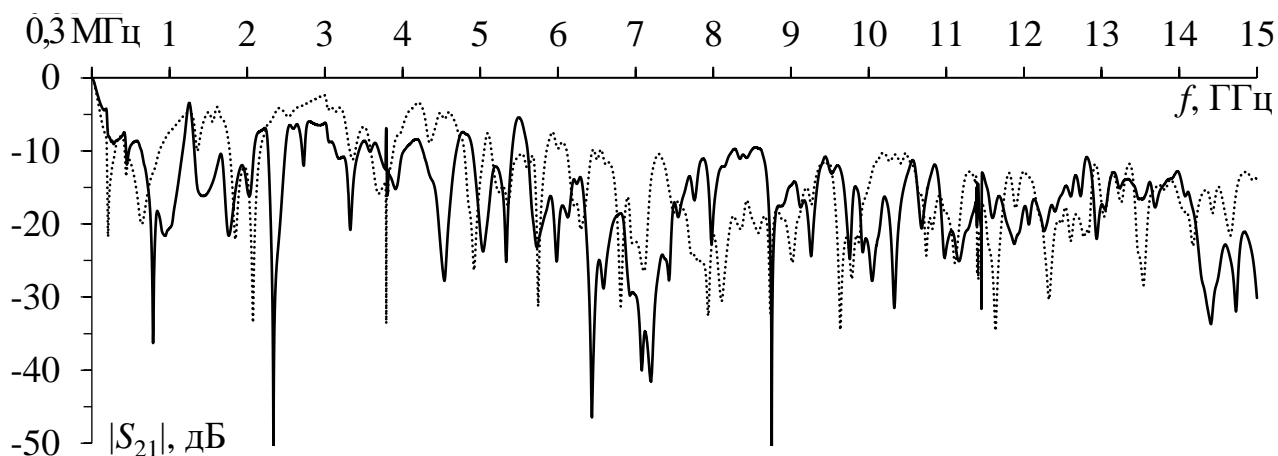


Рис. 9. Результаты эксперимента частотной зависимости $|S_{21}|$ МФ для дифференциального (- -) и синфазного (—) режимов

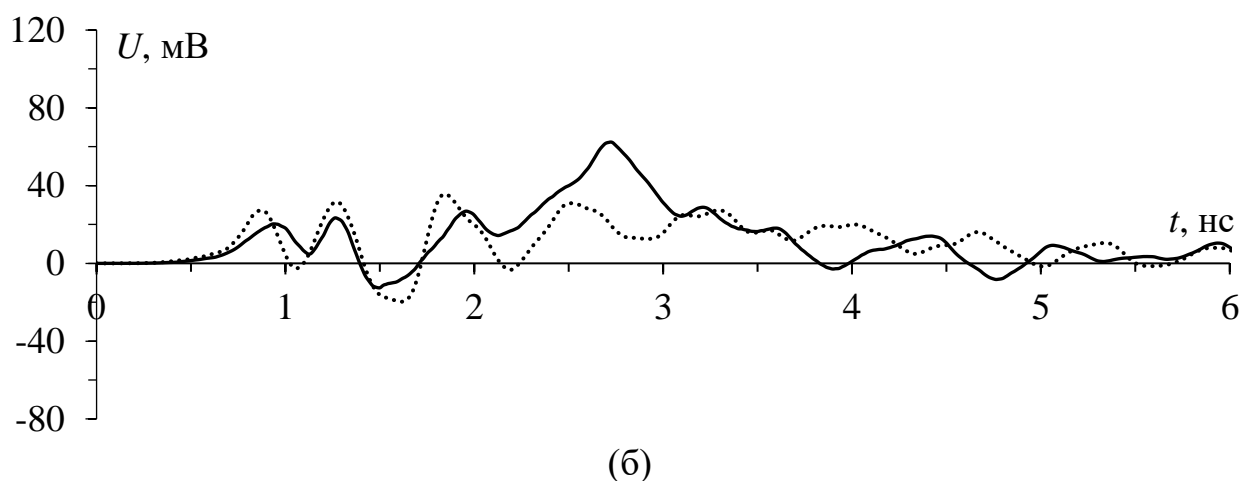
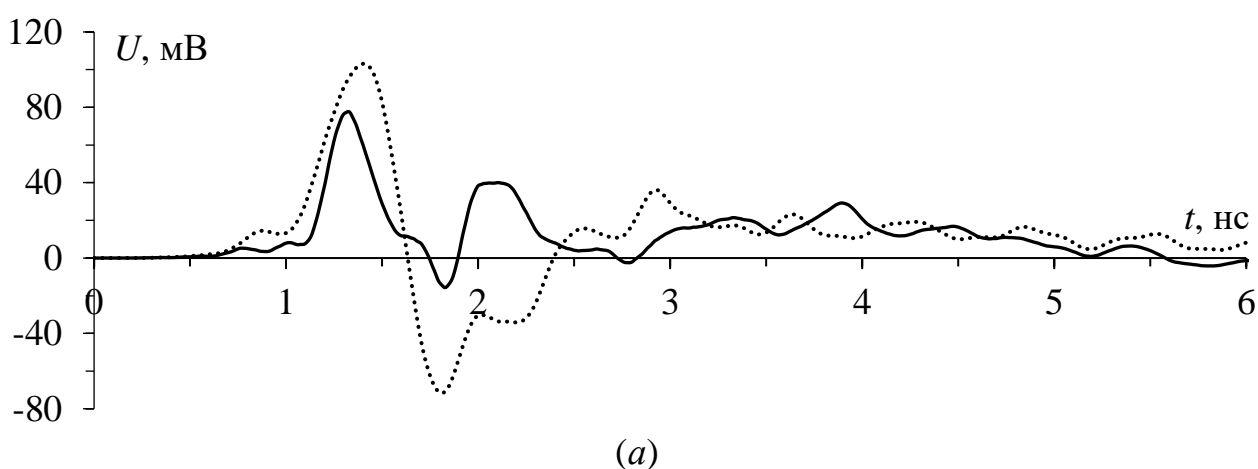
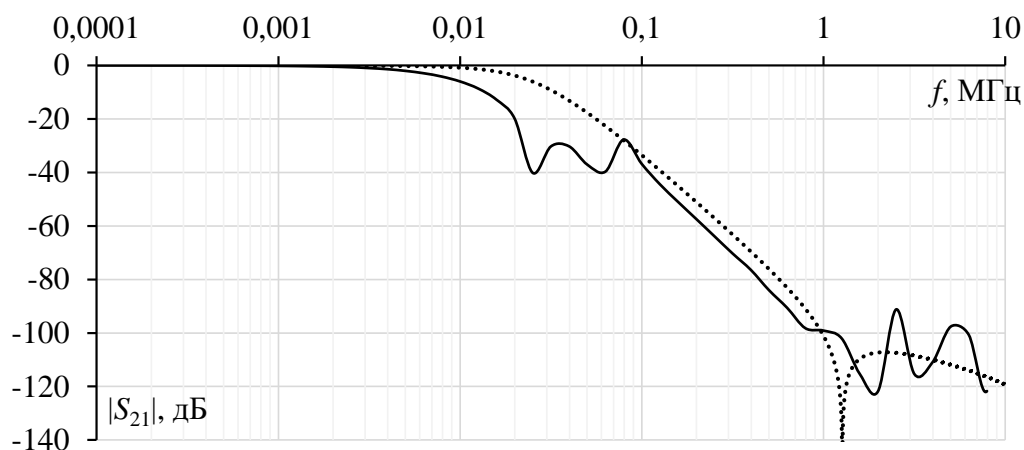


Рис. 10. Формы напряжения, полученные при моделировании (—) и эксперименте (- -) на выходе МФ для дифференциального (а) и синфазного (б) режимов

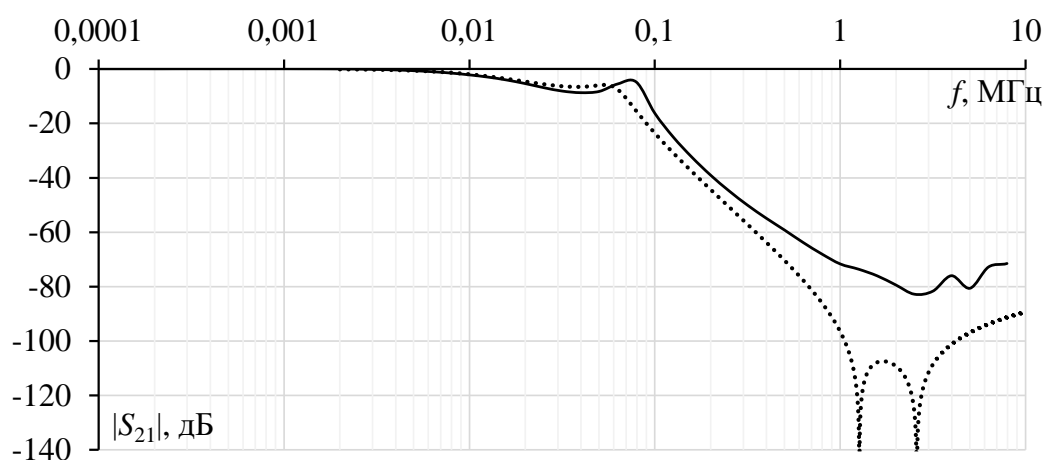
Значения U_{\max} на выходе прототипа МФ, составили 103 мВ и 78 мВ в дифференциальном и 36 мВ 62 мВ в синфазном режимах при моделировании и эксперименте, соответственно. Таким образом, входное импульсное воздействие

длительностью 300 пс ослабляется в 2,4 и 6,9 раза (относительно половины э.д.с.) при моделировании и 3,2 и 4 раза – при эксперименте.

На рис. 11 представлены результаты электродинамического моделирования и эксперимента в частотном диапазоне до 10 МГц ПФ на сосредоточенных компонентах, в дифференциальном и синфазном режимах. Вычисленные и измеренные частоты среза для обоих режимов сведены в таблицу 2. Из рисунков видно, что исследуемое устройство представляет собой ФНЧ для синфазного и дифференциального режимов. Устройство обладает широкой полосой подавления для обоих режимов. При этом минимальное ослабление составляет 15 и 22 дБ для синфазного и дифференциального режимов, соответственно.



(a)



(б)

Рис. 11. Частотные зависимости $|S_{21}|$ ПФ при эксперименте (—) и моделировании (···) в дифференциальном (а) в синфазном (б) режимах

Таблица 2. Сравнение вычисленной и измеренной частот среза (кГц) для синфазного и дифференциального режимов

Параметр	Моделирование	Эксперимент	Абсолютное отклонение
Частота среза в синфазном режиме	13,6	14	0,4
Частота среза в дифференциальном режиме	18	6,8	11,2

Результаты экспериментальных исследований гибридного фильтра в частотной области представлены на рис. 12. Формы напряжения на выходе МФ в дифференциальном и синфазном режимах, полученные при эксперименте, показаны на рис. 13.

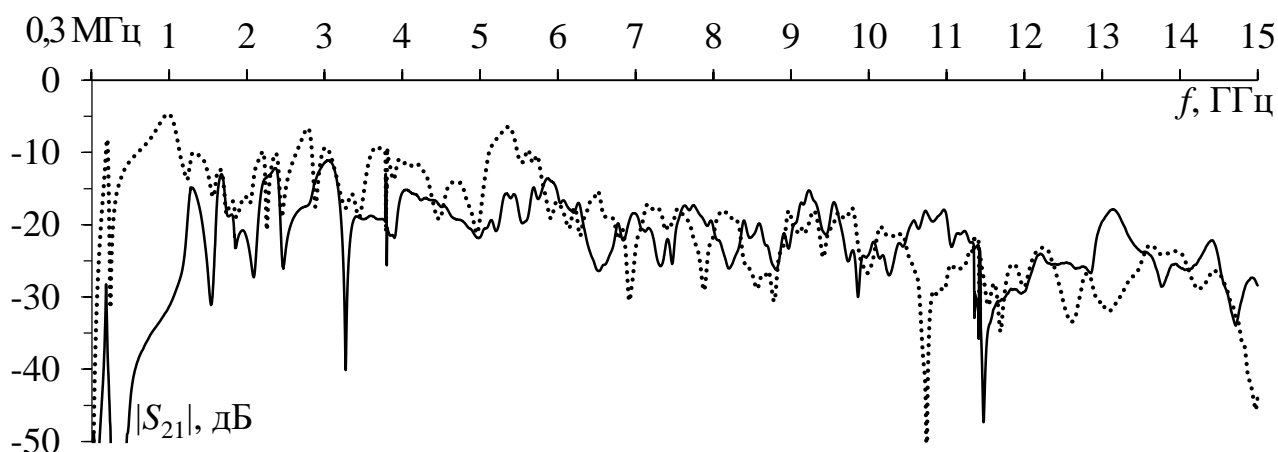


Рис. 12. Измеренные частотные зависимости $|S_{21}|$ гибридного фильтра в дифференциальном (—) и синфазном (\cdots) режимах

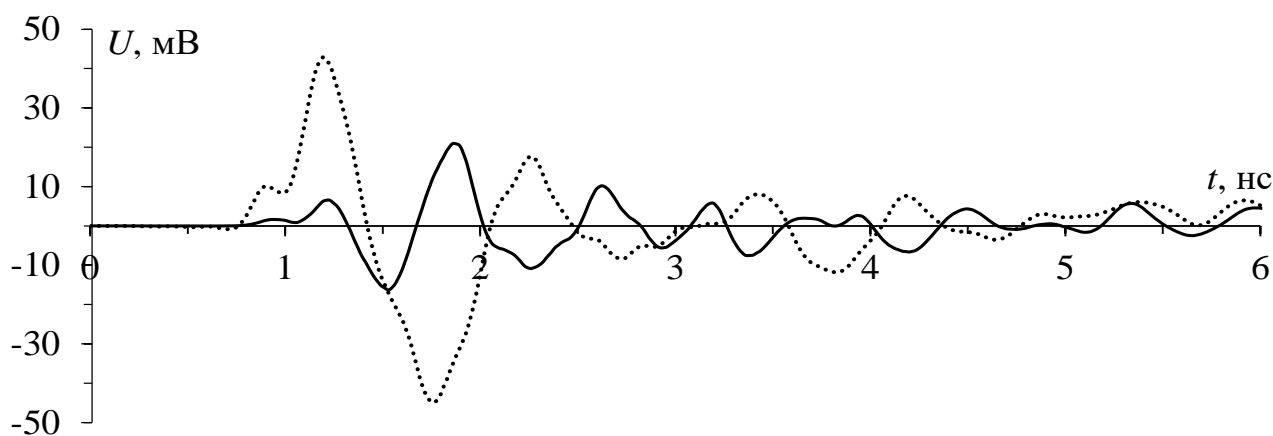


Рис. 13. Формы напряжения на выходе гибридного фильтра, в дифференциальном (—) и синфазном (\cdots) режимах

Измерения $|S_{21}|$ гибридного фильтра проведены в диапазоне частот от 300 кГц до 15 ГГц, а частота среза гибридного фильтра определяется ПФ и составляет 6,8 кГц в дифференциальном и 14 кГц в синфазном режимах, что меньше 300 кГц. Значение U_{\max} на выходе гибридного фильтра составляет 21 мВ в дифференциальном и 43 мВ – в синфазном режимах. Таким образом, входное импульсное воздействие длительностью 300 пс ослабляется в 11,9 и 5,81 раза (относительно половины э.д.с.).

Результаты электродинамического моделирования ЭЭ корпуса со стороны входа и выхода представлены на рис. 14. Экранирующие свойства стабильны до частоты первого резонанса, которая составляет 4 ГГц для обеих сторон воздействия. Значение ЭЭ до частоты резонанса составляет 46 дБ для входной и 37 дБ для выходной сторон. Характеристики, полученные для входа и выхода, хорошо согласуются между собой на частотах свыше 4 ГГц. Стоит учесть, что моделирование корпуса прототипа устройства защиты СШЭП от СКИ выполнено без учета подводящих отводов и применяемых лент ЛМAMС. Поэтому, на частотах свыше частоты первого резонанса наблюдается значительное ухудшение ЭЭ как со стороны входа, так и со стороны выхода. Большие и малые резонансы обусловлены общими габаритами корпуса, геометрическими размерами апертур и их взаимным расположением. На частотах свыше 15,5 ГГц наблюдаются отрицательные значения ЭЭ, что говорит об усилении составляющих внешнего электромагнитного поля. Стоит отметить, что при соблюдении целостности экранирования могут быть достигнуты приемлемые значения ЭЭ во всем исследуемом частотном диапазоне [14].

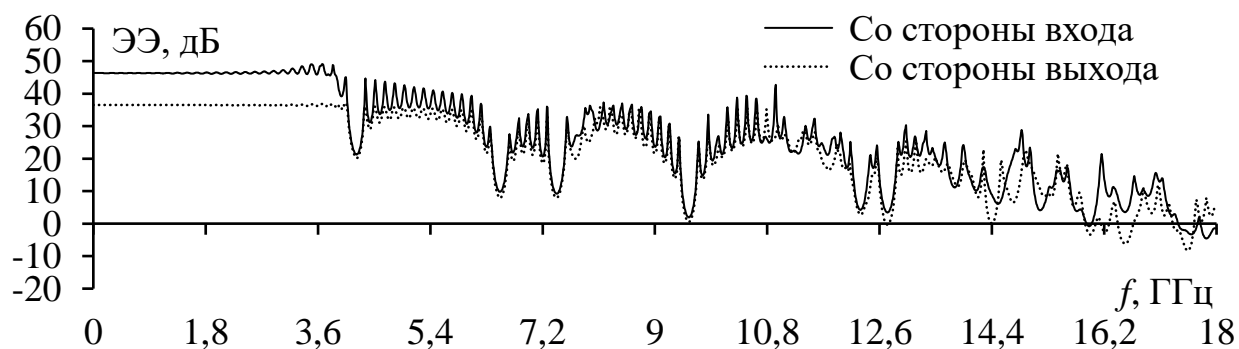


Рис. 14. ЭЭ корпуса со сторон входа и выхода

Заключение

Таким образом, впервые представлена поэтапная разработка устройства защиты СШЭП от СКИ. Оно представляет из себя гибридное исполнение ПФ на элементах со сосредоточенными параметрами и двухкаскадного МФ, полученного на основе МФ с лицевой связью. Изготовлен макет МФ, выполнены электродинамическое моделирование и экспериментальное исследование, по результатам которых получены временные и частотные характеристики в дифференциальном и синфазном режимах. При эксперименте частоты среза $|S_{21}|$ составили 73,8 МГц в дифференциальном и 93,8 МГц в синфазном режимах. Значение U_{\max} на выходе прототипа МФ составляет 78 мВ в дифференциальном и 62 мВ в синфазном режимах. Таким образом, входное импульсное воздействие длительностью 300 пс ослабляется в 3,2 и 4 раза (относительно половины э.д.с.).

Выбрана электрическая принципиальная схема ПФ, определены номиналы компонентов фильтра и его массогабаритные характеристики. Изготовлен макет ПФ, выполнены моделирование и экспериментальное исследования. При эксперименте частоты среза $|S_{21}|$ составили 6,8 кГц в дифференциальном и 14 МГц в синфазном режимах.

Изготовлен макет гибридного фильтра, выполнены экспериментальные исследования во временной и частотной областях. Получена частотная зависимость $|S_{21}|$ в диапазоне частот от 300 кГц до 15 ГГц. Выявлено, что входное импульсное воздействие длительностью 300 пс ослабляется в 11,9 и 5,81 раза (относительно половины э.д.с.) в дифференциальном и синфазном режимах, соответственно.

Разработанное устройство защиты от СКИ для цепей электропитания имеет малую массу, обладают большим сроком службы и подходит для работы при экстремальных условиях, что важно при эксплуатации КА. Полученные результаты могут быть полезны для разработки шаблонов для автоматизированного создания геометрических и схемных моделей структур.

Финансирование: Работа выполнена в рамках проекта FEWM-2022-0001 Минобрнауки России.

Литература

1. Ковалев А.П., Алексеев В.П. Факторы, определяющие надежность и долговечность конструкций бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов (информационное исследование). *Научно-методический электронный журнал «Концепт»*. 2015. Т.13. С.1006-1010.
2. Kučera M., Šebök M. Electromagnetic compatibility analysing of electrical equipment. *Diagnostic of electrical machines and insulating systems in electrical engineering*. 2016. P.1-6. <https://www.doi.org/10.1109/DEMISEE.2016.7530476>
3. Huiqing W., Jun L., Xuhui Z., Xuhui W. Electric vehicle drive inverters simulation considering parasitic parameters. *13th Power Electronics and Motion Control Conference*. Poznan, Poland. 2008. P.417-421. <https://www.doi.org/10.1109/EPEPEMC.2008.4635301>
4. Lehr J., Pralhad R. *Foundations of Pulsed Power Technology*. NY, Wiley-IEEE Press. 2017. 664 p.
5. Baisden A.C., Boroyevich D., van Wyk J.D. Enhanced design of an integrated transmission-line bus filter. *Power Electronics Specialists Conference (PESC)*. Orlando, USA. 2007. P.3029-3033. <https://www.doi.org/10.1109/PESC.2007.4342507>
6. Mora N., Vega F., Lugrin G., Rachidi F., Rubinstein M. Study and classification of potential IEMI sources. *System and assessment notes*. 2014. №41. 92 p.
7. Mojert C. UWB and EMP susceptiblity of microprocessors and networks. *Proc. of the 14th International Zurich symposium on electromagnetic compatibility*. Zurich, Switzerland. 2001. P.47-52.
8. Zhechev Y.S., Kosteletskii V.P., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. Electromagnetic interference filter for spacecraft power bus. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. V.560. №012133. P.1-6. <https://www.doi.org/10.1088/1757-899X/560/1/012133>

9. Gazizov A.T., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. UWB pulse decomposition in simple printed structures. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2016. V.58. №4. P.1136-1142. <https://www.doi.org/10.1109/TEMC.2016.2548783>
10. Khazhibekov R.R., Zabolotsky A.M., Zhechev Y.S., Kosteletskii V.P., Gazizov T.R. Development of modal filter prototype for spacecraft busbar protection against ultrashort pulses. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. V.560. №012145. P.1-6. <https://www.doi.org/10.1088/1757-899X/560/1/012145>
11. Khazhibekov R.R., Zhechev Y.S., Kosteletskii V.P., Zabolotsky A.M. A device for an ultrashort pulse attenuation in common and differential modes in the highvoltage power supply circuits of the spacecraft. *21st International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices EDM*. Erlagol, Altai. 2020. P.179-182. <https://www.doi.org/10.1109/EDM49804.2020.9153483>
12. Заболоцкий А.М., Газизов Т.Р. *Электромагнитная совместимость: модальные технологии*. Томск, Издательство Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2018. 132 с.
13. Richard L., Timothy M. *EMI filter design*. CRC Press. 2012. 264 p.
14. Zhechev Y.S., Zabolotsky A.M. The analysis of shielding effectiveness of the enclosure of an EMI-filter for a spacecraft power bus. *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*. 2021. V.15. P.470-475. <https://doi.org/10.46300/9106.2021.15.51>

Для цитирования:

Костелецкий В.П., Черникова Е.Б., Жечев Е.С., Заболоцкий А.М. Разработка устройства защиты от сверхкоротких импульсов для цепей электропитания бортовой радиоэлектронной аппаратуры. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2022. №8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.8.10>