

УДК 621.391.825

В.П. Костелецкий

Обзор гибридных фильтров для защиты радиоэлектронных средств от кондуктивных помех

Актуальной проблемой обеспечения электромагнитной совместимости является защита радиоэлектронных средств (РЭС) от кондуктивных помех, которые проникают в электронные узлы РЭС через проводники сигнальных и силовых цепей. Для обеспечения помехозащищенности РЭС применяют электрические фильтры. Однако такое решение обладает недостатком, связанным с тем, что электрический фильтр является устройством, разработанным под конкретные цели, и часто не подходит для решения смежных задач. Совместное использование электрических фильтров различного назначения и применения, т.е. их гибридное исполнение, позволяет повысить эффективность таких устройств. Особенностью гибридных фильтров является то, что характеристики используемых в его составе электрических фильтров компенсируют недостатки друг друга. В работе произведен обзор и сравнительный анализ гибридных помехозащитных фильтров, который может быть использован при проектировании РЭС и организации эффективной защиты от кондуктивных помех.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, устройства защиты, гибридный фильтр, сверхкороткий импульс, кондуктивная помеха, синфазный режим, дифференциальный режим, модальная фильтрация.

DOI: 10.21293/1818-0442-2021-25-1-37-47

Развитие радиоэлектронных средств (РЭС) приводит к повсеместному использованию электроники, в том числе в критичных отраслях, например, военной, атомной, медицинской и космической. Эксплуатация электронного оборудования в условиях неблагоприятной электромагнитной обстановки, а также в условиях, когда отсутствует возможность его обслуживания, может привести к выходу из строя РЭС и поставить под вопрос успех проекта или привести к человеческим жертвам. В связи с этим предъявляются повышенные требования к надежности РЭС и растет важность соблюдения требований электромагнитной совместимости (ЭМС) [1].

При разработке РЭС необходимо учитывать следующие факторы: устойчивость к вибрациям, перегрузке, перепадам температур, влажность, стабильность параметров РЭС по мере набора суммарной дозы облучения и выживаемость после контакта с тяжелыми заряженными частицами [2]. В погоне за быстродействием происходит увеличение верхней частоты спектра рабочих сигналов. Кроме того, вследствие миниатюризации и уменьшения уровня питающих напряжений уменьшается запас помехоустойчивости электронных устройств [3, 4]. При этом РЭС часто приходится работать в ограниченном пространстве, что приводит к увеличению плотности компоновки. Все эти факторы ухудшают ЭМС РЭС [5, 6]. Поэтому с каждым годом требования стандартов по ЭМС ужесточаются как в отношении порогов восприимчивости, так и в расширении частотного диапазона [7, 8]. Это четко прослеживается на примере пересмотров военного стандарта по ЭМС Министерства обороны США MIL-STD-461 [9]. Несмотря на наличие отечественных стандартов по ЭМС, инженеры нередко используют этот стандарт в дополнение к методикам и правилам при испытаниях оборудования.

Помимо техногенного ухудшения ЭМС, существует вероятность преднамеренных электромагнит-

ных воздействий специальными электротехническими средствами [10, 11]. Актуальность данной проблемы подчеркивают новые исследования в данной области [12–15]. Некоторые исследования на тему преднамеренных воздействий показывают, что даже малые амплитуды помехи могут приводить к нарушениям нормального функционирования РЭС [16]. Уязвимость РЭС к помеховым воздействиям актуализирует такое направление ЭМС, как защита от кондуктивных помех, которые, в свою очередь, могут обладать узкой и широкой полосой спектра [17]. Одним из наиболее опасных видов помех являются сверхширокополосные электромагнитные импульсы [18]. Отдельно стоит выделить сверхкороткие импульсы (СКИ) наносекундного и субнаносекундного диапазонов.

Спектр СКИ-диапазонов перекрывает широкий диапазон частот, вследствие чего значительная часть частотных компонент спектра такого импульса преодолевает традиционные схемотехнические и конструктивные средства защиты от помех [19]. Принято считать, что кондуктивные помехи распространяются в трех режимах: несимметричном, синфазном и дифференциальном. Требования к уровням таких помех регламентируют современные стандарты по обеспечению ЭМС, например EN 55022 [20]. Распространяясь по электрическим цепям или вдоль направляющих систем, СКИ могут привести к электрическому пробое диэлектриков и полупроводников, в результате происходит изменение электрических параметров, в том числе приводящее к повреждению электронного оборудования [21].

Для борьбы с кондуктивными помехами часто применяют схемотехнические и конструктивные средства защиты. Под схемотехническими средствами защиты от кондуктивных помех подразумеваются фильтры на компонентах с распределенными и сосредоточенными параметрами, полупроводниковые ограничители напряжения помех, оптическая,

емкостная и трансформаторная гальванические развязки, а также газоразрядные устройства. К конструктивным средствам защиты относятся методы обеспечения регулярности линий передачи, защитные экраны, различные схемы заземления, уменьшение импеданса цепей питания и оптимальные настройки оборудования, которые позволяют РЭС нормально функционировать в заданной обстановке [22]. Помимо этого, существует отдельный вид перспективных помехозащитных устройств, которые специализируются на СКИ. В основе работы таких устройств используются модальные искажения [23]. К таким устройствам относят защитные меандровые линии (МЛ) [24] и модальные фильтры (МФ) [25].

Также существуют МФ для работы в синфазном и дифференциальном режимах [26]. Конструктивно такие защитные устройства допускают использование в самых жестких условиях эксплуатации. А благодаря простоте конструкции легко реализуются в рамках типового технологического процесса производителей печатных плат. Между тем актуально применение гибридных устройств защиты, которые, как правило, обладают лучшими характеристиками, перекрывая недостатки средств фильтрации, из которых они спроектированы. Это может существенно повысить помехозащищенность РЭС, следствием чего станет бесперебойное функционирование критически важного оборудования. Авторам не известен обзор гибридных средств защиты. Однако это является актуальным и важным исследованием, так как такой материал позволяет систематизировать существующие образцы гибридных помехозащитных устройств и может быть полезен при проектировании РЭС в сфере организации эффективной защиты от кондуктивных помех.

Цель работы – выполнить анализ основных вариаций гибридных помехозащитных фильтров, защищающих от кондуктивных помех. В статье рассматриваются следующие гибриды: активного фильтра (АФ) и пассивного фильтра (ПФ) на дискретных элементах, гибрида фильтра на поверхностных акустических волнах (ПАВ) и LC-резонатора, гибрида МФ и МЛ, а также гибрида МФ и ПФ на дискретных элементах.

Гибрид АФ и фильтра на дискретных элементах

Фильтры с активным компонентом применяют в цепях питания со значениями токов от единиц до десятков ампер при рабочих напряжениях от десятков до сотен вольт. Поэтому элементы схемы имеют большую установленную мощность и, как следствие, высокую стоимость. В свою очередь, ПФ относятся к традиционным устройствам защиты, просты в изготовлении и широко распространены, однако обладают ограниченными функциональными возможностями и являются неуправляемыми. При гибридизации АФ и ПФ АФ выполняют роль исполнительного органа регулятора параметров ПФ. При этом мощность АФ снижается, в связи с чем устанавливается баланс между величиной добротности

ПФ и его устойчивостью в динамических режимах работы. Также гибридное исполнение АФ и ПФ позволяет автоматически корректировать параметры фильтра во время работы. Гибрид АФ и ПФ используют для борьбы с синфазными и дифференциальными помехами, которые образуются в современных системах электропитания за счет быстрых переходных процессов, связанных с ключевым режимом работы.

В [27, 28] предложен гибридный фильтр, представляющий собой активную схему на операционном усилителе с дискретным пассивным компонентом в виде синфазного дросселя, который состоит из двух обмоток (L_{C1} и L_{C2}). Структурная схема такого гибрида показана на рис. 1. На рис. 2 показаны результаты экспериментальных измерений уровня синфазной помехи, а также уровень, регламентируемый стандартом EN55022QP. Гибридный фильтр с похожим принципом работы представлен в [29]. Такой фильтр работает следующим образом: АФ обладает собственной обмоткой-монитором (L_M), которая отслеживает магнитные потоки, вызванные синфазной помехой в магнитопроводе синфазного дросселя. Затем на выходе схемы формируются сигналы, противофазные помехе синфазного дросселя, тем самым уменьшая ее уровень.

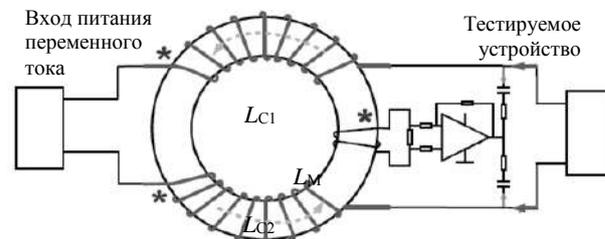


Рис. 1. Структурная схема гибридного фильтра с синфазным дросселем

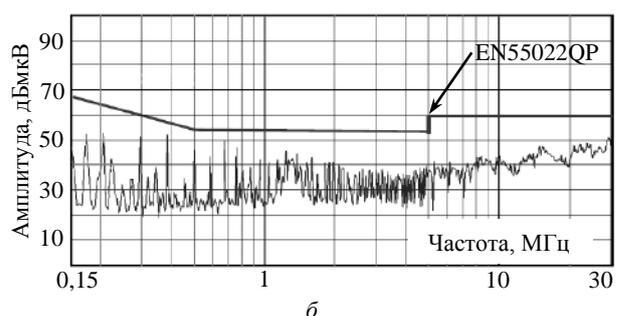
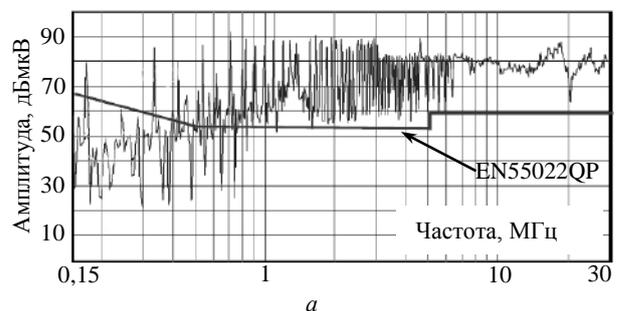


Рис. 2. Помеха без гибридного фильтра (а) и с гибридным фильтром (б) [27]

Гибрид АФ и дискретного компонента позволяет уменьшить уровень помех в полосе частот от 150 кГц до 30 МГц в синфазном режиме. Из рис. 2 видно, что использование такого гибрида позволяет сделать амплитуду помехи ниже уровня кривой, показывающей допустимые значения. Это позволяет пройти испытания по ЭМС в соответствии со стандартом, регламентирующим радиопомехи от оборудования информационных технологий EN55022Q в синфазном режиме.

В [30] приведен гибрид АФ и ПФ на элементах с сосредоточенными параметрами. Схемы активной и пассивной частей фильтра показаны на рис. 3. Результаты экспериментальных исследований влияния гибрида на уровень синфазных помех показаны на рис. 4. Коэффициент усиления в такой схеме определяется номиналами ее компонентов, которые вычисляются по формулам, приведенным в [30]. Принцип работы заключается в использовании техники прямого подавления шума. Через обмотку трансформатора тока ($L_{\text{трансформатора}}$), отслеживается напряжение помехи, при изменении ее уровня схема, управляя транзисторами, шунтирует помеху через RC-цепочку на опорный потенциал. Таким образом, схема оказывает влияние на уровень помехового напряжения в шине питания. При этом пассивная часть фильтра не претерпевает изменений.

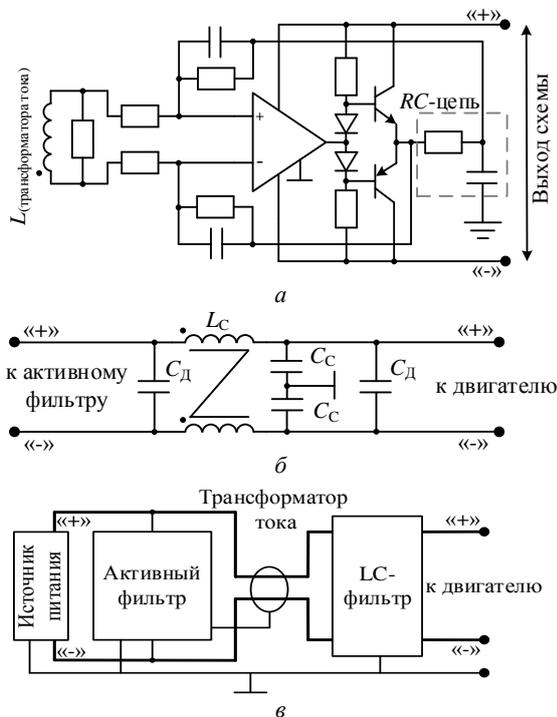


Рис. 3. Активная (а) и пассивная (б) части гибридного фильтра а также способ их соединения (в) [30]

Этот гибрид позволяет ослабить токи синфазной помехи в диапазоне частот от 10 кГц до 10 МГц. Примечательно, что на разных частотах составные части фильтра обладают разной эффективностью. Так, на рис. 4 отмечены примерные диапазоны частот, на которых компоненты фильтра оказывают наибольшее влияние на помеху.

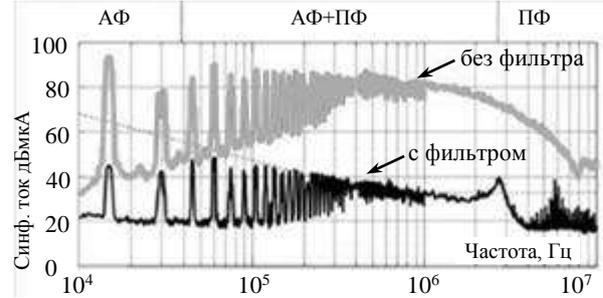


Рис. 4. Измеренные токи синфазной помехи [30]

В [31] предложен гибрид, объединяющий ПФ в планарном исполнении, интегрированный в конструкцию печатной платы (ПП), и АФ, элементы которого располагаются на внешнем слое ПП. Конденсаторы такого ПФ выполнены с применением диэлектрика C-ply, а сердечник магнитопровода – из ферритовой вставки. На рис. 5 изображена электрическая принципиальная схема гибрида. Элементы пассивного фильтра обозначены индексом П, а все остальные компоненты относятся к активному фильтру.

Экспериментальные результаты применения ПФ и гибрида приведены на рис. 6. Похожий гибрид представлен в [32, 33]. АФ через развязывающие керамические конденсаторы отслеживает уровень дифференциальной помехи.

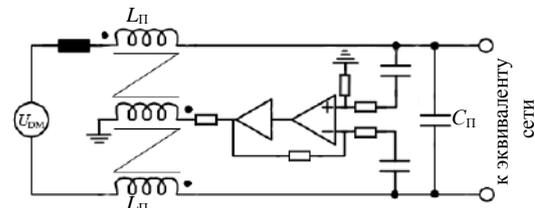


Рис. 5. Схема интегрированного гибридного фильтра [31]

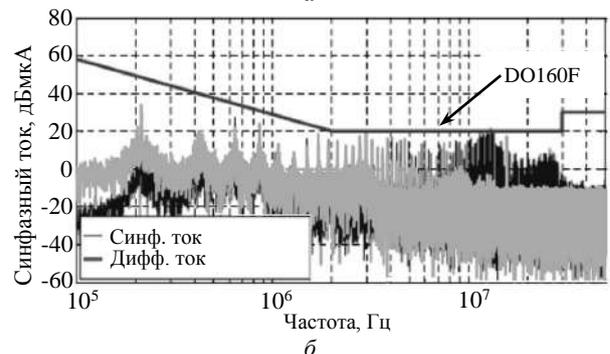
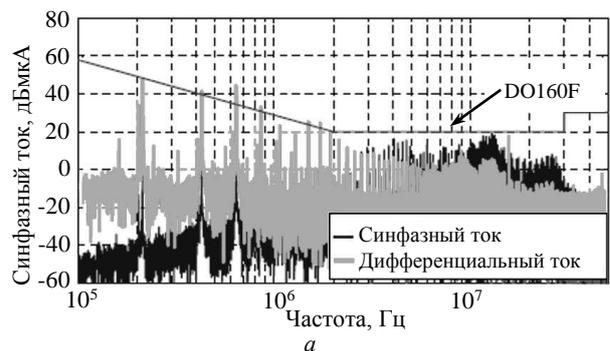


Рис. 6. Ток синфазной и дифференциальной помех после ПФ (а), после гибрида АФ и ПФ (б) [31]

Такой гибрид позволяет значительно снизить уровень помех в синфазном и дифференциальном режимах, в диапазоне частот от 100 кГц до 10 МГц для соответствия стандарту DO-160, определяющему процедуру испытаний авионики.

Таким образом, гибрид АФ и ПФ на дискретных элементах – это компромиссное решение для силовой электроники. Известно, что АФ плохо справляются с резкими переходными процессами и помехами большой амплитуды, что ограничивает верхний частотный диапазон их применения. Для уменьшения частоты среза в ПФ на дискретных элементах рекомендуется выбирать большие номиналы компонентов, что приводит к повышению массогабаритных характеристик таких устройств. Это в разы повышает стоимость готового изделия. Совместное использование АФ- и ПФ-фильтров позволяет компенсировать недостатки друг друга. Стоит отметить, что такие фильтры не оказывают должного ослабления на низких и высоких частотах.

Гибрид фильтра на поверхностных акустических волнах и LC-резонатора

В частотно-избирательных цепях современных радиоприемных устройств актуально использование фильтров с широким диапазоном перестройки. Для обеспечения этих требований в преселекторах радиоприемных устройств, широкодиапазонных и многоканальных приемниках, системах радиомониторинга применяют гибридные фильтры, состоящие из ПАВ-фильтра и LC-резонатора.

В [34] предложено звено гибридного лестничного ПАВ- и LC-фильтра, состоящее из ПАВ-резонатора в последовательной ветви и LC-контура в параллельной ветви. Схема такого фильтра показана на рис. 7. За счет изменения отношения статической емкости ПАВ-резонатора и емкости LC-контура в параллельной ветви гибрида возможно изменять уровень вносимых потерь, подавление в полосе заграждения и ширину полосы пропускания фильтра. Такой гибрид, настроенный на центральную частоту 326 МГц, обладает вносимыми потерями в полосе частот, равными 1,3 дБ, и ослаблением в полосе заграждения – 6 дБ.

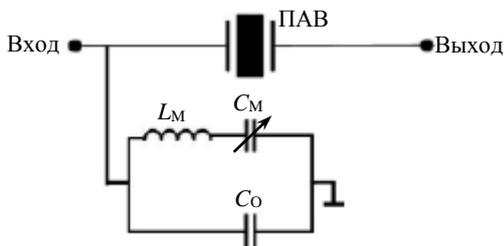


Рис. 7. Схема гибридного лестничного фильтра, состоящего из ПАВ-резонатора и LC-резонатора [34]

В [35] предложен гибрид, состоящий из перестраиваемого LC-контура в последовательной ветви и ПАВ-резонаторов в параллельных ветвях. Схема такого фильтра показана на рис. 8.

За счет изменения емкости LC-контура в последовательной ветви гибрида достигается изменение

центральной частоты фильтра. Этот гибридный фильтр с малыми вносимыми потерями в полосе пропускания (1–2 дБ) обладает широким диапазоном перестройки (64 МГц), который достигается за счет изменения емкости C_M , при этом он имеет небольшой уровень ослабления в полосе заграждения.

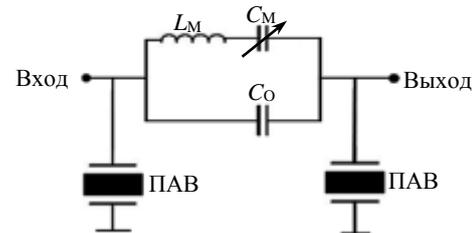


Рис. 8. Схема перестраиваемого гибрида с расположением ПАВ-фильтров в параллельных ветвях [35]

Таким образом, гибрид ПАВ-фильтра и LC-контура – это компактный фильтр с АЧХ полосно-пропускающего фильтра (ППФ). Он обладает малыми вносимыми потерями в полосе пропускания и широким диапазоном перестройки. Эти фильтры характеризуются небольшим ослаблением в полосе заграждения. Проблема низкой избирательности легко решается каскадированием звеньев. Совместно либо взамен каскадирования возможно использование парного размещения резонаторов в звеньях, что позволяет увеличить уровень внеполосного подавления. Однако стоит обратить внимание, что при этом сужается полоса пропускания фильтра.

Гибрид модального фильтра и защитной меандровой линии

Отдельным направлением гибридизации фильтров являются гибриды новых устройств, функционирующих по технологии модальной фильтрации, которые активно исследуются в ТУСУРе. Такие устройства называются МФ и защитная МЛ, в [36] приведено качественное сравнение их возможностей. Принцип их работы заключается в разложении во временной области помехового СКИ большой амплитуды на импульсы меньшей амплитуды из-за разности задержек мод, распространяющихся в линии. Эффект разложения СКИ достигается в структурах с неоднородным диэлектрическим заполнением, что позволяет получить разные скорости распространения для каждой моды при постоянстве поперечного сечения. Так, МЛ не подразумевает использование резисторов, обладает вдвое большими задержками при прочих равных с МФ условиях. МЛ способна раскладывать СКИ даже в однородном диэлектрике за счет импульса перекрестной наводки. МЛ с воздушным заполнением имеет единичный коэффициент передачи на всех частотах. В МФ необходимо наличие пассивных проводников, и он обладает большей частотой среза, чем МЛ с неоднородным диэлектриком. При этом в МЛ вход и выход не разнесены в пространстве, поэтому при определенных условиях помеха может миновать устройство защиты. Гибридное соединение МФ и МЛ позволяет добиться улучшенных защитных характери-

стик, а именно может увеличить ослабление СКИ (за счет разложения в МЛ каждого импульса с выхода МФ), при сравнительно небольшом увеличении массогабаритных показателей конечного устройства.

В [37] проводится апробация возможности разложения СКИ в гибриде 3-проводного МФ и 2-проводной МЛ, при этом достигается ослабление в 9,8 раза. В работе [38], где представлен гибрид 5-проводного микрополоскового МФ и витка 2-проводной МЛ с торцевой связью, достигнуто большее ослабление за счет изменения количества проводников и параметров поперечных сечений. Поперечные сечения и схема электрических соединений приведены на рис. 9 и 10.

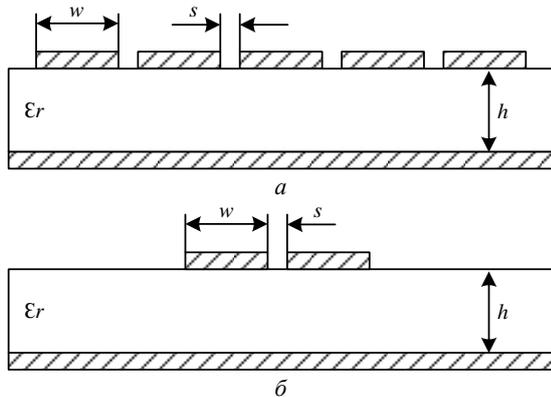


Рис. 9. Поперечные сечения 5-проводного МФ (а) и 2-проводной МЛ с торцевой связью (б) [37]

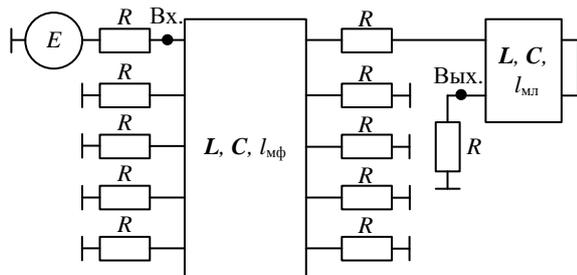


Рис. 10. Схема электрических соединений 5-проводного МФ и 2-проводной МЛ с торцевой связью [37]

В результате модального разложения СКИ на выходе гибридного устройства, состоящего из МФ (рис. 9, а) и МЛ (рис. 9, б), на импульсы меньшей амплитуды, коэффициент ослабления СКИ составил 26,6 раза относительно половины ЭДС.

Также известно исследование [39], где рассматривается разложение СКИ в гибриде, состоящего из 4-проводного МФ и витка 2-проводной МЛ с лицевой связью. Поперечные сечения и схема электрических соединений 4-проводного МФ и МЛ с лицевой связью приведены на рис. 11 и 12 соответственно.

При использовании такого гибрида коэффициент ослабления СКИ (относительно половины ЭДС) в структуре с 4-проводным МФ составил 11,92 раза.

Таким образом, гибрид МФ и МЛ является структурой, состоящей из проводников, расположенных в неоднородном диэлектрическом заполнении, которая обладает формой АЧХ ФНЧ и способна

осуществлять модальную фильтрацию. Такой гибрид обладает широкой полосой частот до десятков и сотен МГц.

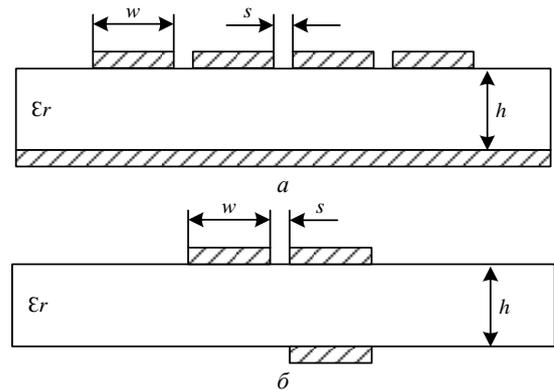


Рис. 11. Поперечные сечения 4-проводного МФ (а) и 2-проводной МЛ с лицевой связью (б) [39]

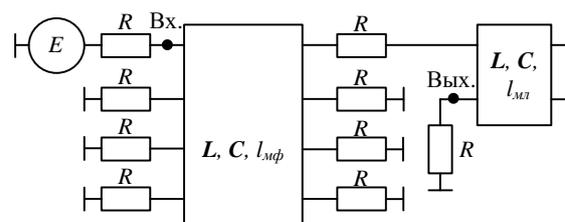


Рис. 12. Схема электрических соединений 4-проводного МФ и 2-проводной МЛ с лицевой связью [39]

Слабые избирательные свойства гибрида легко компенсируются за счет каскадирования или использования материалов с большими значениями диэлектрической проницаемости. Такие гибриды могут быть интегрированы в ПП электронного устройства и могут функционировать даже в сложных условиях эксплуатации. Из-за своих конструктивных особенностей в таком фильтре вероятность поломки сводится к минимуму.

Гибрид модального фильтра и пассивного фильтра на дискретных элементах

В системах питания современных РЭС присутствуют помехи как низкой, так и высокой частоты. ПФ на дискретных компонентах, спроектированные на небольшую частоту среза АЧХ, наиболее часто применяются в таких системах. Однако они обладают паразитными параметрами, вследствие чего не способны обеспечивать требуемое ослабление при воздействии СКИ. МФ эффективно подавляют СКИ, но обладают широкой полосой пропускания. Для обеспечения эффективного подавления кондуктивных помех, включая СКИ, применяют гибридные фильтры, состоящие из ПФ на дискретных элементах, в частности, LC-фильтра, и МФ. Совместное использование МФ и LC-фильтров позволяет получить АЧХ необходимой формы и обеспечить требуемое ослабление СКИ. Данное устройство применяется для защиты цепей питания, а также радиочастотных цепей РЭС, восприимчивых к импульсным помехам.

Показана возможность гибридного включения фильтра электромагнитных помех (ЭМП) на LC-

компонентах и МФ. Электрическая принципиальная схема такого гибрида показана на рис. 13, а на рис. 14 показано поперечное сечение МФ. В данном гибриде к одному из полюсов фильтра ЭМП подключен МФ, при этом способность ослаблять помеху рассматривается в синфазном и дифференциальном режимах. В МФ помеха в одном из полюсов питания раскладывается на последовательность импульсов при условии, если ее длительность незначительно больше разности задержек мод. В синфазном режиме на помеху оказывают влияние синфазные конденсаторы и синфазный дроссель. В дифференциальном режиме на помеху влияют лишь конденсаторы.

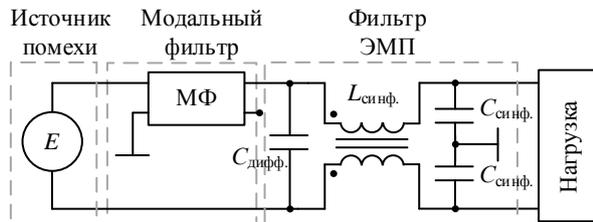


Рис. 13. Схема электрическая принципиальная гибрида МФ и ПФ

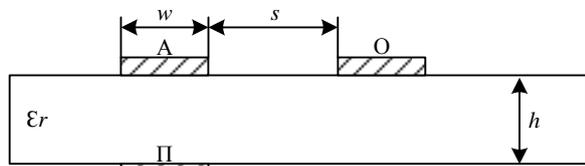


Рис. 14. Поперечное сечение МФ

При прохождении только фильтра ЭМП СКИ длительностью 1 нс ослабляется в 2,65 раза, а при прохождении через гибриды, состоящий из фильтра ЭМП и МФ, – в 8,18 раза.

В [40] выполнено исследование, где в качестве гибрида рассматривается соединение фильтра ЭМП, показанного на рис. 15, а, и двух отдельных МФ, представленных на рис. 15, б. Один МФ подключен в верхнее, а другой в нижнее плечо фильтра ЭМП, как показано на рис. 16. Помеха ослабляется в каждом из МФ при условии, если ее длительность незначительно больше разности задержек мод. Затем в синфазном режиме помеху ослабляет синфазный дроссель и LC-звенья фильтра. В дифференциальном режиме помеху ослабляют только LC-звенья фильтра. Комбинация звеньев изменяется в зависимости от режима помехи.

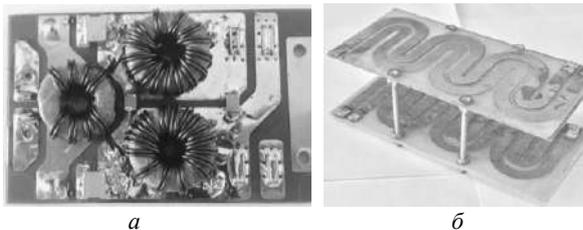


Рис. 15. Макеты МФ (а) и фильтра ЭМП (б) [41]

Частота среза такого гибрида составляет 8 кГц для дифференциального и 70 кГц для синфазного

режимов. При воздействии СКИ длительностью 700 пс (по уровню 0,5) амплитуда СКИ на выходе гибрида уменьшается в 84 раза в дифференциальном и 140 раз в синфазном режимах.

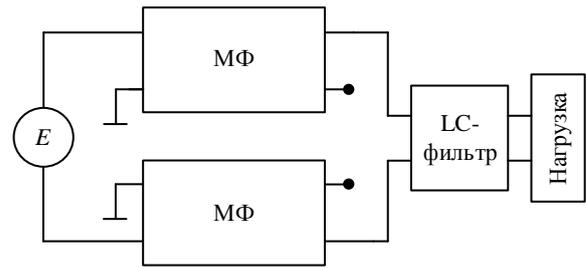


Рис. 16. Схема гибридного фильтра из фильтра ЭМП и двух МФ [41]

Представлено гибридное устройство защиты, состоящее из 4-проводного МФ, оптимизированного для ослабления СКИ в синфазном, дифференциальном режимах, и LC-фильтра. Поперечное сечение МФ приведено на рис. 17, а электрическая принципиальная схема гибрида – на рис. 18. Помеха независимо от режима, распространяясь вдоль МФ, раскладывается на последовательность импульсов меньшей амплитуды, если ее длительность меньше разности задержек мод. Затем в синфазном режиме токи, протекающие через обмотки синфазного дросселя, индуцируют магнитные потоки одной направленности, в результате чего растет индуктивное сопротивление синфазного дросселя, а в дифференциальном режиме эти токи компенсируют друг друга, не приводя к насыщению магнитопровода. Также на помеху в обоих режимах воздействуют LC-звенья фильтра, образуемые катушками индуктивности и конденсаторами.

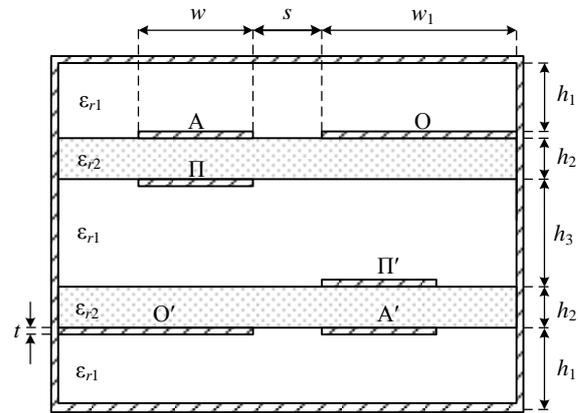


Рис. 17. Поперечное сечение 4-проводного МФ

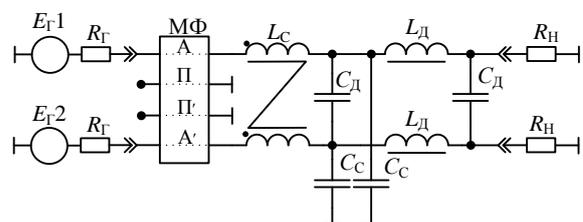


Рис. 18. Электрическая принципиальная схема гибридного устройства защиты

Частота среза АЧХ такого гибрида составляет 15 кГц для дифференциального и 12 кГц для синфазного режимов. При воздействии СКИ (ЭДС 1 В) максимальное напряжение помехи на выходе гибрида составляет 30 мВ для дифференциального и 23 мВ – для синфазного режимов. Вносимые потери равны –24,4 и –26,7 дБ для дифференциального и синфазного режимов соответственно [41].

Таким образом, гибрид МФ и LC-фильтра является пассивным фильтром с частотной избирательностью, которая, в основном, определяется LC-фильтром, и способен осуществлять модальную фильтрацию. Такой фильтр обычно имеет полосу пропускания до единиц и десятков кГц. За счет применения МФ в составе гибрида удается скомпенсировать АЧХ выше частоты среза LC-фильтра, тем самым увеличив ослабление высокочастотных помех. Гибрид обладает небольшими размерами, а отсутствие полупроводниковых приборов в его составе значительно повышает надежность. Эти свойства

позволяют использовать такой фильтр в критичных областях с высокими требованиями к электрическим характеристикам и надежности фильтра.

Сравнительный анализ гибридных фильтров

Использование устройств с различными принципами работы позволяет существенно расширить возможности защиты от кондуктивных помех. Так гибридные фильтры являются усовершенствованными устройствами защиты, свойства которых позволяют использовать их в широком диапазоне областей применения. Их можно сгруппировать по следующим признакам: область применения, тип частотной характеристики, уровень внеполосного ослабления, диапазон рабочих частот, максимально допустимый уровень помехи, надежность, стоимость готового изделия, сложность проектирования и трудность его интеграции в готовое оборудование. Для наглядного сравнения возможностей гибридных фильтров результаты обзора сведены в таблицу.

Сравнение гибридных фильтров

Параметр/тип гибрида	АФ и ПФ	ПАВ и LC	МФ и МЛ	МФ и LC
Область применения	Цепи питания РЭС	Радиочастотные цепи	Радиочастотные и цепи питания РЭС	Цепи питания РЭС и низкочастотные интерфейсы
Тип частотной характеристики	ФНЧ*	ППФ	ФНЧ	ФНЧ
Уровень внеполосного ослабления	От десятков до сотни дБ	От единиц до десятков дБ	От единиц до десятков дБ	От десятков до сотни дБ
Полоса пропускания фильтра	От десятков кГц до десятков МГц	От десятков до сотен МГц	От десятков до сотен МГц	От единиц до десятков кГц
Допустимый уровень помех**	Средний	Средний	Высокий	Высокий
Надежность	Низкая	Средняя	Высокая	Высокая
Стоимость изделия	Высокая	Средняя	Низкая	Средняя
Сложность проектирования	Средняя	Средняя	Низкая	Низкая
Сложность интеграции в РЭС	Средняя	Низкая	Низкая	Средняя

* Не оказывают должного ослабления на низких частотах из-за способа детектирования помехи.

**Уровень помех при котором фильтр сохраняет свою работоспособность

Из таблицы видно, что большинство гибридных фильтров подходят для использования в цепях питания РЭС. Между тем использование гибридов на основе ПАВ-фильтра и LC-контура в цепях питания нецелесообразно из-за его АЧХ ППФ, а использование в радиочастотных цепях ограничено полосой полезного сигнала, который может пройти через фильтр без искажений.

По типу частотной характеристики все представленные гибриды являются ФНЧ, кроме гибридного соединения ПАВ-фильтра и LC-контура, который является ППФ. Также стоит обратить внимание, что гибриды АФ и ПФ лишь незначительно ослабляют помеху, чья частота не превышает единицы герц. Эта особенность обусловлена способом детектирования помехи и может быть устранена, если сенсор АФ будет гальванически соединен с источником помех.

По уровню внеполосного ослабления наибольшим ослаблением обладают гибриды МФ и LC-фильтра, а также АФ и ПФ. Гибриды МФ и МЛ и ПАВ-фильтра и LC-фильтра обладают меньшим ослаблением, однако существует возможность увеличения ослабления за счет каскадирования звеньев и использования материалов с большей диэлектрической проницаемостью в случае с МФ и МЛ.

По полосе пропускания фильтра стоит выделить гибриды МФ и LC-фильтра и АФ и ПФ. Они обладают наименьшими значениями частоты среза. Гибриды МФ и МЛ и ПАВ-фильтра и LC-фильтра обладают более широкой полосой.

По допустимому уровню помех гибриды МФ и МЛ и МФ и LC-фильтра наиболее предпочтительны, так как они могут продолжить нормально функционировать после воздействия в несколько тысяч вольт. В гибриде ПАВ-фильтра и LC-фильтра ограничивающим фактором является расстояние между

проводниками на подложке пьезокристалла, а в гибриде АФ и ПФ – напряжением работы активного элемента фильтра.

По надежности наименее надежным считается гибрид АФ и ПФ. Из-за наличия активных компонентов он не способен выдерживать длительные перегрузки, изменение температуры и воздействие радиации. Гибриды МФ и LC-фильтра и МФ и МЛ из-за простоты конструкции способны работать в самых жестких условиях эксплуатации.

Гибрид МФ и МЛ производится в рамках технологического процесса производства ПП, из-за чего обладает наименьшей стоимостью. В гибриде МФ и LC-фильтра добавляется стоимость компонентов LC-фильтра. В гибриде ПАВ-фильтра и LC-фильтра стоимость определяет материал пьезокристалла и сложность топологии ПАВ-фильтра, а в гибриде АФ и ПФ – номенклатура используемых компонентов.

По сложности проектирования самым сложным является гибрид АФ и ПФ, затем гибрид ПАВ-фильтра и LC-фильтра. Гибриды МФ и LC-фильтра, а также МФ+МЛ являются менее сложными в проектировании, чем перечисленные гибриды.

По сложности интеграции в существующую РЭС гибриды ПАВ-фильтра и LC-фильтра и МФ и МЛ наиболее предпочтительны, потому что первый не занимает много места, а второй может быть интегрирован в ПП существующего устройства. Для гибрида МФ и LC-фильтра необходимо выделение дополнительного пространства, а для гибрида АФ и ПФ – еще и размещение детекторов помех, что допускает внесение изменений в конструкцию уже существующего устройства.

Заключение

Таким образом, выполнен обзор современного состояния исследований в области гибридных фильтров, защищающих от кондуктивных помех. Приведены схемы, кратко описан принцип их работы и определена область применения. Проведен сравнительный анализ каждого из устройств с обсуждением их достоинств и недостатков. Материал может быть полезен при проектировании РЭС и помочь в организации эффективной защиты от кондуктивных помех.

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

Литература

- ГОСТ Р 51318.11–2006. Совместимость технических средств электромагнитная. Промышленные, научные, медицинские и бытовые (ПНМБ) высокочастотные устройства. Радиопомехи индустриальные. Нормы и методы измерений. – М.: Стандартинформ, 2007. – 39 с.
- Воздействие высокоэнергетичных космических протонов и ионов на элементы бортовой аппаратуры космических аппаратов / Н.Г. Чеченин, А.Г. Кадменский, Х.А. Мотавех, М.И. Панасюк // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2012. – № 4. – С. 17–29.
- ГОСТ Р 50628–2000. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость машин электронных вычислительных персональных к электромаг-

нитным помехам. Требования и методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2001. – 11 с.

- ГОСТ Р 51317.4.1–2000. Совместимость технических средств электромагнитная. Испытания на помехоустойчивость. Виды испытаний. – М.: Стандартинформ, 2007. – 16 с.

- Loborev V.M. The modern research problems. Plenary lecture // Proc. of AMEREM Conference. – Albuquerque, USA, 1996. – P. 121–127.

- Tihanyi L. EMC in power electronics. – N.J.: IEEE Press, 1995. – 415 p.

- ГОСТ РВ 6601-001–2008. Оборудование бортовое авиационное. Общие требования к восприимчивости при воздействии электромагнитных помех и методики измерения. – М.: Стандартинформ, 2009. – 49 с.

- Шостак А. Реверберационная камера для испытаний на восприимчивость к радиочастотному электромагнитному полю. Проблемы использования // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2021. – № 4. – С. 130–135.

- Mazzola S. MIL-STD-461: The basic military EMC specification and it's evolution over the years // 2009 IEEE long island systems, applications and technology conference. – Farmingdale, NY, USA, 2009. – P. 1–5.

- Фоминич Э.Н. Электромагнитный терроризм. Новая угроза для информационно-управляющих систем / Э.Н. Фоминич, Д.Р. Владимиров // Военный инженер. – 2016. – № 2. – С. 10–17.

- Сидоров А.В. Электромагнитный терроризм как источник угроз инфокоммуникационным системам связи и управления / А.В. Сидоров, О.И. Бокова, Н.С. Хохлов // Вестник Воронежского института высоких технологий. – 2014. – № 13. – С. 106–109.

- Song W. Transfer function measurement for automotive intentional electromagnetic interference / W. Song, Y. Zhong, C. Kim, C. Park, C. Hwang // 2020 IEEE International symposium on electromagnetic compatibility & signal/power integrity (EMCSI). – Reno, NV, USA, 2020. – P. 276–281.

- Hamamah F. Concerns on the risk of Malaysian civil and defense systems due to intentional electromagnetic interference / F. Hamamah, W.W. Ahmad, C. Gomes, M.M. Isa, M.J. Homam // 2019 IEEE Asia-Pacific conference on applied electromagnetics (APACE). – Melacca, Malaysia, 2019. – P. 1–6.

- Dawson J.F. Intentional electromagnetic interference effects in cyber-physical systems // Proceedings of EMC UK 2015. – UK, 2015. – P. 1–6.

- Kumar V. Intentional electromagnetic interference and science of protection mechanism / V. Kumar, K.K. Jha // 8th International conference on electromagnetic interference and compatibility. – Chennai, India, 2003. – P. 155–158.

- Nishiyama H. Fundamental study on influence of intentional electromagnetic interference on IC communication / H. Nishiyama, T. Okamoto, Y. Kim, D. Fujimoto, Y.I. Hayashi // 2019 12th International workshop on the electromagnetic compatibility of integrated circuits (EMC Compo). – Hangzhou, China, 2019. – P. 201–203.

- ГОСТ Р 51317.1.5–2009. Совместимость технических средств электромагнитная. Воздействия электромагнитные большой мощности на системы гражданского назначения. Основные положения. – М.: Стандартинформ, 2009. – 40 с.

- Фоминич Э.Н. Электромагнитный терроризм / Э.Н. Фоминич, Д.Р. Владимиров, В.Н. Парахин // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2013. – № 1-2 (55-56). – С. 112–116.

19. Mora N. Study and classification of potential IEMI sources / N. Mora, F. Vega, G. Lugrin, F. Rachidi, M. Rubinstein // System and assessment notes. – 2014. – No. 41. – 92 p.
20. EN 55022 CISPR 22 Information Technology Equipment – Radio disturbance characteristics – Limits and methods of measurement. – United Kingdom, London: British Standards Institution. – 2006. – 10 p.
21. Гизатуллин З.М. Помехоустойчивость средств вычислительной техники внутри зданий при широкополосных электромагнитных воздействиях. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2012. – 254 с.
22. Кечиев Л.Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры. – М.: ООО «Группа ИДТ», 2007. – 616 с.
23. Gazizov A.T. UWB Pulse Decomposition in Simple Printed Structures / A.T. Gazizov, T.R. Gazizov // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2016. – Vol. 58, No. 4. – P. 1136–1142.
24. Экспериментальное подтверждение возможности защиты радиоэлектронной аппаратуры от сверхкороткого импульса за счет его разложения в С-секции с лицевой связью / А.В. Носов, Р.С. Суворцев, А.М. Заболоцкий, Т.Т. Газизов // Доклады ТУСУР. – 2016. – Т. 19, № 3. – С. 47–50.
25. Экспериментальные исследования зеркально-симметричного модального фильтра во временной и частотной областях / Е.С. Жечев, Е.Б. Черникова, А.О. Белосусов, Т.Р. Газизов // Системы управления, связи и безопасности. – 2019. – № 2. – С. 162–179.
26. Костелецкий В.П. Разработка сильноточного модального фильтра с уменьшенной массой для силовой шины электропитания космического аппарата / В.П. Костелецкий, Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий // Матер. докладов междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления». – Томск, 2020. – С. 294–296.
27. A multi-function common mode choke based on active CM EMI filters for AC/DC power converters / D. Liyu, C. Wenjie, Y. Xu, Z. Minghua, Y. Yang, W. Rui // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 43534–43546.
28. Design of active EMI filters with the integrated passive component / L. Dai, W. Chen, Y. Yang, R. Wang, X. Yang // 2019 IEEE applied power electronics conference and exposition (APEC). – Anaheim, CA, USA, 2019. – P. 640–643.
29. Chen W. A novel hybrid common-mode EMI filter with active impedance multiplication / W. Chen, X. Yang, Z. Wang // IEEE Transactions on industrial electronics. – 2010. – Vol. 58, No. 5. – P. 1826–1834.
30. Investigation of hybrid EMI filters for common-mode EMI suppression in a motor drive system / S. Wang, Y.Y. Mailliet, F. Wang, D. Boroyevich and R. Burgos // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2009. – Vol. 25, No. 4. – P. 1034–1045.
31. Ali M. Integrated hybrid EMI filter: Study and realization of the active part / M. Ali, E. Labouré, F. Costa // 2013 15th European conference on power electronics and applications (EPE). – Lille, France, 2013. – P. 1–8.
32. A hybrid EMI filter with ultra-wide bandwidth / W.C. Ho, C.K. Lee, X. Liu, P.K.W. Chan, S.Y.R. Hui, Y.S. Lee // 2008 Twenty-Third Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. – Austin, TX, USA, 2008. – P. 676–681.
33. Passive and active hybrid integrated EMI filters / J. Biela, A. Wirthmueller, R. Woespe, M.L. Heldwein, K. Raggl, J.W. Kolar // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2009. – Vol. 24, No. 5. – P. 1340–1349.
34. Веремеев И.В. Влияние параметров LC-резонатора на характеристики гибридного ПАВ+ LC лестничного фильтра // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность. – 2015. – № 2. – С. 21–25.
35. Веремеев И.В. Гибридный перестраиваемый лестничный фильтр на основе LC- и ПАВ-резонаторов // Матер. междунар. науч.-техн. конф. «Радиотехника, электроника и связь (РЭС–2015)». – Омск, 2015. – С. 413–418.
36. Газизов Т.Р. Сравнительный анализ двух видов новых устройств для защиты от электромагнитного терроризма // VII Регион. науч.-практ. конф. «Наука и практика: проектная деятельность – от идеи до внедрения», Томск, 15–30 ноября 2018. – С. 601–603.
37. Simulating hybrid protection against ultrashort pulse based on its modal decomposition / A.V. Nosov, A.O. Belousov, R.S. Surovtsev, T.R. Gazizov // Journal of Physics: Conference Series. – Vol. 1353, No. 012022. – P. 1–6.
38. Сирица В.А. Разложение сверхкороткого импульса в каскадно соединенных 5-проводном микрополосковом модальном фильтре и витке меандровой микрополосковой линии / В.А. Сирица, Р.С. Суворцев, А.В. Носов // Матер. докладов междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления». – Томск, 2020. – С. 321–324.
39. Kim G. Ultrashort pulse decomposition in hybrid protection devices based on the cascade-connected modal filter and meander line with broad-side coupling / G. Kim, A. Nosov, R. Surovtsev // 2021 IEEE 22nd International conference of young professionals in electron devices and materials (EDM). – Altai, Russia, 2021. – P. 163–166.
40. Хажибеков Р.Р. Многокаскадные модальные фильтры: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2019. – 202 с.
41. ГОСТ 13661–92. Совместимость технических средств электромагнитная. Пассивные помехоподавляющие фильтры и элементы. Методы измерения вносимого затухания. – М.: Стандартинформ, 1992. – 23 с.

Костелецкий Валерий Павлович

Аспирант каф. телевидения и управления (ТУ)
Томского государственного ун-та
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0003-1275-6406
Тел.: +7-952-163-49-93
Эл. почта: kosteletskiy.vp@gmail.com

Kosteletskii V.P.

Overview of hybrid filters for protection against conductive interference

Conductive interference can penetrate to electronic components of radio-electronic equipment (REE) through the conductors of signal and power circuits. To protect against conductive interference electrical filters are used. The main disadvantage of such a solution is that the electrical filter is a device designed for specific purposes and is often not suitable for related tasks. To ensure electromagnetic compatibility the joint use of electrical filters of different purposes is practiced, such a protection device is called a hybrid. The specific property of a hybrid is that the characteristics of the electrical filters used in its composition compensate for the disadvantages of each other. In this article a review and comparative analysis of hybrid interference filters is made, this review can be used in the design of REE and organization of effective protection from conducted interference.

Keywords: electromagnetic compatibility, protection devices, hybrid filter, ultrashort pulse, conductive interference, common mode, differential mode, modal filtration.

DOI: 10.21293/1818-0442-2021-25-1-37-47

References

1. State Standard 51318.11-2006. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Industrial, scientific, medical and domestic (ISMD) high-frequency equipment. Radio disturbance. Limits and methods of measurement. Moscow, Standartov Publ., 2007. 39 p. (in Russ.).
2. Chechenin N.G., Kadenskii A.G., Motawekh H., Panasyuk M.I. [Impact of high energy cosmic rays of protons and ions on elements of on]. *Journal of Surface Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques (abbreviated title: J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech.*, 2012, no. 4, pp. 17–29 (in Russ.).
3. State Standard 50628-2000. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Immunity of personal computers to electromagnetic disturbances. Requirements and test methods. Moscow, Standartov Publ., 2001. 11 p. (in Russ.).
4. State Standard 51317.4.1-2000. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Immunity tests. Overview of the test. Moscow, Standartov Publ., 2007. 11 p. (in Russ.).
5. Loborev V.M. The modern research problems. Plenary lecture. Proc. of AMEREM Conference, Albuquerque, 1996, pp. 121–127.
6. Tihanyi L. EMC in power electronics, N.J.: IEEE Press, 1995, 415 p.
7. State Standard 6601-001-2008 On-board aviation equipment. General requirements for susceptibility to electromagnetic interference and control methods. Moscow, Standartov Publ., 2009. 49 p. (in Russ.).
8. Shostak A. [Reverberation chamber for rf electromagnetic field susceptibility testing. Usage problems]. *Electronics: Science, Technology, Business*, 2021, no. 4, pp. 130–135 (in Russ.).
9. Mazzola S. MIL-STD-461: The basic military EMC specification and its evolution over the years. *2009 IEEE Long Island Systems, Applications and Technology Conference*, Farmingdale, NY, USA, 2009, pp. 1–5.
10. Fominich E.N., Vladimirov D.R. [Electromagnetic terrorism. New threat to information and control systems]. *Military Engineer*, 2016, no. pp. 10–17 (in Russ.).
11. Sidorov A.V., Bokova O.I., Hohlov N.S. [Electromagnetic terrorism as a source of threats of infocommunication communication and control systems]. *Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of Russia*, 2014, no. 13, pp. 106–109 (in Russ.).
12. Song W., Zhong Y., Kim C., Park C., Hwang C. Transfer function measurement for automotive intentional electromagnetic interference. *2020 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity (EMCSI)*, Reno, NV, USA, 2020, pp. 276–281.
13. Hamamah F., Ahmad W.W., Gomes C., Isa M.M., Homam M.J. Concerns on the risk of Malaysian civil and defense systems due to intentional electromagnetic interference. *2019 IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics (APACE)*, Reno, NV, USA, 2019, pp. 1–6.
14. Dawson J.F. Intentional electromagnetic interference effects in cyber-physical systems. *Proceedings of EMC UK 2015*, UK, 2015, pp. 1–6.
15. Kumar V., Jha K.K. Intentional electromagnetic interference and science of protection mechanism. *8th International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility*, Chennai, India, 2003, pp. 155–158.
16. Nishiyama H., Okamoto T., Kim Y., Fujimoto D., Hayashi Y.I. Fundamental study on influence of intentional electromagnetic interference on IC communication. *2019 12th International Workshop on the Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits (EMC Compo)*, Hangzhou, China, 2019, pp. 201–203.
17. State Standard 51317.1.5-2009 Electromagnetic compatibility of technical equipment. High power electromagnetic influences on civil systems. Basic provisions. Moscow, Standartov Publ., 2009. 40 p. (in Russ.).
18. Fominich E.N., Vladimirov D.R., Parahin Y.N. [Electromagnetic terrorism]. *Military Engineer. Scientific and Technical Journal. Counter-terrorism Engineering Devices. Issue 16*, 2013, no. 1–2(55-56), pp. 112–116 (in Russ.).
19. Mora N., Vega F., Lugin G., Rachidi F., Rubinstein M. Study and classification of potential IEMI sources. *System Design and Assessment Notes*, 2014, no. 41, pp. 1–92.
20. EN 55022 CISPR 22 Information Technology Equipment - Radio disturbance characteristics – Limits and methods of measurement. United Kingdom, London: British Standards Institution, 2006, 10 p.
21. Gizatullin Z. M. *Pomekhoustojchivost' sredstv vychislitel'noj tekhniki vnutri zdaniy pri shirokopolosnyh elektromagnitnyh vozdeystviyah. Monografiya* [The Immunity of Computer Equipment inside Buildings with Broadband Electromagnetic Effects. Monography]. Kazan, Kazan State Technical University Publ., 2012. 254 p. (in Russ.).
22. Kechiev L.N. *Proektirovanie pechatnyh plat dlya cifrovoj bystrodeystvuyushchej apparatury* [Designing printed circuit boards for digital high-speed equipment]. Moscow, «Gruppa IDT» LTD, 2007. 616 p. (in Russ.).
23. 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.
24. Nosov A.V., Surovtsev R.S., Zabolotsky A.M., Gazizov T.T. Experimental confirmation of possibility of the electronic equipment protection against an ultrashort pulse by means of its decomposition in the C-section with broad-side coupling. *Proceedings of TUSUR University*, 2016, vol. 19, no. 3, pp. 47–50 (in Russ.).
25. Zhechev Y.S., Chernikova E.B., Belousov A.O., Gazizov T.R. Experimental research of a reflection symmetric modal filter in the time and frequency domains. *Systems of Control, Communication and Security*, 2019, no. 2, pp. 162–179 (in Russ.).
26. Kosteleckii V.P., Gazizov T.R., Zabolocky A.M. *Razra-botka sil'notochnogo modal'nogo fil'tra s umen'shennoj massoj dlya silovoj shiny elektropitaniya kosmicheskogo apparata* [Development of a high-current modal filter with reduced mass for the power bus of spacecraft power supply]. *Proceedings of International Scientific Conference on Electronic Devices and Control Systems*. Tomsk, Russia, 2020, pp. 294–296 (in Russ.).
27. Dai L., Wenjie C., Xu Y., Minghua Z., Yang Y., Rui W. A multi-function common mode choke based on active CM EMI filters for AC/DC power converters. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 43534–43546.
28. Dai L., Chen W., Yang Y., Wang R. and Yang X. Design of active EMI filters with the integrated passive component. *2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Anaheim, CA, USA, 2019, pp. 640–643.
29. Chen W., Yang X., Wang Z. A novel hybrid common-mode EMI filter with active impedance multiplication. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, vol. 58, no. 5, pp. 1826–1834.

30. Wang S., Yoann Y.M., Fei W., Dushan B., Rolando B. Investigation of hybrid EMI filters for common-mode EMI suppression in a motor drive system. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2009, vol. 25, no. 4, pp. 1034–1045.
31. Ali M., Labouré E., Costa F. Integrated hybrid EMI filter: Study and realization of the active part. *2013 - 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*, Lille, France, 2013, pp. 1–8.
32. Ho W.C., Lee C.K., Liu X., Chan P.K.W., Hui S.Y.R., Lee Y.S. A hybrid EMI filter with ultra-wide bandwidth. *2008 Twenty-Third Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Austin, TX, USA, 2008, pp. 676–681.
33. Biela J., Wirthmueller A., Waespe R., Heldwein M.L., Raggl K. and Kolar J.W. Passive and active hybrid integrated EMI filters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2009, vol. 24, no. 5, pp. 1340–1349.
34. Veremeev I.V. *Vliyaniye parametrov LC-rezonatora na harakteristiki gibridnogo PAV+ LC lestnichnogo fil'tra* [Influence of LC-resonator parameters on the characteristics of a hybrid SAW+LC ladder filter]. *Rossiia molodaya: peredovye tekhnologii–v promyshlennost'* [Young Russia: Advanced Technologies in Industry], 2015, no. 2, pp. 21–25 (in Russ.).
35. Veremeyev I.V. Hybrid tunable ladder type filters with LC and saw resonators. *Proceedings of Radio Engineering, Electronics and Communications*. Omsk, Russia, 2015, pp. 413–418 (in Russ.).
36. Gazizov T.R. *Sravnitel'nyj analiz dvuh vidov novykh ustroystv dlya zashchity ot elektromagnitnogo terrorizma* [Comparative analysis of two types of new devices for protection against electromagnetic terrorism]. VII Regional'naya nauchno-prakticheskaya konferenciya «Nauka i praktika: proektnaya deyatel'nost' – ot idei do vnedreniya» [VII Regional Scientific and Practical Conference «Science and Practice: Project Activities – from idea to implementation»]. Tomsk, Russia, 2018, pp. 601–603 (in Russ.).
37. Nosov A.V., Belousov A.O., Surovtsev R.S. and Gazizov T.R. Simulating hybrid protection against ultrashort pulse based on its modal decomposition. *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1353, no. 012022, pp. 1–6.
38. Siritsa V.A., Surovcev R.S., Nosov A.V. *Razlozhenie sverh-korotkogo impul'sa v kaskadno soedinennoy 5-provodnom mikropoloskovom modal'nom fil'tre i vitke meandrovoj mikropoloskovoy linii* [Decomposition of an ultrashort pulse in a cascade-connected five-conductor microstrip modal filter and a turn of a meander microstrip line]. *Proceedings of International Scientific Conference on Electronic Devices and Control Systems*. Tomsk, Russia, 2020, pp. 321–324 (in Russ.).
39. Kim G., Nosov A., Surovtsev R. Ultrashort pulse decomposition in hybrid protection devices based on the cascade-connected modal filter and meander line with broad-side coupling. *2021 IEEE 22nd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)*, Altai, Russia, 2021, pp. 163–166.
40. Khazhibekov R.R. *Mnogokaskadnye modalnye fil'try* [Multi-cascade modal filters]. Cand. diss. Tomsk, 2019, 202 p. (in Russ.).
41. State Standard 13661-92. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Passive filters and elements for interference suppression. Methods of inserted damping measuring. Moscow, Standartov Publ., 1992, 23 p. (in Russ.).

Valerii P. Kosteletskii

Postgraduate student, Department of Television and Control, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0003-1275-6406
Phone: +7-952-163-49-93
Email: kosteletskiy.vp@gmail.com