

УДК 621.372

Шифр специальности ВАК: 2.2.14

С.В. Власов

Обзор современных средств защиты интегральных схем от кондуктивных электромагнитных помех

Актуальность. Снижение питающих напряжений и рост тактовых частот современных интегральных схем повышают их уязвимость к кондуктивным электромагнитным помехам, что делает задачу эффективной защиты критически важной для обеспечения надёжности электронных систем. **Цель исследования.** Систематизация и сравнительный анализ современных средств защиты интегральных схем от кондуктивных электромагнитных помех с выявлением наиболее перспективных направлений их развития. **Методы.** Сравнительный анализ опубликованных технических решений, классификация по принципу действия, типу компонентов и уровню интеграции, а также сравнение характеристик рассматриваемых устройств. **Научная новизна.** Предложена классификация средств защиты интегральных схем от электромагнитных помех, охватывающая принцип действия, тип компонентов и уровень интеграции одновременно. **Результаты.** Установлено, что пассивные фильтры обеспечивают высокую надёжность, однако ограничены на высоких частотах и в условиях миниатюризации; активные фильтры обладают адаптивностью, но уязвимы к мощным воздействиям и требуют дополнительного энергопотребления; гибридные решения представляют наиболее сбалансированный подход, сочетая широкополосность и адаптивность при приемлемой устойчивости к внешним воздействиям. **Практическая значимость.** Результаты работы могут применяться при проектировании помехозащищённых интегральных схем для телекоммуникационного оборудования, систем радиосвязи, авиакосмической и военной электроники, а также служить основой для выбора архитектуры фильтра на этапе схемотехнического проектирования.

Ключевые слова: активные фильтры, гибридные фильтры, интегральная схема, помехозащита, пассивные фильтры, электромагнитная помеха, электромагнитная совместимость.

DOI: 10.21293/1818-0442-2026-29-1-7-19

Введение

Современные интегральные схемы (ИС) функционируют при существенно сниженных уровнях питающих напряжений и возрастающих тактовых частотах, что делает их все более чувствительными к внешним электромагнитным воздействиям. Миниатюризация структур и повышение степени интеграции приводят к тому, что даже кратковременные импульсные электромагнитные помехи (ЭМП) способны вызывать деградацию характеристик или полный отказ электронных устройств [1–3]. Дополнительную уязвимость создаёт внедрение высокоскоростных интерфейсов передачи данных, характеризующихся малым временем нарастания сигналов и высокими уровнями электромагнитных излучений, что приводит к увеличению уровня как кондуктивных, так и излучаемых помех [4]. В совокупности эти факторы требуют разработки эффективных и миниатюрных средств защиты, способных обеспечивать электромагнитную совместимость без ухудшения электрических характеристик и технологической совместимости ИС нового поколения.

Источники кондуктивных ЭМП могут быть как природные, так и преднамеренные, сопровождающиеся резкими изменениями электрических и магнитных полей. К основным видам таких воздействий относятся электростатические разряды [5], быстрые переходные процессы в коммутационных цепях [6], а также грозовые [7] и преднамеренно генерируемые

электромагнитные импульсы [8]. Электростатические разряды возникают вследствие накопления и мгновенного высвобождения заряда на поверхностях полупроводниковых структур, что приводит к возникновению кратковременных, но чрезвычайно мощных импульсов напряжения и тока, способных вызвать деградацию или пробой тонких оксидных слоёв в элементах ИС.

Согласно стандарту JESD22-A114F [9], импульс электростатического разряда по модели человеческого тела характеризуется амплитудой тока до 2 А и длительностью фронта порядка 10 нс, что формирует широкополосный спектр с энергией до нескольких сотен мегагерц. Быстрые переходные процессы в цепях питания и силовых преобразователях обусловлены высокой скоростью переключения полупроводниковых приборов. Эта скорость характеризуется малым временем нарастания амплитуд токов и напряжений, что, в свою очередь, формирует широкий спектр ЭМП.

В соответствии с МЭК 61000-4-4 [10], такие импульсы имеют амплитуду напряжения до 4 кВ при параметрах 5/50 нс с преобладающей спектральной плотностью в диапазоне частот 1–100 МГц. Естественные атмосферные разряды, в частности, молнии, способны индуцировать значительные токи в токопроводящих элементах и линиях связи даже на удалённом расстоянии от эпицентра разряда; нормированный грозовой импульс формы 1,2/50 мкс по МЭК

61000-4-5 [11] отличается высокой амплитудой при относительно низкочастотном спектре с основной энергией на частотах до 1 МГц. Все указанные воздействия существенно различаются по амплитуде, времени нарастания сигнала и спектру частот, что определяет выбор метода фильтрации и достигаемое ослабление помехи на входных цепях ИС. На рис. 1 представлены осциллограммы токов и напряжений кондуктивных ЭМП.

Наиболее опасную категорию составляют преднамеренно генерируемые высокоинтенсивные электромагнитные импульсы, создаваемые специализированными мощными импульсными генераторами, целенаправленно применяемыми для дестабилизации электронных систем. Требования к характеристикам таких воздействий и методам испытаний на устойчивость к ним регламентируются стандартом MIL-STD-461G [13] для военной техники, а также стандартом МЭК 61000-4-36 [14], устанавливающим методы испытаний на устойчивость к высокоинтенсивным электромагнитным импульсам для гражданских систем. Все указанные воздействия характеризуются высокой амплитудой, малым временем нарастания сигнала и широкополосным спектром, что значительно осложняет их подавление традиционными средствами фильтрации. На рис. 2 представлено частотное распределение спектральной плотности естественных и искусственных ЭМП [12].

Проблема защиты от ЭМП актуальна не только в военной и аэрокосмической технике, где надёжность играет ключевую роль, но и в коммерческой электронике, включая телекоммуникационное оборудование, системы радиосвязи и т.д. [15–17]. При этом рост плотности компонентов повышает требования к электромагнитной совместимости и устойчивости ИС к ЭМП [18].

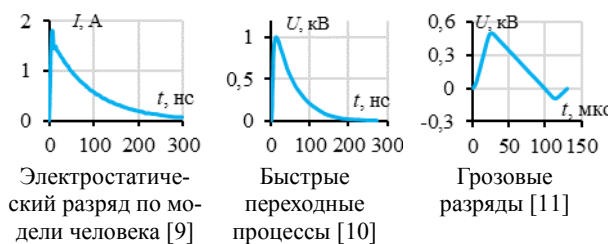


Рис. 1. Осциллограммы кондуктивных ЭМП

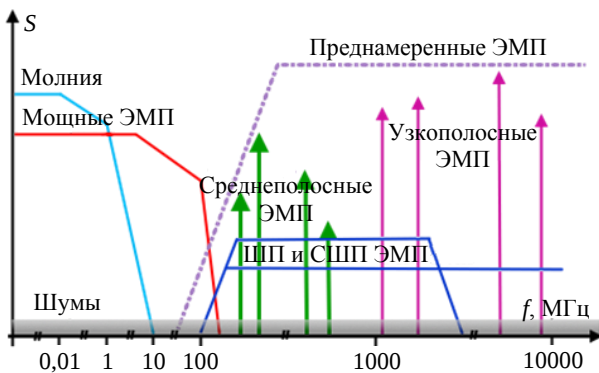


Рис. 2. Частотное распределение спектральной плотности естественных и искусственных ЭМП

Современные ИС представляют собой сложные и дорогостоящие устройства, отказ даже отдельных компонентов которых может привести к выходу из строя всей системы, поскольку их восстановление в условиях эксплуатации практически невозможно.

Для защиты ИС от кондуктивных ЭМП в настоящее время применяется широкий ряд решений, начиная от простейших фильтрующих элементов и заканчивая интегрированными активными схемами подавления. Существующие средства защиты могут быть классифицированы по нескольким ключевым признакам: по принципу действия, типу компонентов, месту интеграции.

Целью данной работы является анализ и систематизация современных средств ослабления кондуктивных ЭМП на уровне ИС, выявление ключевых компромиссов между эффективностью, степенью интеграции и энергопотреблением, а также определение наиболее перспективных направлений для дальнейших исследований. Классификация средств защиты ИС от ЭМП, предложенная автором на основе принципа действия, типа компонентов и уровня интеграции, показана на рис. 3.

Предложенная классификация построена по трём независимым признакам. Первый признак – принцип действия – отражает физический механизм воздействия на энергию ЭМП: её ослабление за счёт частотно-селективных свойств, отвод в землю или в обход защищаемого узла, либо поглощение и преобразование в тепло. Второй признак – тип используемых компонентов – разделяет средства защиты на пассивные, не требующие источника питания, активные, использующие полупроводниковые переходы для усиления и компенсации, и гибридные, совмещающие оба подхода. Третий признак – место расположения по отношению к ИС – определяет уровень интеграции защитного решения: внешнее исполнение на уровне печатной платы, размещение в корпусе или на подложке ИС либо непосредственно на кристалле.

Пассивные средства защиты

Наиболее распространённым средством защиты остаётся использование пассивных RLC -фильтров. Их задача заключается в ограничении спектра кондуктивных помех, поступающих на входные цепи ИС по цепям питания и сигнальным линиям, что обеспечивает ослабление синфазных и дифференциальных составляющих ЭМП и способствует поддержанию целостности питания с минимальным уровнем помех, воздействующих на чувствительные узлы ИС. Такие фильтры реализуются в виде Γ -, T - или Π -образных RLC -ячеек, топология которых определяет порядок и параметры фильтра в интегральном исполнении при заданной полосе подавления в требуемом диапазоне частот и крутизне характеристики затухания [19–27].

При включении пассивного фильтра непосредственно в сигнальную или питающую линию перед входными выводами ИС он создаёт частотно-зависимый импеданс, ослабляющий высокочастотные составляющие кондуктивной ЭМП до того, как они достигают чувствительных элементов схемы.



Рис. 3. Классификация средств защиты ИС от ЭМП

Принципиальным требованием к такому фильтру является сохранение целостности полезного сигнала в рабочей полосе частот при одновременном подавлении помех в полосе задерживания. Примером практической реализации данного подхода служит работа [19], в которой предложен пассивный фильтр на основе модифицированных Т-образных ячеек, интегрированный непосредственно в дифференциальные входные цепи высокоскоростного интерфейса ИС (рис. 4). В дифференциальном режиме фильтр обеспечивает передачу сигнала без искажений с постоянным групповым временем задержки до частоты 10 ГГц, тогда как в синфазном режиме достигается подавление кондуктивных помех не менее 10 дБ на частотах 1,6–4,7 ГГц. Схема реализована по технологии интегрированных пассивных устройств на кремниевой подложке и занимает площадь $1,0 \times 0,95 \text{ мм}^2$.

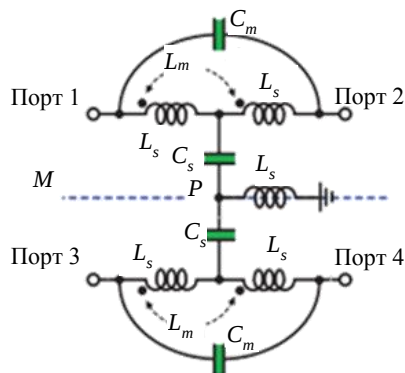


Рис. 4. Схема пассивного фильтра [19]

Однако эффективность пассивных решений ограничивается габаритами элементов, их паразитными параметрами и невозможностью динамической адаптации к спектру ЭМП. Существенным недостатком традиционных RLC -фильтров является их отражающий характер: в полосе задерживания фильтр представляет собой реактивную нагрузку с высоким импедансом, вследствие чего энергия помехи не поглощается, а отражается обратно к источнику воздействия, что может приводить к паразитным стоячим волнам и дополнительному искажению сигнала в нелинейных элементах ИС. В качестве альтернативы традиционным отражающим структурам рассматриваются неотражающие (поглощающие) фильтры, принцип действия которых основан на рассеивании энергии помехи в резистивных элементах, согласованных с волновым сопротивлением тракта как в полосе пропускания, так и в полосе задерживания [28–31]. Такой подход исключает появление паразитных отражений и обеспечивает стабильный импеданс на всех частотах, что особенно важно при защите входных цепей ИС, работающих в условиях широкополосных кондуктивных воздействий.

Направленные ответвители представляют собой отдельный класс пассивных устройств, применяемых преимущественно в диапазоне СВЧ для отведения части энергии сигнала в согласованную нагрузку или общий заземлённый проводник в обход защищаемого узла ИС [32, 33]. На рис. 5 представлен направленный ответвитель, реализованный по технологии 28 нм КМОП FD-SOI.

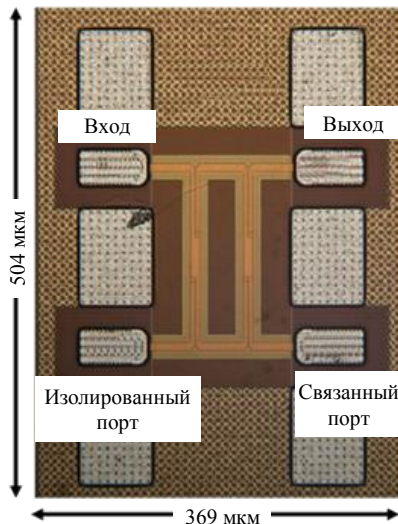


Рис. 5. Направленный ответвитель из [33]

Устройство обеспечивает переходное ослабление 3 дБ в полосе частот 26–44 ГГц при вносимых потерях не более 2,2 дБ и сдвиге фаз между выходными портами $95 \pm 5^\circ$. Компактная топология занимает площадь $0,005 \text{ мм}^2$, что делает её перспективной для интеграции непосредственно на кристалл ИС.

Ферритовые элементы также находят применение в качестве пассивных средств защиты ИС от кондуктивных ЭМП [34]. Ферритовые материалы применяются в ИС как магнитная среда для интегральных катушек индуктивности, что позволяет повысить их индуктивность и добротность в рабочем диапазоне частот, тем самым улучшая частотно-селективные свойства фильтрующих цепей защиты. В [34] ферритовые материалы применяются в качестве магнитной среды для интегральных катушек индуктивности в виде тонких плёнок или композитов на основе наночастиц, что позволяет повысить их индуктивность и добротность в рабочем диапазоне частот. На рис. 6 представлен пример конструкции такой интегральной катушки индуктивности из [34].

Метаматериалы находят все более широкое применение в ИС благодаря их способности формировать электромагнитные свойства, недостижимые в природных материалах [35]. Они используются как для создания частотно-селективных поверхностей, выполняющих функции фильтрации, так и для разработки компактных радиочастотных поглотителей энергии ЭМП и электромагнитных экранов на уровне ИС. В ИС они применяются для подавления паразитных мод, снижения перекрёстных помех и миниатюризации.

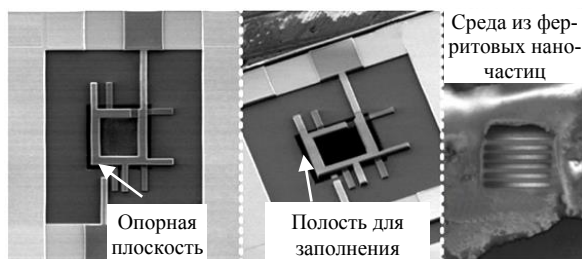


Рис. 6. Конструкция интегральной катушки индуктивности с ферромагнитным материалом из [34]

Перспективным направлением является интеграция перестраиваемых метаматериалов [36, 37], что открывает возможности для адаптивной фильтрации кондуктивных помех и динамического управления полосой задерживания и центральной частотой фильтрующих структур на уровне ИС. Пример структуры с метаматериалом, используемой в качестве поглотителя ЭМП, представлен на рис. 7.

В отличие от локального подавления помех с помощью структур с метаматериалом, экранирование решает задачу защиты на системном уровне, создавая электромагнитный барьер из материала вокруг критичных узлов ИС или всей схемы в целом. Такое средство защищает устройства от наведенных помех. Принцип действия экранирования основан на отражении или поглощении энергии внешней ЭМП, что предотвращает проникновение энергии помехи к чувствительным элементам [38]. Несмотря на то, что экранирование направлено преимущественно против излучаемых помех, оно также снижает уровень кондуктивных помех, наводимых на соединительные линии и цепи питания ИС, и рассматривается в данном обзоре как дополнительное средство комплексной защиты. Эффективность экранирования зависит от множества факторов: электропроводности и магнитной проницаемости материала, толщины экрана, целостности его конструкции, а также частотного диапазона воздействующей помехи. На рис. 8 представлено электромагнитное экранирование корпуса ИС.

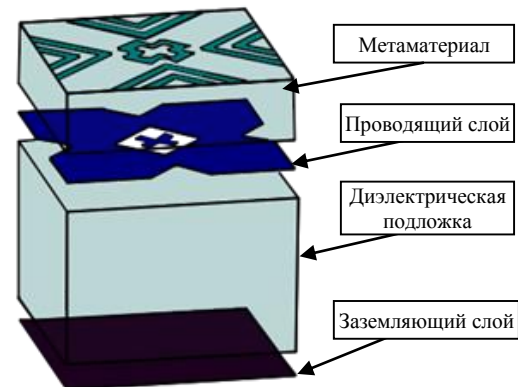


Рис. 7. Поглощающая структура на основе метаматериала из [37]

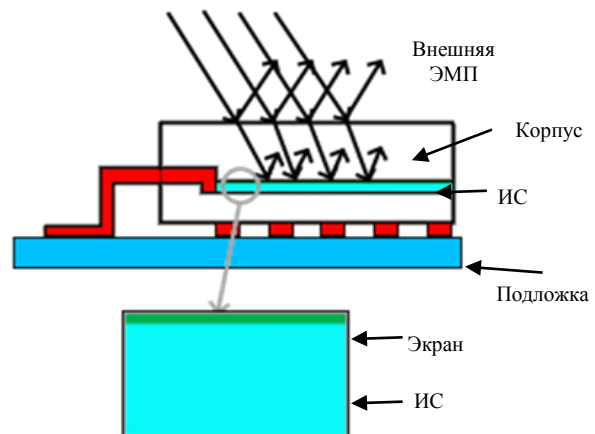


Рис. 8. Электромагнитное экранирование корпуса ИС из [38]

Активные средства защиты

Активные средства защиты и фильтрации реализуются с использованием усилительных и ограничительных элементов, к которым относятся транзисторы, операционные усилители и специализированные ИС подавления перенапряжений [39]. Необходимость внешнего источника питания является существенным недостатком активных средств по сравнению с пассивными. В отличие от пассивных фильтров, активные средства способны усиливать полезный сигнал в заданной полосе частот, компенсируя его потери, однако при этом неизбежно вносят дополнительные шумы в полосу пропускания.

Такие решения представляют особый интерес в устройствах, где критически важны миниатюризация [40, 41] и динамическая настройка параметров [42, 43]. Вместе с тем активные устройства имеют ряд ограничений: повышенное энергопотребление [44, 45], внесение дополнительных шумов и нелинейных искажений [46, 47], а также ограниченную полосу рабочих частот [48, 49]. Кроме того, при воздействии мощных ЭМП такие фильтры могут не выдерживать высоких уровней напряжений и мощностей, что приведёт к нарушению функционирования или разрушению активных элементов. Ещё одним важным фактором является низкая радиационная стойкость большинства полупроводниковых компонентов, что ограничивает применение активных фильтров в условиях сложной радиационной обстановки [50, 51].

При включении активного фильтра непосредственно в аналоговый сигнальный тракт ИС он выполняет функцию частотной селекции сигнала до поступления на нелинейные элементы схемы, обеспечивая перестройку полосы пропускания, управление коэффициентом усиления и реконфигурацию порядка фильтра без изменения топологии. Принципиальным требованием к такому фильтру является обеспечение высокой линейности при минимальном уровне собственных шумов, поскольку фильтр включён непосредственно перед чувствительными каскадами и вносит свой вклад в суммарный коэффициент шума тракта.

Примером практической реализации данного подхода служит работа [46], в которой предложен активный RC -фильтр Чебышева 3/5-го порядка с перестраиваемой полосой пропускания и коэффициентом усиления, интегрированный непосредственно в аналоговый тракт трансивера ИС. Реализация выполнена по технологии КМОП 55 нм; выбор архитектуры активного RC в замкнутом контуре обусловлен требованием высокой линейности, необходимой для поддержки модуляции 1024-КАМ на приёме.

Фильтр реализован на основе скачковой структуры с переключаемыми конденсаторными матрицами для управления полосой (10/20/40 МГц) и резисторов для управления усилением (от 0 до 18 дБ в режиме приёма). В приёмном режиме при полосе 10 МГц и усилении 36 дБ достигнуто значение третьей интермодуляционной составляющей -39 дБ при уровне входного сигнала -62 дБм, что подтверждает

сохранение динамического диапазона входных цепей ИС. Площадь фильтра составляет $0,08$ мм². Пример схемы активного фильтра из [46] представлен на рис. 9.

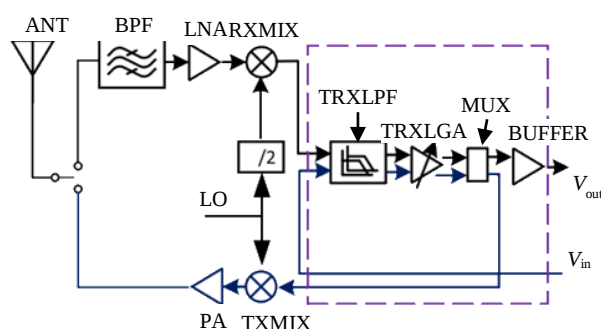


Рис. 9. Пример схемы активного фильтра [46]

Гибридные средства защиты

Гибридные средства защиты представляют собой класс решений, в которых пассивные и активные компоненты используются совместно для формирования требуемых частотных и энергетических характеристик. В отличие от пассивных структур, они обеспечивают возможность адаптации параметров, а по сравнению с активными обладают повышенной устойчивостью к мощным электромагнитным воздействиям. Анализ представленных в литературе решений показывает, что гибридные фильтры целесообразно систематизировать по функциональному назначению и архитектурным особенностям [52–63]. С точки зрения функционального назначения можно выделить несколько основных направлений применения гибридных фильтров.

Первая группа включает решения для высокоскоростных каналов передачи данных, где ключевой задачей является компенсация частотных потерь и расширение полосы пропускания. К таким устройствам относятся адаптивные эквалайзеры и приёмные тракты с интегрированными гибридными фильтрами. Например, в [52] представлен линейный эквалайзер с гибридным фильтром в контуре обратной связи, обеспечивающий компенсацию потерь канала до 13 дБ при низкой удельной мощности. Аналогичный подход реализован в [56], где гибридный эквалайзер обеспечивает передачу данных со скоростью до 22 Гб/с за счёт использования пассивных индуктивных элементов совместно с активным усилением. В [55] гибридная фильтрация интегрирована непосредственно в приёмник, что позволяет повысить коэффициент усиления и обеспечить требуемую линейность при ограниченной мощности. Для данного класса решений характерно использование активных элементов для компенсации вносимых потерь пассивных компонентов, что позволяет существенно расширить рабочую полосу частот при сохранении компактности.

Вторая группа представлена гибридными фильтрами для аналоговых и радиочастотных трактов, где приоритетом является обеспечение линейности и подавление внеполосных помех. В [57] реализован

трансформаторный КМОП-дуплексер с интегрированными полосовыми и режекторными фильтрами, обеспечивающими значительное подавление помех в заданном диапазоне частот. В [58] предложен следящий фильтр, в котором нелинейности компенсируются за счёт параллельного включения транзисторных структур, что позволяет достичь высокого динамического диапазона, соответствующая топология представлена на рис. 10. В [54] гибридный фильтр используется в составе аналого-цифрового преобразователя, где пассивная часть обеспечивает интегрирование сигнала, а активная – формирует усиление и стабильность характеристик. Данный класс решений ориентирован на обеспечение высокой точности обработки сигналов и характеризуется повышенными требованиями к линейности и шумовым параметрам. На рис. 11 представлен аналого-цифровой преобразователь с гибридным фильтром из [54].

Третью группу составляют гибридные фильтры для низкочастотных и специализированных применений, включая биомедицинские устройства. В [53] представлены ОТА-С-фильтры на гибридной CMOS-CNFET-технологии, обеспечивающие сверхнизкое энергопотребление при работе на частотах до 100 Гц. В таких устройствах активная часть используется преимущественно для формирования требуемых частотных характеристик при минимальном энергопотреблении, тогда как пассивные элементы задают базовую фильтрацию.

Отдельное направление составляют гибридные решения, ориентированные на подавление кондуктивных ЭМП в силовой электронике и системах с повышенными требованиями к устойчивости.

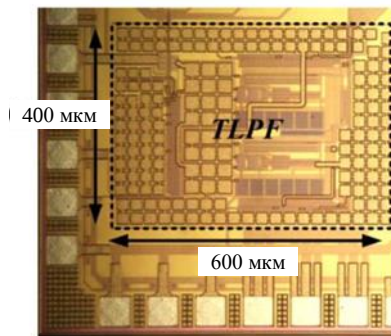


Рис. 10. Следящий ФНЧ из [58]

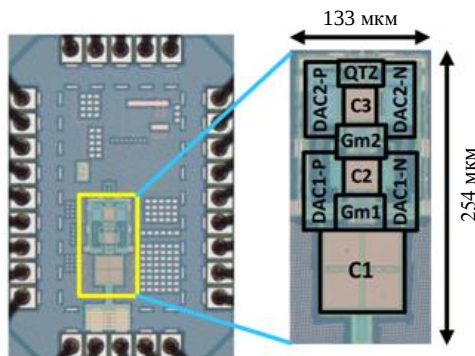


Рис. 11. Аналого-цифровой преобразователь с гибридным фильтром из [54]

В [59] предложен гибридный фильтр (рис. 12) на основе специализированной ИС с трансформаторной изоляцией, обеспечивающий устойчивость к перенапряжениям до 5 кВ.

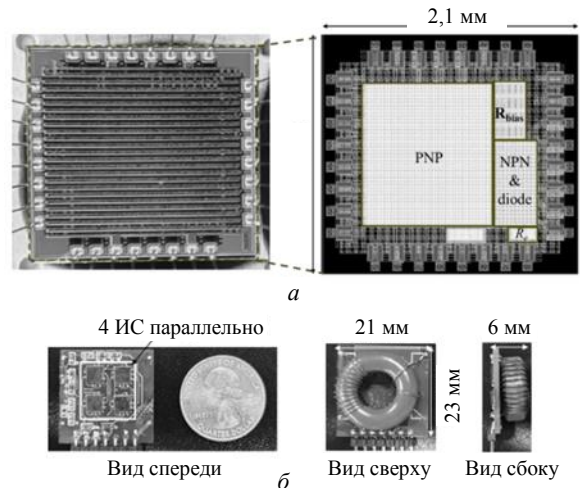


Рис. 12. Изготовленная ИС (а) и модуль печатной платы (б), включающий активные компоненты схемы и повышающий трансформатор [59]

В [62] реализована архитектура, в которой активная часть компенсирует дифференциальные помехи в низкочастотном диапазоне, а пассивная – подавляет высокочастотные составляющие. Такой подход позволяет эффективно разделить функции фильтрации по частотным диапазонам и повысить общую эффективность подавления ЭМП.

С точки зрения архитектурных решений гибридные фильтры могут быть разделены на несколько основных типов: структуры с активной компенсацией потерь пассивной части, фильтры с обратной связью, а также комбинированные решения с частотным разделением функций между активными и пассивными элементами. Наиболее распространённым является первый тип, в котором пассивная часть формирует базовую частотную характеристику, тогда как активная обеспечивает компенсацию затухания и требуемый коэффициент передачи. В структурах с обратной связью фильтр включается в замкнутый контур, что позволяет реализовать адаптивную настройку параметров. Комбинированные решения ориентированы на широкополосные воздействия и предполагают распределение функций фильтрации по частотным диапазонам.

Анализ показывает, что эффективность гибридных фильтров определяется компромиссом между энергопотреблением, линейностью и устойчивостью к внешним воздействиям. При этом требования к архитектуре существенно зависят от области применения: в высокочастотных системах ключевыми являются расширение полосы пропускания и компенсация потерь, в низкочастотных – снижение энергопотребления, а в силовых и помехозащитных приложениях – обеспечение устойчивости к мощным импульсным воздействиям, что, как правило, требует увеличения доли пассивных элементов.

Перспективность гибридных решений подтверждается рядом работ [64–67], в которых показано, что сочетание активной и пассивной фильтрации позволяет повысить эффективность подавления помех при одновременном снижении габаритов устройств. Так, в [64] продемонстрировано уменьшение объёма фильтра за счёт совмещения активной и высокочастотной пассивной секций, в [65] показана возможность интегрированного исполнения гибридных фильтров, а в [67] предложена топология на основе активного Y-конденсатора для эффективного подавления синфазных помех в компактных силовых преобразователях.

Таким образом, гибридные фильтры находят применение при решении ряда задач – от высокоскоростных каналов передачи данных до биомедицинских и силовых систем, что обусловлено возможностью гибкой настройки их характеристик в зависимости от требований к полосе пропускания, энергопотреблению и помехоустойчивости.

Сравнительная таблица характеристик и недостатков пассивных, активных и гибридных фильтров представлена в табл. 1. Сводные результаты классификации рассмотренных решений по принципу действия, типу компонентов и уровню интеграции представлены в табл. 2, где для каждой работы указана её принадлежность к соответствующим классам согласно предложенной схеме (см. рис. 3).

Сравнительный анализ показывает, что пассивные фильтры остаются наиболее надёжным средством защиты, однако их применение ограничено габаритами и ухудшением характеристик на высоких частотах. Активные фильтры обеспечивают адаптивность и компенсацию потерь, но характеризуются повышенным энергопотреблением и сниженной устой-

чивостью к мощным электромагнитным воздействиям. Гибридные решения позволяют объединить преимущества обоих подходов, обеспечивая баланс между эффективностью подавления, адаптивностью и компактностью.

Заключение

В работе выполнен анализ устройств и способов защиты ИС от кондуктивных ЭМП. Приведены классификация и сопоставление пассивных, активных и гибридных фильтров, позволившие выявить существенные различия в принципах действия, технологической сложности и условиях применения рассмотренных решений.

Анализ показал, что пассивные фильтры остаются основой надёжной защиты благодаря простоте и стабильности, однако их частотные характеристики ухудшаются на высоких частотах вследствие влияния паразитных параметров элементов, а значительные габариты ограничивают возможность их интеграции в современные миниатюрные ИС. Активные средства обеспечивают адаптивность и компенсацию потерь, но уязвимы к мощным воздействиям и требуют дополнительного энергопотребления.

Ключевым выводом является то, что именно гибридные решения представляют собой наиболее сбалансированный и перспективный подход. Они позволяют эффективно объединить надёжность и широкополосность пассивной части с адаптивностью и точностью активной компенсации. Несмотря на сложность их схемотехнической и технологической интеграции, именно гибридные фильтры способны удовлетворить противоречивые требования современных высокоинтегрированных систем к компактности, эффективности и помехоустойчивости.

Таблица 1

Сравнительная таблица преимуществ фильтров

Критерий	Пассивные фильтры	Активные фильтры	Гибридные фильтры
Принцип действия	Основаны на ограничении спектра ЭМП за счёт использования сосредоточенных RLC -элементов и компонентов с распределёнными параметрами	Реализуют фильтрацию и компенсацию с использованием усилительных и ограничительных элементов	Сочетают фильтрацию пассивными и активными элементами
Тип компонентов	Резонаторы, RLC -элементы	Транзисторы, операционные усилители	Резонаторы, RLC -структуры совместно с активными компонентами
Место интеграции	Могут реализовывать как во внешнем корпусе, так и на кристалле	Интегрируются в корпус или на кристалл	Могут реализовывать как во внешнем корпусе, так и на кристалле
Достоинство	Обеспечивают базовую защиту, отличаются простотой и надёжностью	Позволяют формировать заданные характеристики и выполнять динамическую настройку параметров, компенсируя потери пассивных звеньев	Обеспечивают высокую эффективность, адаптивность к условиям воздействия и компактность
Недостатки	Ограниченная эффективность на высоких частотах, зависимость от паразитных параметров, отсутствие адаптивности	Повышенное энергопотребление, внесение шумов и нелинейных искажений, ограниченная полоса рабочих частот	Сложность схемотехнического и технологического согласования
Габариты	Достаточно большие из-за катушек	Компактные	Оптимизированные, сочетают оба подхода
Надёжность	Высокая	Ниже из-за деградации активных элементов	Выше активных, но ниже пассивных
Устойчивость к мощным ЭМП	Высокая	Низкая	Средняя/высокая

Таблица 2

Сравнение различных средств защиты от ЭМП

Средства защиты из литературы	По принципу действия			Используемые компоненты			Место расположения		
	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3
Реконфигурируемый GaAs pHEMT полосовой фильтр [19], СШП-фильтр с режекцией WLAN [20], перестраиваемый гребенчатый фильтр 8–10,4 ГГц [22], компактный мм-волноводный фильтр 25,5 ГГц [23], Ku-диапазонный фильтр с подавлением гармоник [24], фильтр подавления зеркального канала [25], гибридный SHMSIW/микрополосковый фильтр 45 ГГц [26], фильтр 26,5 ГГц с гибридной связью [27]	✓			✓					✓
Блок переключаемых К-/Ка-/Q-фильтров [21], компактный медленно перетираемый 28-нанометровый соединитель [33]		✓		✓					✓
Неотражающий микроволновый фильтр [28], неотражающий фильтр на основе трехпроводной линии [29], неотражающие частотно-селективные цепи СВЧ [30], различные способы проектирования неотражающих фильтров [31], полосковый направленный соединитель для подавления помех [32]	✓			✓			✓		
Метаструктуры на основе полимерных композитных материалов [35], двухдиапазонный поглотитель на основе метаматериала [36], миниатюрный поглотитель на основе метаматериала [37], поглощающий материал для экранирования ИС [38]			✓	✓				✓	
Активный фильтр для снижения уровня ЭМП в импульсных силовых преобразователях [39]		✓			✓		✓		
TVS-диод для защиты от электростатического разряда [40], активный фильтр с использованием нейронной сети [42]		✓		✓			✓		
Активный фильтр на основе ШИМ-инвертора для высокочастотных систем переменного тока в космосе [41]	✓				✓			✓	
Активный LNA-BPF с вычитанием помех [44], смеситель с эллиптическим ФНЧ [45], активный RC ФНЧ 3-го/5-го порядка [46], субдискретизирующий приёмник с режекторным фильтром [47], смеситель с активным индуктором Gm-C [48], усилитель с трансформаторным фильтрующим комбайнером [49], активный Gm-C ФНЧ 4,9 ГГц [50], активный ФНЧ на перекрывающихся индуктивностях [50]	✓				✓				✓
Гибридный CMOS-CNFET OTA-C фильтр [53], дельта-сигма АЦП с гибридным актив-пассив фильтром [54], приёмник ZigBee с гибридным Blixer+фильтром [55], CMOS дуплексер с режекторным LNA [57], гибридный RC+Gm-C трекинг фильтр [58], дельта-сигма модулятор с гибридным фильтром [60]	✓					✓			✓
Активный ЭМП-фильтр на специализированной ИС [59], усилитель с фильтрацией гармоник MI-SISL [61], гибридный интегрированный фильтр [62]	✓					✓	✓		

Наиболее перспективным направлением в разработке интегральных гибридных фильтров считается применение pHEMT-технологии. Это обусловлено её потенциальной эффективностью в высокочастотных диапазонах, критически важных для современных систем передачи данных, а также сравнительно малой изученностью данного подхода.

Литература

1. Три возможных механизма возникновения отказов электронных устройств в результате электромагнитного воздействия / Л.Н. Здухов, Ю.В. Парфенов, О.А. Тарасов, В.М. Чепелев // Технологии электромагнитной совместимости. – 2018. – № 2. – С. 22–34.
2. Design of low-voltage CMOS amplifier with high EMI immunity / H. Bai, H. Li, S. Xie, D. Su // 2014 IEEE International Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits. – IEEE, 2014. – P. 1–2.
3. Deutschmann B. Impact of electromagnetic interference on the functional safety of smart power devices for automotive applications / B. Deutschmann, G. Winkler, P. Kastner // e & i Elektrotechnik und Informationstechnik. – 2018. – Vol. 135, No. 4. – P. 352–359.

4. Hong C. Signal integrity research of high-speed interconnection systems based on scattering parameters / C. Hong, Z. Li, W. Guan, L. Liang // Scientific Reports. – 2025. – Vol. 15, No. 1. – P. 23096.

5. Гизатуллин З.М. Прогнозирование помех электростатического разряда в электронном устройстве с использованием искусственной нейронной сети / З.М. Гизатуллин, Р.Р. Мубаракوف // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – № 8 [Электронный ресурс]. – URL: <https://jre.cplire.ru/jre/aug24/index.html> (дата обращения: 12.01.2025).

6. Chen J. Switching transient traced scheme based on sinusoidal waveform to reduce EMI for IGBTs / J. Chen, D. Jiang, W. Sun // 2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). – Vancouver, Canada: IEEE, 2021. – P. 3550–3554.

7. Nag A. Remote measurements of currents in cloud lightning discharges / A. Nag, V.A. Rakov, J.A. Cramer // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2010. – Vol. 53, No. 2. – P. 407–413.

8. Разумов А.А. Исследование влияния преднамеренных электромагнитных импульсов на процесс передачи данных сети Wi-Fi (IEEE 802.11 ac) // Электросвязь. – 2017. – № 9. – С. 67–73.

9. JESD22-A114F. Electrostatic Discharge (ESD) Sensitivity Testing Human Body Model (HBM). JEDEC Solid State

Technology Association [Электронный ресурс]. – Arlington, VA, 2008. – URL: <https://www.jedec.org/standards-documents/docs/jesd-22-a114f> (дата обращения: 12.02.2025).

10. ГОСТ IEC 61000-4-4–2016. Электромагнитная совместимость (ЭМС). Ч. 4-4. Методы испытаний и измерений. Испытание на устойчивость к электрическим быстрым переходным процессам (пачкам). – М.: Стандартинформ, 2017. – 39 с.

11. ГОСТ IEC 61000-4-5–2017. Электромагнитная совместимость (ЭМС). Ч. 4-5. Методы испытаний и измерений. Испытание на устойчивость к выбросу напряжения. – М.: Стандартинформ, 2018. – 66 с.

12. Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment, MIL-STD-461G. DoD interface standard [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.wll.com/wp-content/uploads/MIL-STD-461G.pdf> (дата обращения: 04.02.2025).

13. Electromagnetic Environmental Effects Requirements for Systems, MIL-STD-464C. DoD standard [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.emctestlab.ru/upload/iblock/168/lqkzq7zgnf8wtlrqpsf8fs3v0qt4ol.pdf?ysclid=mp22s4ehj1304020189> (дата обращения: 04.02.2025).

14. Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4-36: Testing and measurement techniques – IEMI immunity test methods for equipment and systems. IEC 61000-4-36 [Электронный ресурс]. – URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/6007> (дата обращения: 04.02.2025).

15. Strong electromagnetic interference and protection in UAVs / Z. Zhang, Y. Zhou, Y. Zhang, B. Qian // *Electronics*. – 2024. – Vol. 13, No. 2. – P. 393.

16. Shirai R. Failure protection method for CAN communication against EMI noise generated by switched-mode power supplies / R. Shirai, K. Wada, T. Shimizu // *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. – 2021. – Vol. 9, No. 5. – P. 6152–6160.

17. Лакоза А.М. Обзор современных устройств фильтрации и защиты от кондуктивных электромагнитных помех в радиоэлектронных системах // *Доклады ТУСУР*. – 2024. – Т. 27, № 4. – С. 31–46.

18. Рахманов П.А. Нанoeлектроника: миниатюризация и инновации / П.А. Рахманов, С.Б. Джембаров, М.Р. Гуртов // *Вестник науки*. – 2024. – Т. 4, № 5 (74). – С. 1648–1651.

19. An ultra-compact on-chip reconfigurable bandpass filter with semi-lumped topology by using GaAs pHEMT technology / H.R. Zhu, X.Y. Ning, Z.X. Huang, X.L. Wu // *IEEE Access*. – 2020. – Vol. 8. – P. 31606–31613.

20. CMOS-based UWB bandpass filter with in-band interference cancellation / A.A. Saadi, M.C.E. Yagoub, R. Touhami, A. Slimane, A. Taibi, M.T. Belaroussi // 2015 9th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT). – IEEE, 2015. – P. 458–460.

21. K-/Ka-/Q-Band Switched Filter Bank with Wideband Low-Loss SP4T Switch in 0.1 μm GaAs pHEMT Technology / Z. Chen, X. Ma, S. Li, Y. Zou, Y. Guo, P. Wang // *IEEE Microwave and Wireless Technology Letters*. – 2025. – Vol. 35, No. 10. – P. 1490–1493.

22. Reconfigurable Comb-line Filters with 8–10.4 GHz Center Frequency by Using GaAs pHEMT Technology / L. Liao, L. Xu, P.L. Chi, T. Yang // 2023 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC). – IEEE, 2023. – P. 658–660.

23. A Novel Compact On-Chip Millimeter-Wave Band-Pass Filter with GaAs pHEMT Technology / W.T. Wang, H.R. Zhu, Y.F. Sun, Z.X. Huang, X.L. Wu // 2021 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). – IEEE, 2021. – P. 1–3.

24. Sheen J. Ku-band bandpass filter design with compact size and broad stopband by pHEMT process / J. Sheen,

Y.H. Cheng, W. Liu // 2019 Photonics and Electromagnetics Research Symposium-Spring (PIERS-Spring). – IEEE, 2019. – P. 1022–1026.

25. Ray A. Design and Analysis of a CMOS Moore Fractal MOM Capacitor with an Application to an RF Active Image Reject Filter / A. Ray, A. De, T. K. Bhattacharyya // *IEEE Transactions on Electron Devices*. – 2021. – Vol. 69, No. 2. – P. 704–710.

26. Packaged Millimeter-Wave On-Chip Bandpass Filter Using SHMSIW and Microstrip Hybrid Structure in 0.25- μm GaAs pHEMT Technology / X. Zhou, G. Zhang, K. W. Tam, S. Chen, Z. Zhang, X. Fu // *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*. – 2024. – Vol. 14, No. 8. – P. 1454–1460.

27. Microwave on-chip bandpass filter based on hybrid coupling technique / M. Li, Y. Yang, K. Da Xu, X. Zhu, S.W. Wong // *IEEE Transactions on Electron Devices*. – 2018. – Vol. 65, No. 12. – P. 5453–5459.

28. Modeling and Experimental Study of Non-Reflective Microwave Filters / G.A. Malyutin, T.T. Thanh, T.A. Chepko, A.A. Arutyunyan // 2024 International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED). Sochi. – 2024. – P. 1–4. DOI: 10.1109/SED63331.2024.10741057

29. Арутюнян А.А. Моделирование и экспериментальное исследование фильтра неотражающего типа на основе полосковой трехпроводной связанной линии // *Доклады ТУСУР*. – 2025. – Т. 28, № 2. – С. 55–61.

30. Лощилов А.Г. Уменьшение возвратных потерь и подавление внеполосных колебаний в межкаскадных соединениях систем связи с помощью неотражающих частотно-селективных цепей СВЧ / А.Г. Лощилов, Н.Д. Малютин, Чинь То Тхань, Г.А. Малютин // *Системы управления, связи и безопасности*. – 2024. – № 4. – С. 72–94.

31. Чинь Т.Т. Модели и конструкции неотражающих фильтров СВЧ на основе связанных полосковых линий и сосредоточенных RLC-элементов: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2024. – 156 с.

32. Peng Z. Stripline Directional Coupler for Immunity Injection in Integrated Circuits / Z. Peng, B. Li // 2020 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). – IEEE, 2020. – P. 1–3.

33. Compact and Slow-Wave Tunable 28 nm CMOS-SOI Twisted Hybrid Couplers for 5G Applications / G. Diverrez, E. Kerhervé, M. De Matos, A. Cathelin // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 2024. – Vol. 72, № 4. – P. 2486–2497

34. Advances and Perspectives in Magnetic-Integrated Inductors for RF ICs / W. Hao, X. Li, Z. Pan, R. Miao, Z. Yue, C. Yang, A.Z. Wang // *IEEE Transactions on Materials for Electron Devices*. – 2024. – Vol. 1. – P. 106–120.

35. Метаструктуры на основе полимерных композиционных материалов и их свойства в СВЧ-диапазоне (обзор) / А.С. Марковский, А.Г. Любимов, А.Ф. Петрушеня, О.М. Касперович, Л.А. Ленартович // *Труды БГТУ*. – Сер. 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология. – 2024. – № 2 (283). – С. 122–135.

36. Design of dual-band polarization controllable metamaterial absorber at terahertz frequency / B.X. Wang, Y. He, N. Xu, X. Wang, Y. Wang, J. Cao // *Results in Physics*. – 2020. – Vol. 17. – P. 103077.

37. A miniaturized perfect metamaterial absorber for EMI radiation suppression / Y. Li, Y. Wu, D. Li, M. Zhu, Y. Qiu, G. Yu, E. Li // *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. – 2024. – Vol. 66, No. 3. – P. 776–786.

38. Analysis of electromagnetic shielding of IC package with thin absorbing material coating inside in two different configurations / W. Xiong, M. Jiang, M. Zhu, B. Zhu, J. Lu // 2018

- IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC/APEMC). – IEEE, 2018. – P. 1216–1221.
39. Kurien C.E. Modelling and implementation of an active EMI filter for conducted EMI noise reduction / C.E. Kurien, T.K. Sindhu, D.E. Koshy // 2021 IEEE 5th International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON). – IEEE, 2021. – P. 205–210.
40. Shen Y. S. Transient voltage suppressor (TVS) on signal integrity of microelectronics system with CMOS ICs under system-level ESD test / Y.S. Shen, M.D. Ker, H.C. Jiang // 2020 IEEE International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits (IPFA). – IEEE, 2020. – P. 1–4.
41. PWM Inverter Based Active Filter for High Frequency AC Systems in Space Applications / M.T. Rana, S. Mazumder, S. Chakraborty, M.V. Salapaka, K. Basu // 2024 IEEE International Communications Energy Conference (INTELEC). – IEEE, 2024. – P. 1–6.
42. Performance of Series Active Power Filter (SAPF) Using ANN Controller for Eliminate Disturbance of Voltage Sag / A.F. Abidin, F.S.A.L. Hamidi, M.A.M. Ayub, M.Y.M. Zain, N. Aminudin // 2022 IEEE International Conference in Power Engineering Application (ICPEA). – IEEE, 2022. – P. 1–5.
43. Tien D.V. Analysis and Simulation of Active Filter in Distribution Network with Nonlinear and Asymmetrical Load / D.V. Tien, T.B. Trung, N. Van Pham // 2023 12th International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS). – IEEE, 2023. – P. 322–327.
44. Gadelkarim A.G. A 3.5 mW mm-Wave Low-Noise Active Bandpass Filter Employing an All-Pass Interference-Cancellation Feedforward Path / A.G. Gadelkarim, P. Mercier // 2025 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC). – IEEE, 2025. – Vol. 68. – P. 1–3.
45. Song P. Mm-wave mixer-first receiver with selective passive wideband low-pass filtering / P. Song, H. Hashemi // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 2021. – Vol. 56, No. 5. – P. 1454–1463.
46. Wang Y. A 3rd/5th Order Active RC Chebyshev Analog Baseband Low-Pass Filter with Reconfigurable Bandwidth and Gain / Y. Wang, B. Wu, H. Huang // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 129319–129328.
47. Gadelkarim A.G. A 18.2 mW Subsampling mm-Wave Receiver Employing a Subtractive Anti-Aliasing Active Bandstop Filter at 23 GHz / A.G. Gadelkarim, P.P. Mercier // 2024 IEEE Custom Integrated Circuits Conference (CICC). – IEEE, 2024. – P. 1–2.
48. Srivastava G. A 16–20 GHz Mixer First Receiver Architecture with Active Inductor-Based Low-Pass Elliptic Filter with High OOB-IIP3 in 180 nm CMOS / G. Srivastava, D. Bhatt // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. – 2025. – Vol. 72, No. 3. – P. 1152–1164.
49. A Bandpass Power Amplifier Applying Transformer-Based Filtering Combiner in 0.5- μ m GaAs pHEMT / J. Li, Y. Zhang, K. Ma, Z. Ma, H. Fu // IEEE Microwave and Wireless Technology Letters. – 2023. – Vol. 33, No. 7. – P. 1023–1026.
50. Gannedahl R. Active and passive integrated filters for multi-GHz 6G baseband applications / R. Gannedahl, H. Sjöland // 2023 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC). – IEEE, 2023. – P. 524–526.
51. An inductor-less all-passive higher-order N-path filter based on rotary clocking in N-path filters / M. Khorshidian, S.L.N. Garimella, A. Nagulu, H. Krishnaswamy // 2022 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium-IMS 2022. – IEEE, 2022. – P. 241–244.
52. Talluri G.R. A 4–14 Gbps inductor-less adaptive linear equalizer using hybrid filter in 65 nm CMOS technology / G.R. Talluri, K.K. Rakesh, M.S. Baghini // Sixteenth International Symposium on Quality Electronic Design. – IEEE, 2015. – P. 90–97.
53. Rahane S.B. OTA-C filters for biomedical signal processing applications using hybrid CMOS-CNFET technology / S.B. Rahane, A.K. Kureshi, G.K. Kharate // 2018 International Conference on Intelligent and Innovative Computing Applications (ICONIC). – IEEE, 2018. – P. 1–5.
54. Design Tradeoffs for a CT- $\Delta\Sigma$ ADC with Hybrid Active-Passive Filter and FIR DAC in 40-nm CMOS / A. Mukherjee, X. Tang, C.K. Hsu, N. Sun // IEEE Solid-State Circuits Letters. – 2020. – Vol. 3. – P. 214–217.
55. Lin Z. A 2.4-GHz ZigBee receiver exploiting an RF-to-BB-current-reuse Blixer+ hybrid filter topology in 65-nm CMOS / Z. Lin, P.I. Mak, R.P. Martins // Ultra-Low-Power and Ultra-Low-Cost Short-Range Wireless Receivers in Nanoscale CMOS. – Cham: Springer International Publishing, 2015. – P. 33–55.
56. Lee C.C. A low-power miniature 20 Gb/s passive/active hybrid equalizer in 90 nm CMOS / C.C. Lee, H.C. Hsieh, S.S.H. Hsu // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. – 2015. – Vol. 25, No. 10. – P. 669–671.
57. Kwon K. A hybrid transformer-based CMOS duplexer with a single-ended notch-filtered LNA for highly integrated tunable RF front-ends / K. Kwon, S. Kim, K.Y. Son // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. – 2018. – Vol. 28, No. 11. – P. 1032–1034.
58. Kwon K. A 23.4 mW 68 dB dynamic range low band CMOS hybrid tracking filter for ATSC digital TV tuner adopting RC and Gm-C topology / K. Kwon, K. Lee // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. – 2011. – Vol. 58, No. 10. – P. 2346–2354.
59. Jeong S. A customized integrated circuit for active EMI filter with high reliability and scalability / S. Jeong, J. Park, J. Kim // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2021. – Vol. 36, No. 11. – P. 12631–12645.
60. A high performance continuous-time sigma-delta modulator with a 2 MHz bandwidth hybrid loop filter for wireless healthcare applications / J.F. Huang, W.C. Lai, F.T. Kao, K.J. Huang, K.L. Chen, R.Y. Liu // 2013 6th International Conference on Biomedical Engineering and Informatics. – IEEE, 2013. – P. 408–412.
61. Feng T. Bandpass-filtering power amplifier with compact size and wideband harmonic suppression / T. Feng, K. Ma, Y. Wang, J. Hu // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2021. – Vol. 70, No. 2. – P. 1254–1268.
62. 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). – IEEE, 2013. – P. 1–8.
63. Design Approach to Passive and Active Hybrid Integrated EMI Filters for High-Frequency Converters / M. Ali, L. Fraeger, A. Portnov, B. Eilers // PCIM Conference 2025; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management. – VDE, 2025. – P. 905–914.
64. Han Y. Hybrid common-mode EMI filter design for electric vehicle traction inverters / Y. Han, Z. Wu, D. Wu // Chinese Journal of Electrical Engineering. – 2022. – Vol. 8, No. 4. – P. 52–60.
65. Design of a hybrid integrated EMC filter for a DC–DC power converter / M. Ali, E. Labouré, F. Costa, B. Revol // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2012. – Vol. 27, No. 11. – P. 4380–4390.
66. A novel design method for hybrid common-mode EMI filters based on attenuation adjustability / Q. Chen,

P. Zhou, X. Pei, Y. Yu, Y. Kang // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2025. – Vol. 40, No. 2 – P. 3138–3149.

67. A Hybrid EMI Filter Incorporating Active Y-capacitor for Common-mode Noise Mitigation / H. Li, S. Wang, D. He, Z. Zhao, W. Su // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2025. – Vol. 40, No. 4. – P. 5252–5264.

Власов Сергей Владиславович

Аспирант, ассистент каф. сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники (СВЧКР)

Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050

ORCID: 0000-0002-3848-1079

Тел.: +7 (382-2) 41-36-43

Эл. почта: sergei.v.vlasov@tusur.ru

Поступила в редакцию: 18.11.2025.

Принята к публикации: 22.04.2026.

Vlasov S.V.

A Review of Modern Methods for Protecting Integrated Circuits against Conducted Electromagnetic Interference

Relevance. Decreasing supply voltages and increasing clock frequencies of modern integrated circuits raise their vulnerability to conducted electromagnetic interference, making the task of effective protection critically important for ensuring the reliability of electronic systems. **Purpose of the study** is to systematize and comparatively analyze modern techniques for protecting integrated circuits against conducted electromagnetic interference, identifying the most promising directions for their further development. **Methods.** Comparative analysis of published technical solutions, classification by operating principle, component type, and integration level, as well as qualitative comparison of the characteristics of the reviewed devices. **Novelty.** A classification of electromagnetic interference protection techniques for integrated circuits is proposed, simultaneously covering operating principle, component type, and level of integration. **Results.** It is established that passive filters provide high reliability but are limited at high frequencies and under miniaturization constraints; active filters offer adaptability but are vulnerable to high-power interference and require additional power consumption; hybrid solutions represent the most balanced approach, combining broad bandwidth and adaptability with acceptable robustness to external electromagnetic effects. **Practical significance.** The findings can be applied in the design of interference-resistant integrated circuits for telecommunication equipment, radio communication systems, aerospace and military electronics, and can serve as a basis for filter architecture selection at the circuit design stage.

Keywords: active filters, hybrid filters, integrated circuit, interference protection, passive filters, electromagnetic interference, electromagnetic compatibility.

DOI: 10.21293/1818-0442-2026-29-1-7-19

References

1. Zdukhov L.N., Parfenov Yu.V., Tarasov O.A., Chepelev V.M. [Three possible mechanisms of electronic device failures as a result of electromagnetic exposure]. *Technologies of Electromagnetic Compatibility*, 2018, no. 2, pp. 22–34 (in Russ.).

2. Bai H., Li H., Xie S., Su D. Design of low-voltage CMOS amplifier with high EMI immunity. 2014 IEEE International Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits (EDSSC), Chengdu, China, IEEE, 2014, pp. 1–2.

3. Deutschmann B., Winkler G., Kastner P. Impact of electromagnetic interference on the functional safety of smart power devices for automotive applications. *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*, 2018, vol. 135, no. 4, pp. 352–359.

4. Hong C., Li Z., Guan W., Liang L. Signal integrity research of high-speed interconnection systems based on scattering parameters. *Scientific Reports*, 2025, vol. 15, no. 1, pp. 23096.

5. Gizatullin Z.M., Mubarakov R.R. [Prediction of electrostatic discharge interference in an electronic device using an artificial neural network]. *Journal of Radio Electronics*, 2024, no. 8 (in Russ.). Available at: <https://jre.cplire.ru/jre/aug24/index.html> (accessed: 12 January 2025).

6. Chen J., Jiang D., Sun W. Switching transient traced scheme based on sinusoidal waveform to reduce EMI for IGBTs. 2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Vancouver, Canada, IEEE, 2021, pp. 3550–3554.

7. Nag A., Rakov V.A., Cramer J.A. Remote measurements of currents in cloud lightning discharges. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2010, vol. 53, no. 2, pp. 407–413.

8. Razumov A.A. [Investigation of the influence of intentional electromagnetic pulses on the data transmission process of the Wi-Fi network (IEEE 802.11 ac)]. *Telecommunications*, 2017, no. 9, pp. 67–73 (in Russ.).

9. JESD22-A114F. *Electrostatic Discharge (ESD) Sensitivity Testing Human Body Model (HBM)*. Arlington, VA, JEDEC Solid State Technology Association, 2008. Available at: <https://www.jedec.org/standards-documents/docs/jesd-22-a114f> (accessed: 12 February 2025).

10. GOST IEC 61000-4-4-2016. *Elektromagnitnaya sovместimost (EMC). Chast 4-4. Metody ispytaniy i izmereniy. Ispytanie na ustoychivost k elektricheskim bystrim perekhodnym protsessam (pachkam)* [Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4-4. Test and measurement methods. Testing for resistance to electrical rapid transients (bursts)]. Moscow, Standartinform, 2017, 39 p. (in Russ.).

11. GOST IEC 61000-4-5-2017. *Elektromagnitnaya sovместimost (EMC). Chast 4-5. Metody ispytaniy i izmereniy. Ispytanie na ustoychivost k vybrosu napryazheniya* [Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4-5. Test and measurement methods. Stress surge resistance test]. Moscow, Standartinform, 2018, 66 p. (in Russ.).

12. *Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment. MIL-STD-461G. DoD interface standard, US, 2015.* Available at: <https://www.wll.com/wp-content/uploads/MIL-STD-461G.pdf> (accessed: 04 February 2025).

13. *Electromagnetic Environmental Effects Requirements for Systems. MIL-STD-464C. DoD standard, US, 2010.* Available at: <https://www.emctestlab.ru/upload/iblock/168/lqkzq7zgnf8wtlrqpsfr8fs3v0qt4ol.pdf?ysclid=mp22s4ehj1304020189> (accessed: 04 February 2025).

14. *Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4-36: Testing and measurement techniques – IEMI immunity test methods for equipment and systems. IEC 61000-4-36. IEC standard, 2014.* Available at: <https://webstore.iec.ch/en/publication/6007> (accessed: 04 February 2025).

15. Zhang Z., Zhou Y., Zhang Y., Qian B. Strong electromagnetic interference and protection in UAVs. *Electronics*, 2024, vol. 13, no. 2, pp. 393.

16. Shirai R., Wada K., Shimizu T. Failure protection method for CAN communication against EMI noise generated

- by switched-mode power supplies. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2021, vol. 9, no. 5, pp. 6152–6160.
17. Lakoza A.M. [Review of modern filtering and protection devices against conductive electromagnetic interference in radioelectronic systems]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki*, 2024, vol. 27, no. 4, pp. 31–46 (in Russ.).
 18. Rakhmanov P.A., Dzhepbayrov S.B., Gurtov M.R. [Nanoelectronics: miniaturization and innovations]. *Bulletin of Science*, 2024, vol. 4, no. 5 (74), pp. 1648–1651 (in Russ.).
 19. Zhu H.R., Ning X.Y., Huang Z.X., Wu X.L. An ultra-compact on-chip reconfigurable bandpass filter with semi-lumped topology by using GaAs pHEMT technology. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 31606–31613.
 20. Saadi A.A., Yagoub M.C.E., Touhami R., Slimane A., Taibi A., Belaroussi M.T. CMOS-based UWB bandpass filter with in-band interference cancellation. *2015 9th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT)*, Rostov-on-Don, Russia, IEEE, 2015, pp. 458–460.
 21. Chen Z., Ma X., Li S., Zou Y., Guo Y., Wang P. K-/Ka-/Q-band switched filter bank with wideband low-loss SP4T switch in 0.1 μm GaAs pHEMT technology. *IEEE Microwave and Wireless Technology Letters*, 2025, vol. 35, no. 10, pp. 1490–1493.
 22. Liao L., Xu L., Chi P.L., Yang T. Reconfigurable comb-line filters with 8–10.4 GHz center frequency by using GaAs pHEMT technology. *2023 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*, Taipei, Taiwan, IEEE, 2023, pp. 658–660.
 23. Wang W.T., Zhu H.R., Sun Y.F., Huang Z.X., Wu X.L. A novel compact on-chip millimeter-wave band-pass filter with GaAs pHEMT technology. *2021 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*, Nanjing, China, IEEE, 2021, pp. 1–3.
 24. Sheen J., Cheng Y.H., Liu W. Ku-band bandpass filter design with compact size and broad stopband by pHEMT process. *2019 Photonics and Electromagnetics Research Symposium-Spring (PIERS-Spring)*, Rome, Italy, IEEE, 2019, pp. 1022–1026.
 25. Ray A., De A., Bhattacharyya T.K. Design and analysis of a CMOS Moore fractal MOM capacitor with an application to an RF active image reject filter. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2021, vol. 69, no. 2, pp. 704–710.
 26. Zhou X., Zhang G., Tam K.W., Chen S., Zhang Z., Fu X. Packaged millimeter-wave on-chip bandpass filter using SHMSIW and microstrip hybrid structure in 0.25- μm GaAs pHEMT technology. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2024, vol. 14, no. 8, pp. 1454–1460.
 27. Li M., Yang Y., Da Xu K., Zhu X., Wong S.W. Microwave on-chip bandpass filter based on hybrid coupling technique. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2018, vol. 65, no. 12, pp. 5453–5459.
 28. Malyutin G.A., Thanh T.T., Chepko T.A., Arutyunyan A.A. Modeling and experimental study of non-reflective microwave filters. *2024 International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED)*, Sochi, Russia, IEEE, 2024, pp. 1–4.
 29. Harutyunyan A.A. [Modeling and experimental study of a non-reflective filter based on a strip three-wire coupled line]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki*, 2025, vol. 28, no. 2, pp. 55–61 (in Russ.).
 30. Loshchilov A.G., Malyutin N.D., Chin To Thanh, Malyutin G.A. [Reduction of return losses and suppression of out-of-band oscillations in interstage connections of communication systems using non-reflective frequency-selective microwave circuits]. *Control, Communication and Security Systems*, 2024, no. 4, pp. 72–94 (in Russ.).
 31. Chin T.T. *Modeli i konstruksii neotrazhayushchikh filtrov SVCh na osnove svyazannykh poloskovykh liniy i sosredotochennykh RLC-elementov* [Models and designs of non-reflective microwave filters based on connected strip lines and concentrated RLC elements]. Cand. Diss. Tomsk, 2024, 156 p. (in Russ.).
 32. Peng Z., Li B. Stripline directional coupler for immunity injection in integrated circuits. *2020 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*, Shanghai, China, IEEE, 2020, pp. 1–3.
 33. Diverrez G., Kerhervé E., De Matos M., Cathelin A. Compact and slow-wave tunable 28 nm CMOS-SOI twisted hybrid couplers for 5G applications. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2024, vol. 72, no. 4, pp. 2486–2497.
 34. Hao W., Li X., Pan Z., Miao R., Yue Z., Yang C., Wang A.Z. Advances and perspectives in magnetic-integrated inductors for RF ICs. *IEEE Transactions on Materials for Electron Devices*, 2024, vol. 1, pp. 106–120.
 35. Markovsky A.S., Lyubimov A.G., Petrushenya A.F., Kasperovich O.M., Lenartovich L.A. [Metastructures based on polymer composite materials and their properties in the microwave range]. *Trudy BGTU. Seriya 2: Khimicheskie tekhnologii, biotekhnologiya, geoekologiya*, 2024, no. 2 (283), pp. 122–135 (in Russ.).
 36. Wang B.X., He Y., Xu N., Wang X., Wang Y., Cao J. Design of dual-band polarization controllable metamaterial absorber at terahertz frequency. *Results in Physics*, 2020, vol. 17, pp. 103077.
 37. Li Y., Wu Y., Li D., Zhu M., Qiu Y., Yu G., Li E. A miniaturized perfect metamaterial absorber for EMI radiation suppression. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2024, vol. 66, no. 3, pp. 776–786.
 38. Xiong W., Jiang M., Zhu M., Zhu B., Lu J. Analysis of electromagnetic shielding of IC package with thin absorbing material coating inside in two different configurations. *2018 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC/APEMC)*, Singapore, IEEE, 2018, pp. 1216–1221.
 39. Kurien C.E., Sindhu T.K., Koshy D.E. Modelling and implementation of an active EMI filter for conducted EMI noise reduction. *2021 IEEE 5th International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON)*, Vadodara, India, IEEE, 2021, pp. 205–210.
 40. Shen Y.S., Ker M.D., Jiang H.C. Transient voltage suppressor (TVS) on signal integrity of microelectronics system with CMOS ICs under system-level ESD test. *2020 IEEE International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits (IPFA)*, Singapore, IEEE, 2020, pp. 1–4.
 41. Rana M.T., Mazumder S., Chakraborty S., Salapaka M.V., Basu K. PWM inverter based active filter for high frequency AC systems in space applications. *2024 IEEE International Communications Energy Conference (INTELEC)*, Montreal, Canada, IEEE, 2024, pp. 1–6.
 42. Abidin A.F., Hamidi F.S.A.L., Ayub M.A.M., Zain M.Y.M., Aminudin N. Performance of series active power filter (SAPF) using ANN controller for eliminate disturbance of voltage sag. *2022 IEEE International Conference in Power Engineering Application (ICPEA)*, Shah Alam, Malaysia, IEEE, 2022, pp. 1–5.
 43. Tien D.V., Trung T.B., Van Pham N. Analysis and simulation of active filter in distribution network with nonlinear and asymmetrical load. *2023 12th International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS)*, Hanoi, Vietnam, IEEE, 2023, pp. 322–327.

44. Gadelkarim A.G., Mercier P. A 3.5 mW mm-wave low-noise active bandpass filter employing an all-passive interferer-cancellation feedforward path. 2025 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC), San Francisco, USA, IEEE, 2025, vol. 68, pp. 1–3.
45. Song P., Hashemi H. Mm-wave mixer-first receiver with selective passive wideband low-pass filtering. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2021, vol. 56, no. 5, pp. 1454–1463.
46. Wang Y., Wu B., Huang H. A 3rd/5th order active RC Chebyshev analog baseband low-pass filter with reconfigurable bandwidth and gain. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 129319–129328.
47. Gadelkarim A.G., Mercier P.P. A 18.2 mW subsampling mm-wave receiver employing a subtractive anti-aliasing active bandstop filter at 23 GHz. 2024 IEEE Custom Integrated Circuits Conference (CICC), Denver, USA, IEEE, 2024, pp. 1–2.
48. Srivastava G., Bhatt D. A 16–20 GHz mixer first receiver architecture with active inductor-based low-pass elliptic filter with high OOB-IIP3 in 180 nm CMOS. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2025, vol. 72, no. 3, pp. 1152–1164.
49. Li J., Zhang Y., Ma K., Ma Z., Fu H. A bandpass power amplifier applying transformer-based filtering combiner in 0.5- μ m GaAs pHEMT. *IEEE Microwave and Wireless Technology Letters*, 2023, vol. 33, no. 7, pp. 1023–1026.
50. Gannedahl R., Sjöland H. Active and passive integrated filters for multi-GHz 6G baseband applications. 2023 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), Taipei, Taiwan, IEEE, 2023, pp. 524–526.
51. Khorshidian M., Garimella S.L.N., Nagulu A., Krishnaswamy H. An inductor-less all-passive higher-order N-path filter based on rotary clocking in N-path filters. 2022 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium (IMS 2022), Denver, USA, IEEE, 2022, pp. 241–244.
52. Talluri G.R., Rakesh K.K., Baghini M.S. A 4–14 Gbps inductor-less adaptive linear equalizer using hybrid filter in 65 nm CMOS technology. Sixteenth International Symposium on Quality Electronic Design, Santa Clara, USA, IEEE, 2015, pp. 90–97.
53. Rahane S.B., Kureshi A.K., Kharate G.K. OTA-C filters for biomedical signal processing applications using hybrid CMOS-CNFET technology. 2018 International Conference on Intelligent and Innovative Computing Applications (ICONIC), Plaine Magnien, Mauritius, IEEE, 2018, pp. 1–5.
54. Mukherjee A., Tang X., Hsu C.K., Sun N. Design tradeoffs for a CT- $\Delta\Sigma$ ADC with hybrid active-passive filter and FIR DAC in 40-nm CMOS. *IEEE Solid-State Circuits Letters*, 2020, vol. 3, pp. 214–217.
55. Lin Z., Mak P.I., Martins R.P. A 2.4-GHz ZigBee receiver exploiting an RF-to-BB-current-reuse Blixer+ hybrid filter topology in 65-nm CMOS. *Ultra-Low-Power and Ultra-Low-Cost Short-Range Wireless Receivers in Nanoscale CMOS*, Cham, Springer International Publishing, 2015, pp. 33–55.
56. Lee C.C., Hsieh H.C., Hsu S.S.H. A low-power miniature 20 Gb/s passive/active hybrid equalizer in 90 nm CMOS. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2015, vol. 25, no. 10, pp. 669–671.
57. Kwon K., Kim S., Son K.Y. A hybrid transformer-based CMOS duplexer with a single-ended notch-filtered LNA for highly integrated tunable RF front-ends. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2018, vol. 28, no. 11, pp. 1032–1034.
58. Kwon K., Lee K. A 23.4 mW 68 dB dynamic range low band CMOS hybrid tracking filter for ATSC digital TV tuner adopting RC and Gm-C topology. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2011, vol. 58, no. 10, pp. 2346–2354.
59. Jeong S., Park J., Kim J. A customized integrated circuit for active EMI filter with high reliability and scalability. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, vol. 36, no. 11, pp. 12631–12645.
60. Huang J.F., Lai W.C., Kao F.T., Huang K.J., Chen K.L., Liu R.Y. A high performance continuous-time sigma-delta modulator with a 2 MHz bandwidth hybrid loop filter for wireless healthcare applications. 2013 6th International Conference on Biomedical Engineering and Informatics, Hangzhou, China, IEEE, 2013, pp. 408–412.
61. Feng T., Ma K., Wang Y., Hu J. Bandpass-filtering power amplifier with compact size and wideband harmonic suppression. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2021, vol. 70, no. 2, pp. 1254–1268.
62. 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, IEEE, 2013, pp. 1–8.
63. Ali M., Fraeger L., Portnov A., Eilers B. Design approach to passive and active hybrid integrated EMI filters for high-frequency converters. PCIM Conference 2025; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, Nuremberg, Germany, VDE, 2025, pp. 905–914.
64. Han Y., Wu Z., Wu D. Hybrid common-mode EMI filter design for electric vehicle traction inverters. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 2022, vol. 8, no. 4, pp. 52–60.
65. Ali M., Labouré E., Costa F., Revol B. Design of a hybrid integrated EMC filter for a DC–DC power converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2012, vol. 27, no. 11, pp. 4380–4390.
66. Chen Q., Zhou P., Pei X., Yu Y., Kang Y. A novel design method for hybrid common-mode EMI filters based on attenuation adjustability. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2025, vol. 40, no. 2, pp. 3138–3149.
67. Li H., Wang S., He D., Zhao Z., Su W. A hybrid EMI filter incorporating active Y-capacitor for common-mode noise mitigation. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2025, vol. 40, no. 4, pp. 5252–5264.

Sergey V. Vlasov

Postgraduate student, Assistant, Department of Microwave and Quantum Radio Engineering, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin Ave., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0002-3848-1079
Phone: +7 (382-2) 41-36-43
Email: sergei.v.vlasov@tusur.ru

Received: 18.11.2025.

Accepted: 22.04.2026.