

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ БЛОКОВ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Асиненко А.М., аспирант

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники<sup>1</sup>  
г. Минск, Республика Беларусь

Грабчиков С.С. – д-р тех. наук

**Аннотация.** В работе рассматриваются вопросы электромагнитной совместимости (ЭМС) блоков беспилотных летательных аппаратов. Исследуются физические основы ЭМС, источники электромагнитных помех и чувствительные компоненты систем БПЛА. Представлены методы обеспечения электромагнитной совместимости, включая конструктивные решения, фильтрацию сигналов и организацию кабельных систем. Освещены современные технологии защиты и стандарты в области ЭМС. Показана важность комплексного подхода к решению проблем электромагнитной совместимости при проектировании и эксплуатации БПЛА.

**Ключевые слова.** Электромагнитная совместимость, ЭМС, беспилотные летательные аппараты, БПЛА, электронные компоненты, электромагнитные помехи, экранирование, фильтрация сигналов, силовые системы, навигационные модули, системы управления, стандарты ЭМС, электромагнитные наводки, паразитные ёмкости, конструктивные решения, цифровая обработка сигналов.

Электромагнитная совместимость (ЭМС) представляет собой комплексное свойство электронных систем БПЛА, обеспечивающее их корректную работу при совместном функционировании. В современных беспилотных системах, где плотность размещения электронных компонентов постоянно растёт, вопросы ЭМС приобретают особую актуальность и требуют системного подхода к решению.

Физические основы электромагнитной совместимости. Электромагнитные процессы в БПЛА характеризуются сложными взаимодействиями между различными компонентами. Основными факторами, влияющими на ЭМС, являются:

- электромагнитное излучение от электронных компонентов;
- наводки в проводящих элементах конструкции;
- паразитные ёмкости и индуктивности;
- эффект близости проводников.

Эти факторы могут вызывать нежелательные взаимодействия между различными системами БПЛА, что приводит к сбоям в работе или снижению точности и надёжности функционирования аппарата. Для минимизации негативных последствий необходимо учитывать особенности электромагнитного взаимодействия на всех этапах проектирования и эксплуатации БПЛА [1].

Основными генераторами помех выступают силовые элементы системы. Электронные регуляторы скорости (ESC) при коммутации высоких токов создают импульсные помехи, которые распространяются по цепям питания и через электромагнитное излучение. Бесколлекторные двигатели порождают значительные электромагнитные наводки в ходе коммутационных процессов. Силовые преобразователи и драйверы генерируют высокочастотные помехи, а системы зарядки аккумуляторов – низкочастотные.

Помимо внутренних источников, помехи могут возникать извне: от других электронных устройств, линий электропередач, радиопередатчиков, промышленных установок и даже природных явлений (например, грозových разрядов). При проектировании БПЛА важно учитывать, как внутренние, так и внешние источники помех, чтобы минимизировать риски сбоев.

Ряд устройств в БПЛА особенно уязвимы к электромагнитным наводкам. Навигационные модули GPS/ГЛОНАСС под воздействием сильных помех искажают определение координат и скорости, что критично для автономных режимов полёта. Системы передачи видео (FPV) страдают от электромагнитных наводок, что приводит к «шуму» на экране или полной потере сигнала.

Радиоканалы управления подвержены нарушениям из-за помех – это может нарушить связь с наземной станцией и создать риск неконтролируемого полёта или аварии. Датчики инерциальной навигационной системы (ИНС) под влиянием электромагнитных полей снижают точность измерения ускорения, угловой скорости и ориентации аппарата, искажая данные о его положении.

Для защиты таких компонентов применяют экранирование, фильтрацию сигналов и продуманную компоновку системы.

Комплексный подход к ЭМС объединяет несколько направлений. В первую очередь используются конструктивные решения: металлические корпуса экранируют ключевые компоненты, правильная компоновка минимизирует взаимное влияние силовых и чувствительных элементов, экранированные кабели снижают излучение и наводки, а эффективная система заземления отводит помехи.

Важную роль играет фильтрация сигналов. Конденсаторы подавляют высокочастотные помехи, LC-фильтры (комбинации индуктивностей и ёмкостей) устраняют импульсные наводки, ферритовые

бусины нейтрализуют помехи на проводах питания, а фильтры ЭМС защищают чувствительные компоненты на входных цепях.

Организация кабельных систем также требует внимания: разделение силовых и сигнальных цепей минимизирует наводки, витые пары снижают электромагнитное излучение, группировка кабелей по функциональному назначению упрощает экранирование, а минимизация длины проводников сокращает паразитные параметры.

Специальные меры защиты включают использование дифференциальных сигналов (для повышения помехоустойчивости), гальваническую изоляцию (оптрона, трансформаторы) для разрыва электрических связей между цепями, а также проектирование с учётом требований ЭМС на этапе разработки.

Особое внимание при проектировании БПЛА уделяется взаимодействию силовых и сигнальных цепей, поскольку даже незначительные наводки могут дестабилизировать работу критически важных систем. Например, импульсные токи от бесколлекторных двигателей способны создавать электромагнитные «всплески», которые проникают в цепи управления, вызывая ложные команды или сбои в алгоритмах стабилизации полёта. Чтобы минимизировать такие эффекты, инженеры тщательно моделируют электромагнитное поле внутри корпуса аппарата – зачастую с помощью специализированного ПО, позволяющего визуализировать зоны повышенного риска и корректировать компоновку ещё на этапе проектирования.

Ключевую роль играет грамотная трассировка кабелей. Витые пары, например, не просто снижают излучение – их конструкция компенсирует магнитные поля, создаваемые током, благодаря противоположному направлению скрученных проводников. Группировка кабелей по функциональности (силовые, управляющие, аналоговые) позволяет создать «чистые» зоны, где чувствительные сигналы не пересекаются с мощными токами. При этом даже небольшие изгибы или перегибы кабелей могут резко увеличить паразитные ёмкости, поэтому инженеры стремятся прокладывать провода максимально прямыми маршрутами, избегая резких поворотов [2].

Фильтрация сигналов требует тонкого баланса между подавлением помех и сохранением целостности полезного сигнала. LC-фильтры, например, настраиваются под конкретные частоты, характерные для используемых компонентов: слишком жёсткая фильтрация может исказить форму питающего напряжения, что критично для драйверов моторов. Конденсаторы, размещаемые близко к потребителям, действуют как «локальные накопители», сглаживая скачки тока и предотвращая провалы напряжения, которые могут нарушить работу микроконтроллеров.

Экранирование – не просто установка металлических корпусов, а сложный инженерный расчёт. Например, для GPS-модулей часто применяют многослойные экраны из меди и ферритовых материалов, которые блокируют низкочастотные помехи, не ухудшая приём спутниковых сигналов. При этом важно обеспечить непрерывность экрана: даже небольшие разрывы или неплотное прилегание к корпусу превращают его в «окно» для наводок. Нередко используются гибкие экранирующие ленты для защиты разъёмов и соединений, которые подвержены механическим нагрузкам.

Гальваническая изоляция через оптрона или трансформаторы особенно важна для интерфейсов, связывающих БПЛА с наземными станциями. Такие устройства разрывают прямой электрический путь, по которому помехи могли бы проникнуть в управляющую электронику. Например, в системах передачи телеметрии оптрона предотвращают «замыкание» между бортовым питанием и наземным оборудованием, что критично при работе в условиях высокого фона (например, вблизи ЛЭП).

На этапе монтажа критически важны несколько аспектов. Экраны кабелей должны надёжно соединяться с системой заземления – иначе они сами станут антеннами, усиливающими помехи. Минимизация площади токовых контуров снижает излучаемые помехи, а оптимизация путей заземления обеспечивает эффективный отвод помех через проводники с минимальным сопротивлением.

Короткие соединения уменьшают паразитные параметры (ёмкости, индуктивности), провоцирующие наводки. Не менее важно учитывать взаимное расположение компонентов: силовые элементы (двигатели, ESC) размещают вдали от приёмных антенн и чувствительных модулей, кабели питания и управления прокладывают так, чтобы они не пересекались с сигнальными линиями, а экранированные секции (например, для GPS-модулей) изолируют от источников помех.

Нормативная база ЭМС включает международные стандарты IEC (Международной электротехнической комиссии), европейские нормы EN, российские ГОСТы, а также специфические авиационные требования. Эти документы устанавливают критерии совместимости для оборудования, используемого в БПЛА, и учитывают особенности эксплуатации летательных аппаратов.

Соблюдение стандартов – обязательное условие для сертификации и легальной эксплуатации БПЛА в большинстве стран. Несоблюдение может привести к штрафам, запрету на полёты или проблемам с получением разрешений.

Инженеры разрабатывают инновационные решения для повышения ЭМС. Метаматериалы с особыми электромагнитными свойствами позволяют создавать лёгкие, но эффективные экраны.

Интеллектуальные системы фильтрации анализируют помехи в реальном времени и автоматически настраивают параметры подавления.

Алгоритмы цифровой обработки сигналов выделяют полезный сигнал даже из сильно зашумлённого канала, улучшая работу навигационных и видеосистем. Системы активного подавления генерируют компенсирующие сигналы, «гася» внешние помехи – например, для защиты радиоканалов управления.

Кроме того, программное обеспечение для моделирования (САПР) позволяет прогнозировать электромагнитное взаимодействие компонентов до сборки, сокращая количество итераций при проектировании.

Исследования в области ЭМС продолжаются: совершенствование материалов, алгоритмов и методов моделирования напрямую влияет на надёжность, дальность связи и точность работы БПЛА [3].

В итоге можно сказать, что обеспечение электромагнитной совместимости является критически важным аспектом проектирования и эксплуатации беспилотных летательных аппаратов. Комплексный подход к решению проблем ЭМС, включающий конструктивные, технологические и схемотехнические решения, позволяет создать надёжную и эффективную систему, способную работать в различных условиях эксплуатации.

Постоянное совершенствование методов обеспечения ЭМС остаётся одним из приоритетных направлений развития беспилотной авиации, что обусловлено растущей сложностью электронных систем и повышением требований к надёжности их функционирования. В современных условиях это особенно актуально в связи с расширением сфер применения БПЛА и увеличением плотности их размещения в воздушном пространстве.

Развитие технологий ЭМС не только способствует повышению эффективности и безопасности работы БПЛА, но и открывает новые возможности для их применения в различных отраслях – от сельского хозяйства и строительства до спасательных операций и мониторинга окружающей среды.

**Список использованных источников:**

1. Qiu f. Et al. *Thermal behavior of the yag precursor prepared by sol-gel combustion process // ceramics international. 2005. P. 663-665.*

2. Третьяков ю.д., путляев в.и. *введение в химию твердофазных материалов: учеб. Пособие. М.: изд-во моск. Ун-та: наука, 2006. 400 с.*

3. Чевела в.в. и др. *Цитраты алюминия (III) // ученые записки казанского университета: естественные науки. 2011. С.61-69.*