

УДК 621.372

Повышение помехозащищенности беспилотного летательного аппарата в условиях воздействия мощного электромагнитного излучения: комплексный подход

Белоусов А. О., Носов А. В.

Постановка задачи: в настоящее время беспилотные летательные аппараты (БПЛА) находят широкое применение во многих областях, что обуславливает высокие требования к их надежности и, в частности, обеспечению электромагнитной совместимости (ЭМС) их радиоэлектронных средств (РЭС). Наряду с развитием РЭС БПЛА, совершенствуются и средства функционального поражения (ФП) электромагнитным излучением (ЭМИ), воздействие которых может приводить, как минимум, к сбоям в работе, а как максимум – к выходу из строя бортовых систем БПЛА. Между тем использование «своих» средств ФП ЭМИ для противодействия БПЛА может привести к нарушениям работоспособности элементов собственных РЭС (приемных и передающих устройств, генераторов сигналов, устройств управления, стабилизации и формирования команд, различных электронно-вычислительных машин и др.). Это обусловлено высокой мощностью создаваемого ЭМИ и сложностями при обеспечении его «избирательности» в отношении поражаемых РЭС. Таким образом, вопрос повышения помехозащищенности РЭС БПЛА от воздействия средств ФП ЭМИ остается актуальным. **Целью работы** является демонстрация эффективности предложенных подходов к обеспечению ЭМС РЭС в составе БПЛА, включая использование модальной фильтрации и экранирующих конструкций, с сохранением целостности полезных сигналов. **Используемые методы:** в части подходов к обеспечению ЭМС использованы: теория решения изобретательских задач в составе диверсионного подхода; модальная фильтрация; параметрическая оптимизация эвристическим поиском; оценка полезных сигналов основных РЭС в составе БПЛА; применение экранирующих конструкций в составе БПЛА в т.ч. с магнитодиэлектриками в их составе. Для апробации предлагаемых подходов использован вычислительный эксперимент с применением квазистатического и электродинамического видов анализа. **Новизна:** впервые выполнена апробация предложенных подходов к обеспечению ЭМС РЭС на примере реального БПЛА Darwin 129, отличающаяся использованием модальных фильтров (МФ) на основе полосковых и кабельных структур с сохранением целостности полезных сигналов, а также экранирующих конструкций из многослойных материалов в 3 вариантах. **Результат:** показана результативность предлагаемых подходов на примере БПЛА Darwin 129. Так, в зависимости от используемого МФ и места его включения, ослабление сверхширокополосного (СШП) импульса составило от 44 до 90 раз. При этом, после прохождения СШП импульса через МФ, уровни остаточных напряжений не превышают допустимых значений для компонентов печатных плат (ПП) в составе БПЛА, расположенных на пути распространения помехи. Оценена целостность полезных сигналов интерфейсов ввода/вывода Darwin 129 при использовании МФ. Выполнена параметрическая оптимизация одного из используемых МФ для уменьшения влияния искажений. Оценено распределение напряженности поля на корпусе Darwin 129 и ПП в его составе. В наихудшем случае модуль ее максимального значения на корпусе составил 25 В/м (при падении плоской электромагнитной волны с правой стороны под углом 90° и с двух сторон под углом 75°), а на ПП – от 2,5 до 8 В/м (при падении плоской электромагнитной волны с правой стороны под углом 90°), в зависимости от рассматриваемой ПП. Для уменьшения модуля максимального значения напряженности поля предложено экранирование за счет 3 вариантов исполнения экранирующих

Библиографическая ссылка на статью:

Белоусов А. О., Носов А. В. Повышение помехозащищенности беспилотного летательного аппарата в условиях воздействия мощного электромагнитного излучения: комплексный подход // Системы управления, связи и безопасности. 2025. № 1. С. 10-47. DOI: 10.24412/2410-9916-2025-1-010-047

Reference for citation:

Belousov A. O., Nosov A. V. Enhancing the Electromagnetic Immunity of the Unmanned Aerial Vehicle under High-Intensity Electromagnetic Radiation: A Comprehensive Approach. *Systems of Control, Communication and Security*, 2025, no. 1, pp. 10-47 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2025-1-010-047

корпусов, состоящих из трех слоев (GN-Ni-GN). Выявлено, что наилучшим вариантом экранирования ПП в составе Darwin 129 является общий корпус с внутренними перегородками между ПП. В этом случае модуль максимального значения напряженности поля меньше для 3 рассматриваемых ПП в составе БПЛА в 229, 125 и 150 раз, соответственно. **Практическая значимость:** разработанные и апробированные (на примере РЭС реального БПЛА Darwin 129) подходы к обеспечению ЭМС могут быть адаптированы и результативно применены в других моделях и типах БПЛА, функционирующих в условиях интенсивных электромагнитных помех, в том числе создаваемых средствами ФП ЭМИ, ввиду своей универсальности. Кроме этого, результаты исследования могут быть полезны как на этапе проектирования, так и при модернизации существующих БПЛА для повышения помехозащищенности в условиях внешних дестабилизирующих факторов.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, электромагнитная совместимость, модальная фильтрация, экранирование, преднамеренные помехи, оптимизация, СШП импульс, функциональное поражение.

Актуальность

Сегодня беспилотные летательные аппараты (БПЛА) применяются во множестве областей: геодезия, картография, аграрная, нефтегазовая и лесная промышленности, мониторинг и дистанционное зондирование, кинопроизводство и др. [1, 2]. С их развитием увеличивается сложность и функциональность радиоэлектронных средств (РЭС), входящих в состав БПЛА. Одновременно с этим совершенствуются методы противодействия им, включая средства функционального поражения (ФП) электромагнитным излучением (ЭМИ), что создает новые вызовы для обеспечения устойчивости БПЛА в условиях интенсивного воздействия ЭМИ. Средствами ФП ЭМИ являются электромагнитные установки (пушки), взрывомагнитные генераторы, зенитные артиллерийские снаряды с излучателями мощных электромагнитных СВЧ-импульсов и др. Можно выделить образец военного комплекса «Ранец-Э» разработки Московского радиотехнического института Российской академии наук. По заявлению Рособоронэкспорта этот комплекс предназначен для борьбы с малыми БПЛА, а также крылатыми ракетами высокоточного оружия. Мощность излучения – 500 МВт в импульсе длительностью 10-20 нс в X-диапазоне [3]. Известно множество генераторов сверхширокополосных (СШП) воздействий, которые формируют излучение высокой направленности и большой мощности, способное с высокой вероятностью вывести из строя РЭС в составе БПЛА даже при кратковременном воздействии [4].

Стоит отметить, что использование «своих» средств ФП ЭМИ в целях борьбы с «вражескими» БПЛА может привести к нарушениям работоспособности элементов собственных РЭС (приемных и передающих устройств, генераторов сигналов, устройств управления, стабилизации и формирования команд, различных электронных вычислительных машин и др.). Причиной таких нарушений могут быть перекрытие спектров полезных сигналов помеховыми, наложение импульсов помех в цепях устройств на формируемые полезные сигналы с их последующей суперпозицией во времени; наводки во внешних и/или внутренних сигнальных цепях и цепях питания и др. Ситуация усугубляется высокой мощностью создаваемого ЭМИ и сложностью обеспечения его «избирательности» относительно поражаемых РЭС, способных ухудшить электро-

магнитную обстановку комплекса противодействия БПЛА [5]. Это остро ставит вопрос обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) БПЛА, особенно в условиях воздействия средств ФП ЭМИ.

Анализ существующих научных и технических работ показывает, что, несмотря на наличие стандартов по ЭМС РЭС, имеется недостаток работ, посвященных детализации подходов к обеспечению ЭМС РЭС в составе комплекса противодействия БПЛА средствами ФП ЭМИ. Этот пробел частично выполнен в предшествующей работе [6], где представлены предварительные результаты по созданию, структурированию и детализации новых подходов к обеспечению ЭМС РЭС в составе комплекса противодействия БПЛА средствами ФП ЭМИ. Среди этих подходов отмечена технология модальной фильтрации, устройства на основе которой обладают рядом преимуществ в сравнении с традиционными средствами защиты РЭС [7]. Однако рассмотрение примера конкретной модели БПЛА с предлагаемыми подходами к обеспечению ЭМС, в частности, с улучшенной помехозащищенностью в условиях воздействия средств ФП ЭМИ, ранее не выполнялось. Таким образом, цель данной работы – продемонстрировать эффективность предложенных подходов к обеспечению ЭМС РЭС в составе БПЛА, включая использование модальной фильтрации и экранирующих конструкций, с сохранением целостности полезных сигналов.

Исходные данные

В данном исследовании авторы расширяют и применяют ряд предложенных в [6] подходов к обеспечению ЭМС РЭС в составе БПЛА на реальном примере. Рассмотрены следующие подходы:

1. Априорный учет воздействия, в т.ч. из базы данных [8] характеристик средств ФП ЭМИ.
2. Использование теории решения изобретательских задач в составе диверсионного подхода [9].
3. Модальная фильтрация [10].
4. Оценка полезных сигналов основных РЭС в составе БПЛА при применении структур с модальными явлениями.
5. Применение экранирующих конструкций в составе БПЛА.
6. Применение магнитодиэлектриков в составе корпусов БПЛА [11, 12].
7. Параметрическая оптимизация эвристическим поиском.

Для апробации предлагаемых подходов использованы квазистатический и электродинамический подходы. Объектом исследования выбран БПЛА Darwin 129 7" Long Range PNP (далее по тексту – Darwin 129), представленный на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид Darwin 129

Длина и ширина Darwin 129 составляют по 280 мм, а высота 74 мм. Материал корпуса Darwin 129 – 3К карбон (в одном пучке около 3000 углеродных волокон/нитей). Структура корпуса позволяет разместить помехозащитные устройства на лучах, в верхней, нижней и центральной (при должном размещении предустановленных печатных плат (ПП) посредством ручной регулировки высоты их крепления) частях. Полезная нагрузка БПЛА составляет 1612 г, так что часть этой массы можно использовать для установки дополнительных помехозащитных устройств. Наконец, большой объем информации о Darwin 129 присутствует в общем доступе, что дает хорошее понимание о типах используемых в нем РЭС. На рис. 2 представлена структурная схема Darwin 129 [13]. В его центральной части (рис. 3) друг над другом через 10 мм располагаются: полетный контроллер, регулятор оборотов и видеопередатчик. Сместив их, можно освободить около 17 мм под монтаж дополнительных помехозащитных устройств. Полетный контроллер F4, используемый в данном БПЛА, имеет 6 портов для подключения различных РЭС. На рис. 4 представлен его внешний вид [14], где 1 – порт GPS-модуля (UART), 2 – micro USB, 3 – порт регулятора оборотов (SPI), 4 – порт видеокамеры (SPI), 5 – порт видеопередатчика (UART), 6 – порт ПП индикации (UART) и 7 – контакты для подключения радиоприемника/передатчика (I2C). На рис. 5 представлен регулятор оборотов 4In1 50A Bhlheli_S ESC [15], где 1 – порт полетного контроллера (SPI), 2 – контакты для подключения моторов.

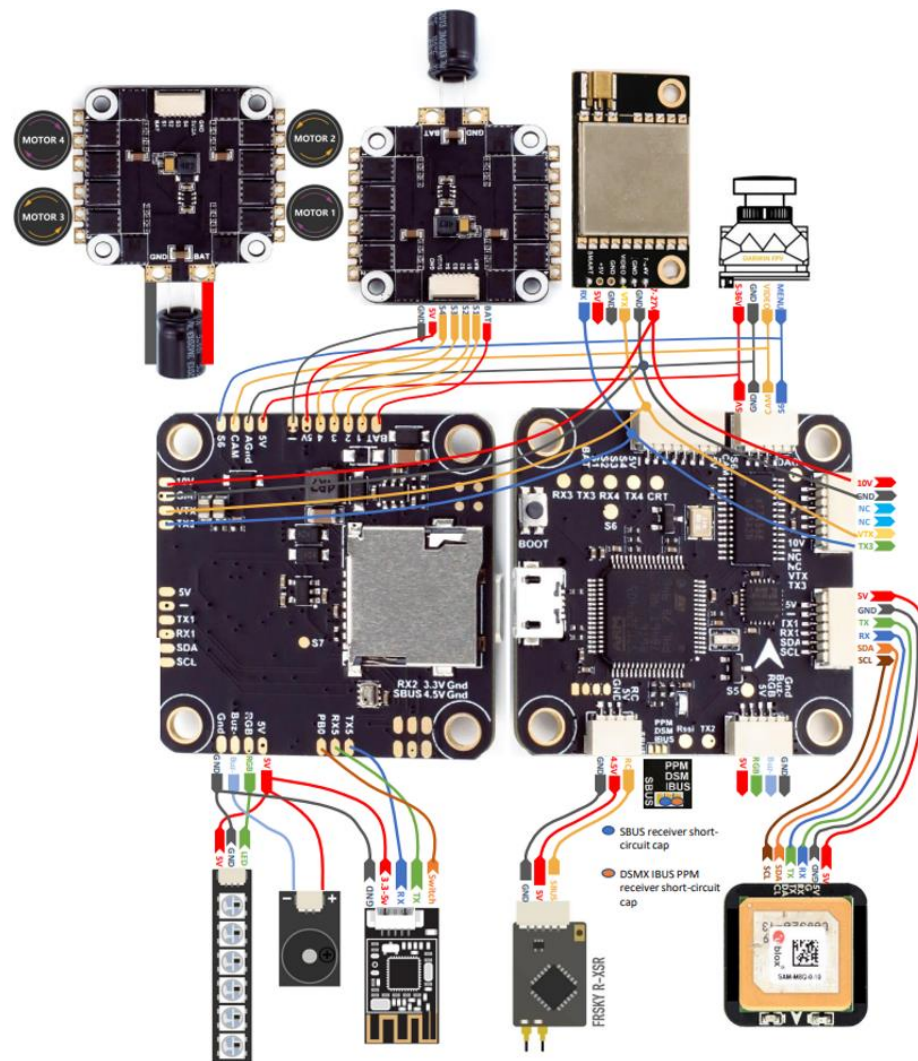


Рис. 2. Структурная схема РЭС в составе Darwin 129

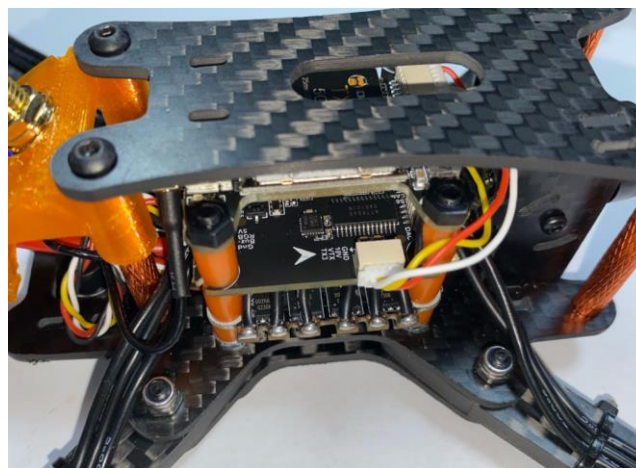


Рис. 3. Центральная часть Darwin 129 с платами полетного контроллера, регулятора оборотов двигателей и видеопередатчика

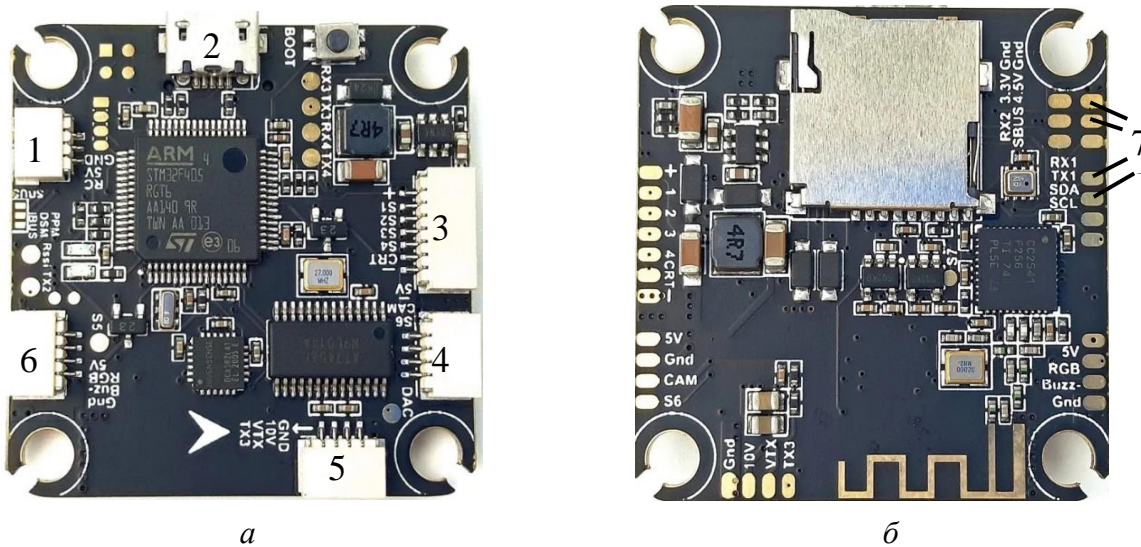


Рис. 4. Внешний вид верхнего (а) и нижнего (б) слоев ПП полетного контроллера F4

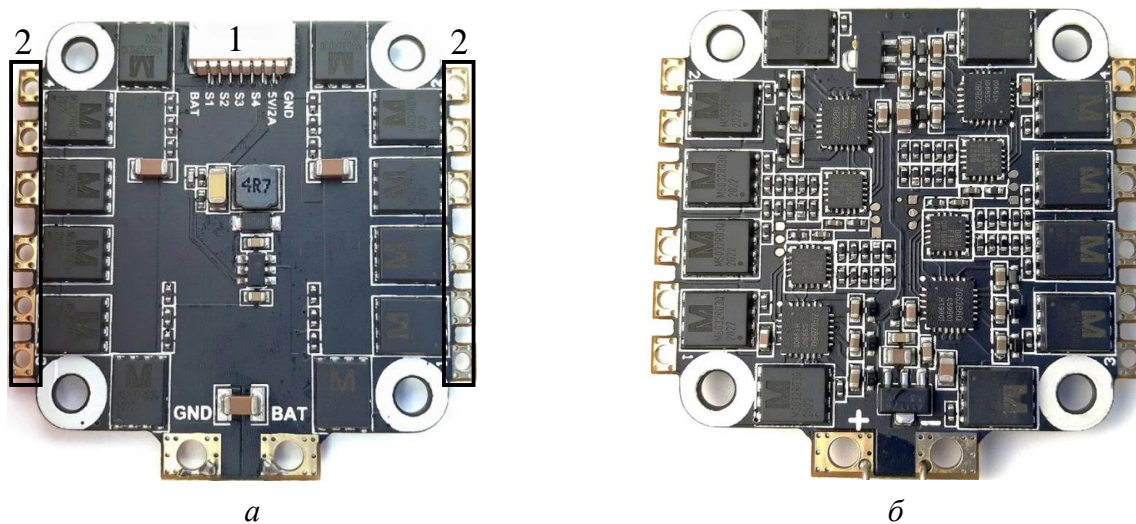


Рис. 5. Внешний вид верхнего (а) и нижнего (б) слоев ПП регулятора оборотов 4In1 50A Blheli_S ESC

Регулятор оборотов 4In1 50A Blheli_S ESC имеет 12 контактов (по 6 с двух сторон) для подключения бесщеточных моторов 2507 1800KV 3-6S, обладающих максимальной постоянной мощностью 840 Вт, при потребляемом токе 42 А. В нижней части регулятора оборотов расположены 2 контакта для подключения аккумулятора CNHL Black Series 1500 мАч и низкоимпедансного конденсатора ЕСАР (K50-35) (с обратной стороны). Он служит для сглаживания пульсаций тока, возникающих при работе моторов, и обеспечения стабильного питания регулятора оборотов и остальных РЭС. Регулятор оборотов имеет один порт для подключения к полетному контроллеру. На рис. 6 представлен видеопередатчик TX805P [16], где 1 – порт полетного контроллера (UART), 2 – соединитель для подключения антенны (MMCX).

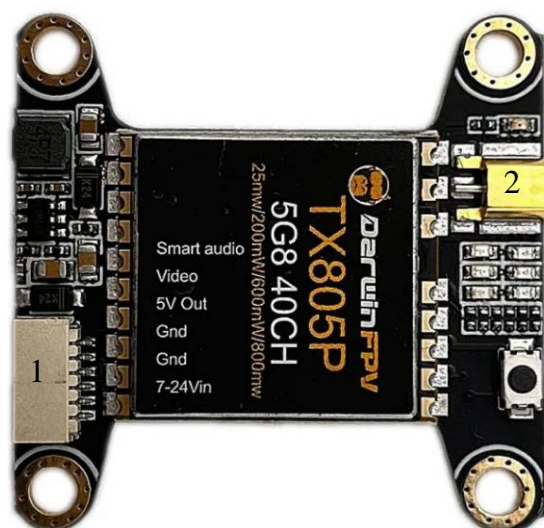


Рис. 6. Внешний вид видеопередатчика TX805P

Соединитель имеет три контакта, где центральный предназначен для передачи высокочастотного сигнала, а два боковых являются схемной землей. Порт для подключения полетного контроллера имеет 6 контактов с рядом обозначений на ПП: 7-24V, GND, GND, 5V Out, Video, Data. Контакт 7-24V предназначен для подключения полетного контроллера. Он подключен к преобразователю напряжения, к выходу которого подключен контакт 5V Out. Этот вывод обеспечивает питание 5 В для внешних устройств (например, для камеры). Контакт Video предназначен для передачи видеосигнала, а Data используется для передачи данных между полетным контроллером и видеопередатчиком. Также данный вывод может использоваться для определения настроек ПП: частоты, режима работы и др. Порт для подключения полетного контроллера включает в себя два контакта GND (земля), которые соединены с общей землей на ПП.

На задней части БПЛА размещен GPS-модуль Darwin M80 (рис. 7), и соединитель для дополнительной антенны типа SMA RHCP (правая круговая поляризация). Она значительно улучшает качество приема спутникового сигнала, особенно в условиях помех или слабого сигнала, и, как следствие, повышает точность позиционирования и стабильность удержания позиции. Кроме того, при надежном GPS-сигнале БПЛА способен вернуться на место взлета при потере связи с пультом управления [17]. В нижней части БПЛА имеется ПП индикации, которая помогает определить положение БПЛА в воздухе (рис. 8). На нижней части корпуса расположен радиоприемник/передатчик, который отвечает за связь с пультом управления и передачу управляющих команд [18]. В передней части располагается видеочка DarwinFPV с горизонтальным разрешением 1500 телевизионных линий (рис. 9). На рис. 10 представлены бесщеточные моторы 2507 1800KV 3-6S.

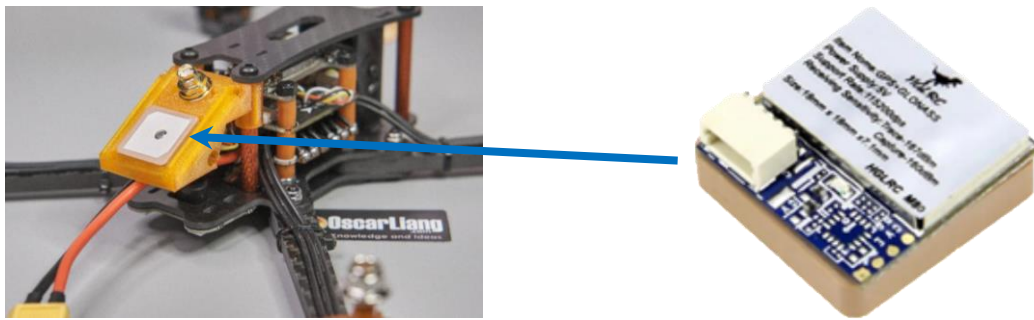


Рис. 7. GPS-модуль Darwin M80

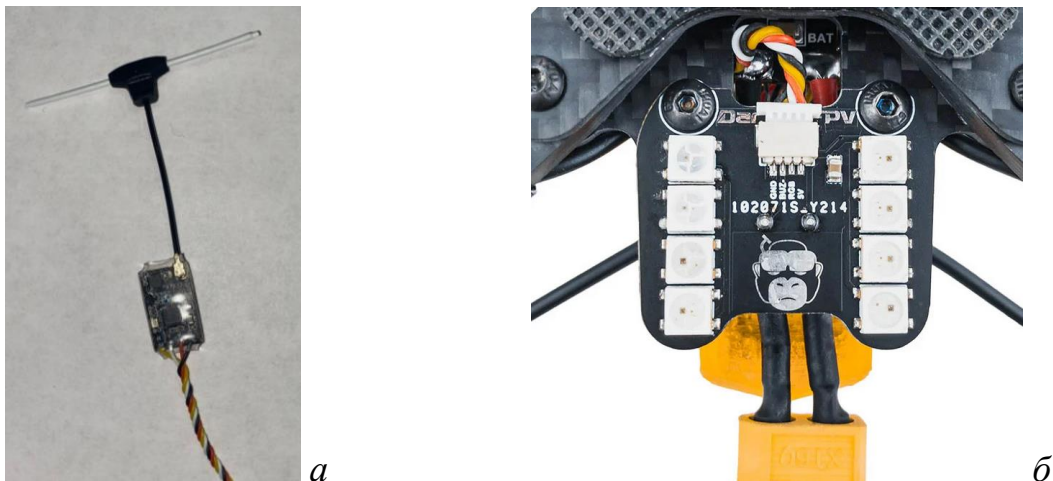


Рис. 8. Радиоприемник/передатчик (а) и ППИ индикации (б)



Рис. 9. Видеокамера DarwinFPV



Рис. 10. Общий вид (а) и вид снизу (б) бесщеточных моторов 2507 1800KV 3-6S

Оценка эффективности применения структур с модальным разложением

С учетом детального анализа РЭС в составе БПЛА, для защиты его критичных узлов предложено использование модальных фильтров (МФ) на основе

полосковых структур (МФ_П). Кроме этого, для защиты от воздействия СШП импульсов исходные кабели Darwin 129 могут быть заменены МФ на основе кабельных структур (МФ_К) посредством изменения расположения отдельных проводов и/или их объединения в единую изоляцию. Исходно провода в БПЛА располагаются отдельно друг от друга. С учетом сказанного, структурная схема Darwin 129 модернизирована и представлена на рис. 11, где отмечены выбранные МФ_П, включаемые в различные узлы Darwin 129, и МФ_К, заменяющие исходные кабели.

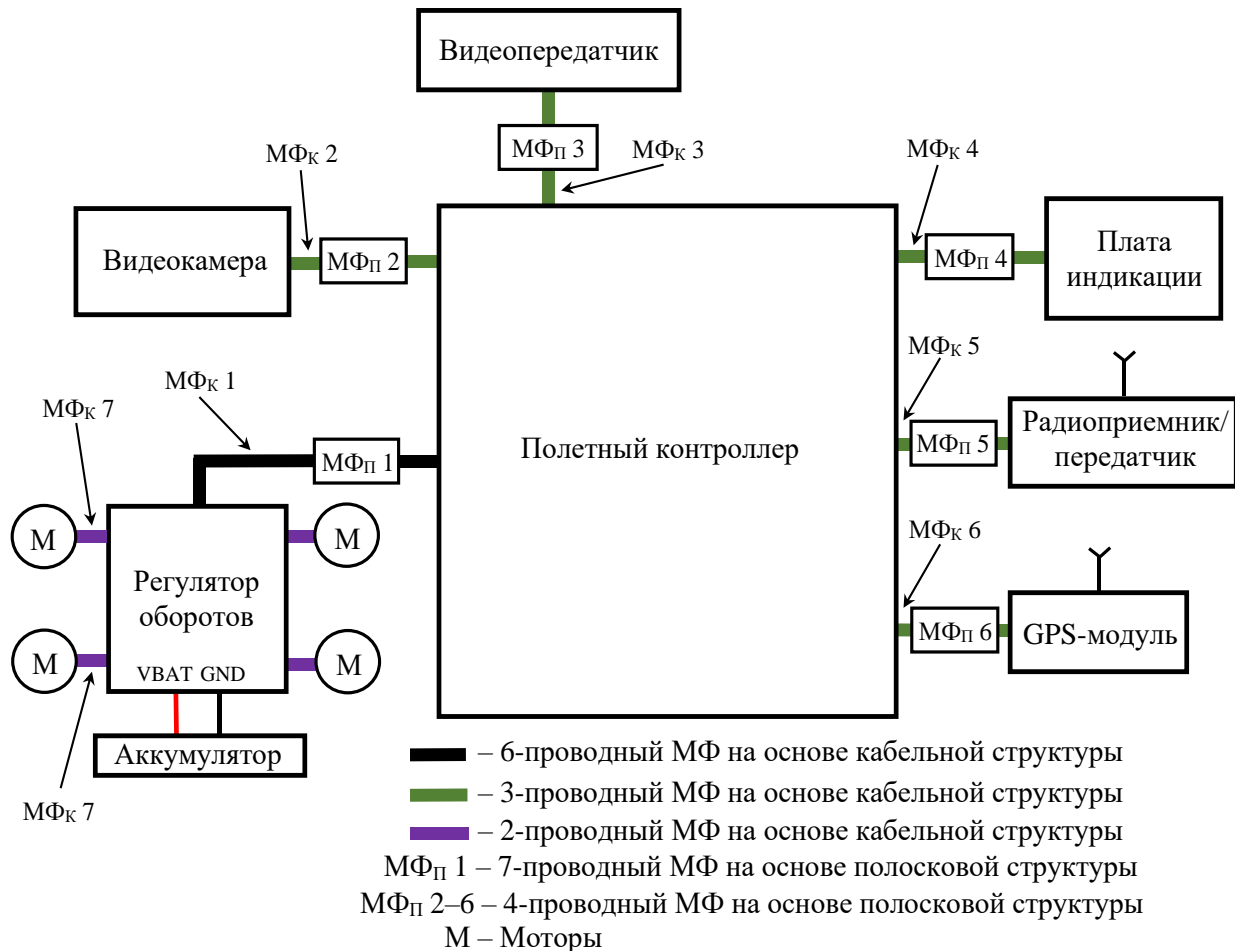


Рис. 11. Модернизированная структурная схема Darwin 129

Из рис. 11 видно, что кабели, соединяющие полетный контроллер с другими РЭС и регулятор оборотов с моторами, заменены на МФ_К. При этом кабели между регулятором оборотов и аккумулятором остались прежними, поскольку полагается, что они наименее восприимчивы к воздействию внешних СШП импульсов. За основу МФ_П взяты 4- и 7-проводная микрополосковые линии, а за МФ_К – 2-, 3- и 6-проводные кабели. На рис. 12 и 13 приведены поперечные сечения МФ_П 1, МФ_П 2–6, МФ_К 1, МФ_К 2–6 и МФ_К 7, где w – ширина проводников, s_i – зазор между проводниками, t – толщина проводников, h_i – толщина подложки, d – расстояние от края МФ до ближайших проводников МФ, ε_{ri} – относительная диэлектрическая проницаемость среды, r_1 – радиус проводников, r_2 – радиус изоляции вокруг проводников, r_3 – радиус внешней изоляции. Схемы соединений МФ_П 1, МФ_П 2–6, МФ_К 1, МФ_К 2–6 и МФ_К 7

представлены на рис. 14 и 15, где нагрузки на концах всех проводников (R) приняты по 50 Ом (для всех схем), а l – длина линии.

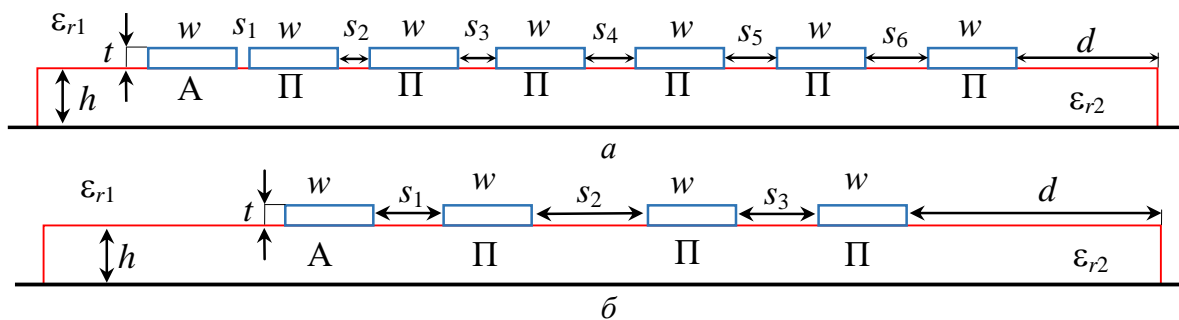


Рис. 12. Поперечные сечения МФ_П 1 (а) и МФ_П 2–6 (б)

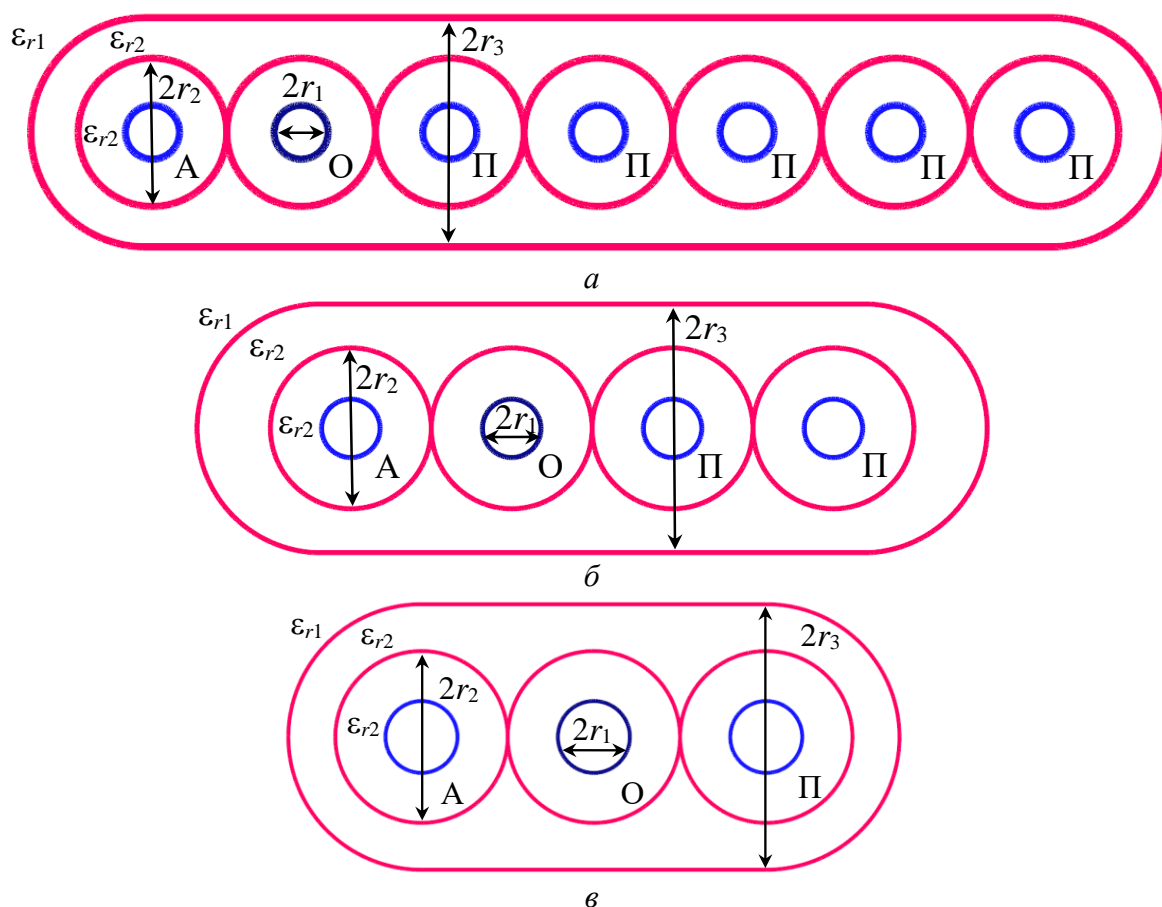


Рис. 13. Поперечные сечения 6-проводного МФ_К 1 (а), 3-проводного МФ_К 2–6 (б) и 2-проводного МФ_К 7 (в)

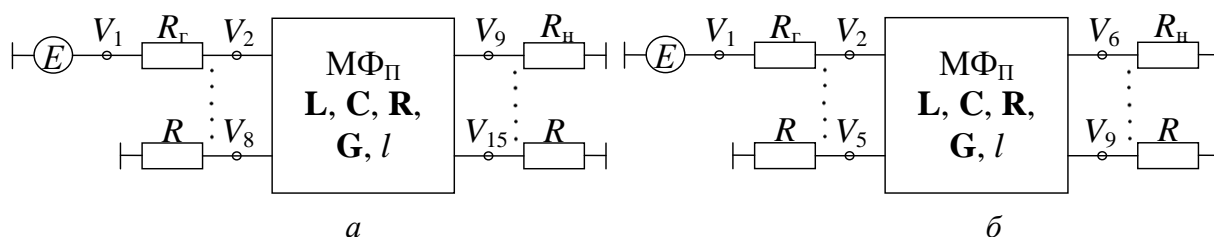


Рис. 14. Эквивалентные схемы МФ_П 1 (а) и МФ_П 2–6 (б)

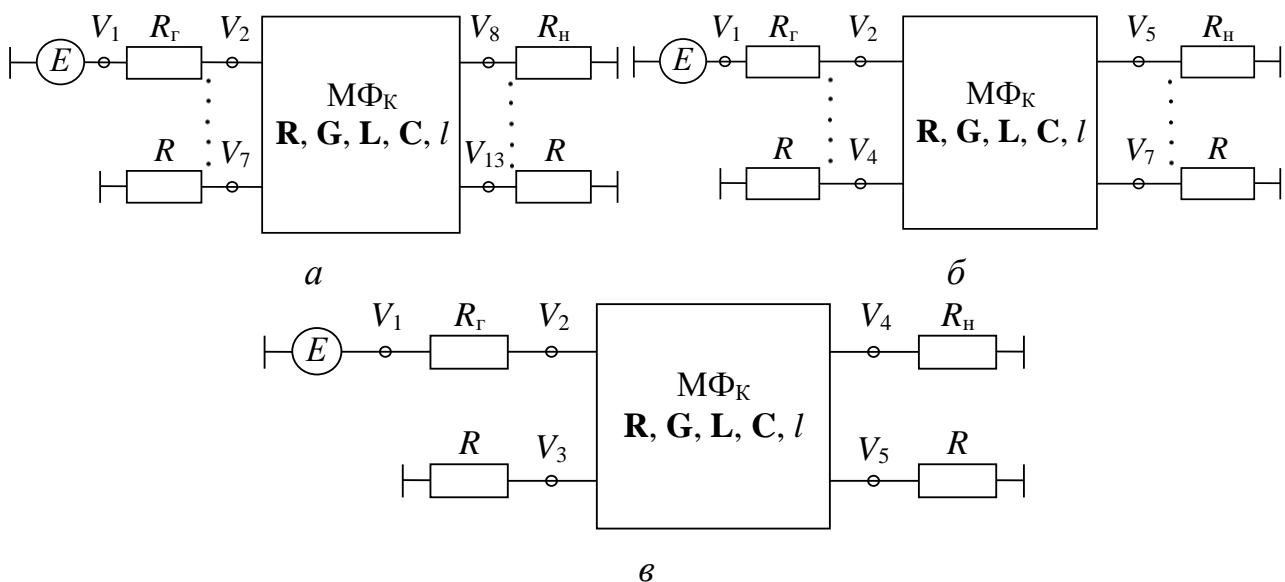


Рис. 15. Эквивалентные схемы 6-проводного МΦ_К 1 (а), 3-проводного МΦ_К 2–6 (б) и 2-проводного МΦ_К 7 (в)

Квазистатическое моделирование и оптимизация структур выполнены в системе TUSUR.EMC [19]. Оптимизация выполнена эвристическим поиском по критерию минимизации амплитуды на выходе структур. Оптимальные параметры, полученные в результате оптимизации, сведены в таблицу 1. В качестве диэлектрической подложки МΦ_П 1 выбран Arlon AD 1000, а в качестве изоляции МΦ_К 1–7 выбран РПМ ЗИПСИЛ 410 РПМ-Л [20].

Вычислены формы напряжения на входе и выходе исследуемых структур с оптимальными параметрами. В качестве воздействия использован оцифрованный СШП импульс с амплитудой ЭДС 500 В, длительностями фронта, спада и плоской вершины по 42 пс, 30 пс и 4 пс (по уровням 0,1–0,9) соответственно, так что общая длительность (по уровню 0,5) – 60 пс. Формы ЭДС и напряжений на входе и выходе исследуемых структур представлены на рис. 16–20.

Из рис. 16–20 видно, что на выходе исследуемых структур СШП импульс представлен последовательностью импульсов меньшей амплитуды. При этом на выходе МΦ_П 1–6 он представлен последовательностью наложенных импульсов, а на выходе МΦ_К 1–7 – одним импульсом, который, по существу, является результатом суперпозиции импульсов разложения. Ввиду значительного влияния потерь, трудно выделить отдельные импульсы из наложенного сигнала. Между тем ослабление СШП импульса достигает 7 раз для МΦ_П и до 49 раз для МΦ_К. Максимальное напряжение на входе ($U_{вх}$) и выходе (U_{max}) МΦ, а также ослабление помехи ($U_{вх}/U_{max}$) в исследуемых структурах, сведены в таблицу 2.

Таблица 1 – Оптимальные параметры исследуемых структур

Параметр	Структура				
	МФ _П 1	МФ _П 2–6	МФ _К 1	МФ _К 2–6	МФ _К 7
w , МКМ	350	165			
s_1 , МКМ	165	225			
s_2 , МКМ	225	370			
s_3 , МКМ	370	–			
s_4 , МКМ	390				
s_5 , МКМ	410				
s_6 , МКМ	420				
h , МКМ	200				
d , МКМ	1050				
t , МКМ	105				
r_1 , ММ	–		0,4		0,8
r_2 , ММ			1,1		1,5
r_3 , ММ			2,4	2,6	4,7
ε_{r1}	1				
ε_{r2}	10,2	10	20		
l , ММ	139	234	50		115

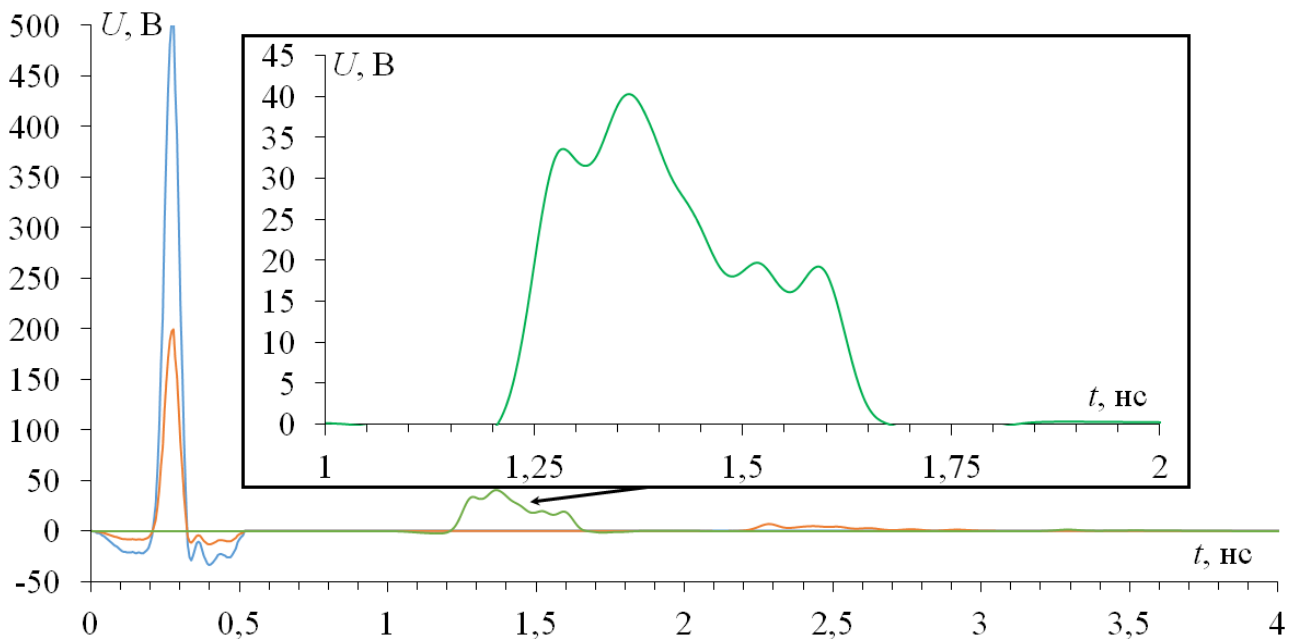


Рис. 16. Формы ЭДС (–), напряжения на входе (–) и выходе (–) МФ_П 1

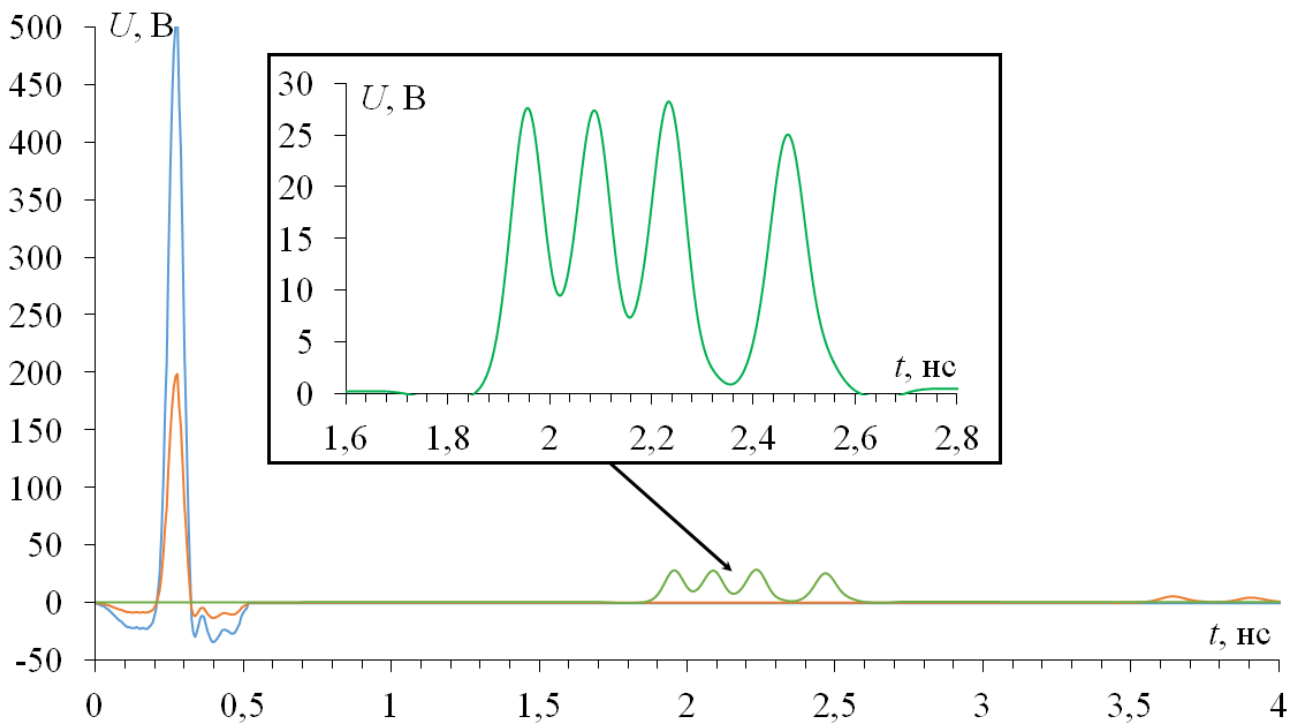


Рис. 17. Формы ЭДС (–), напряжения на входе (–) и выходе (–) МФ_{II} 2–6

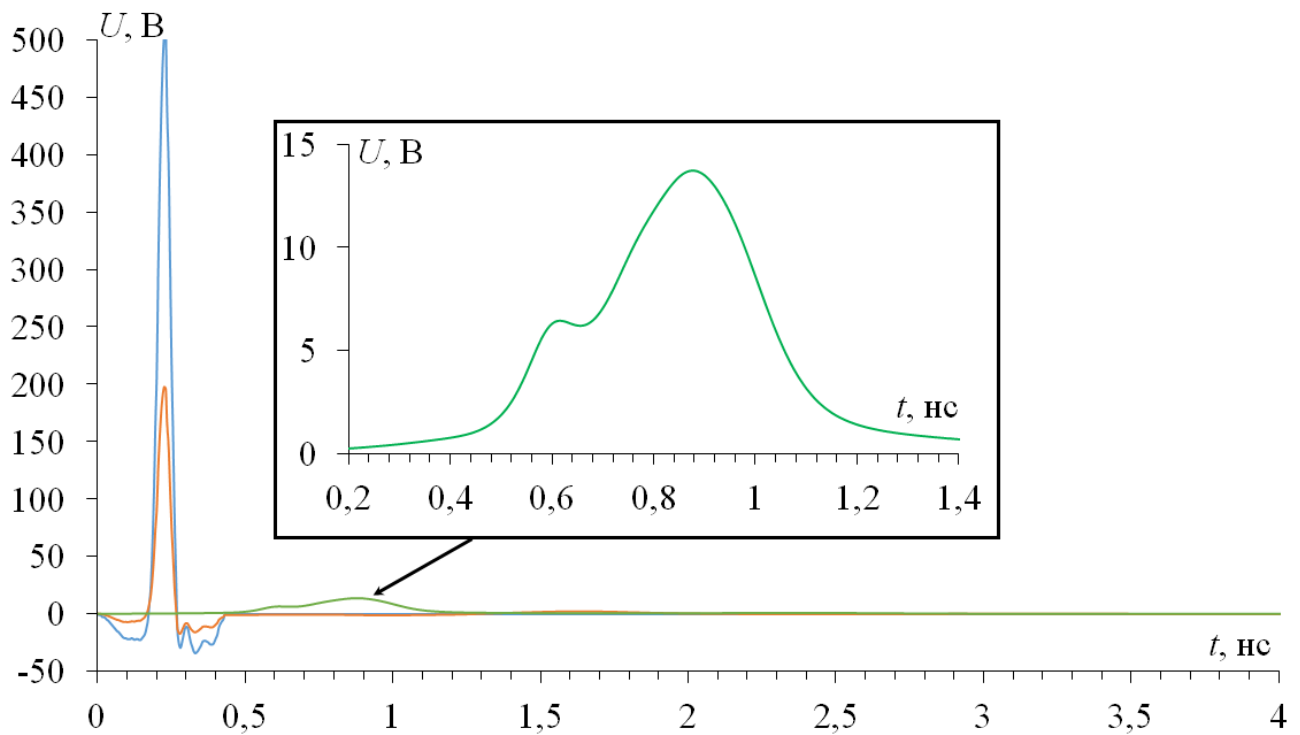


Рис. 18. Формы ЭДС (–), напряжения на входе (–) и выходе (–) МФ_K 1

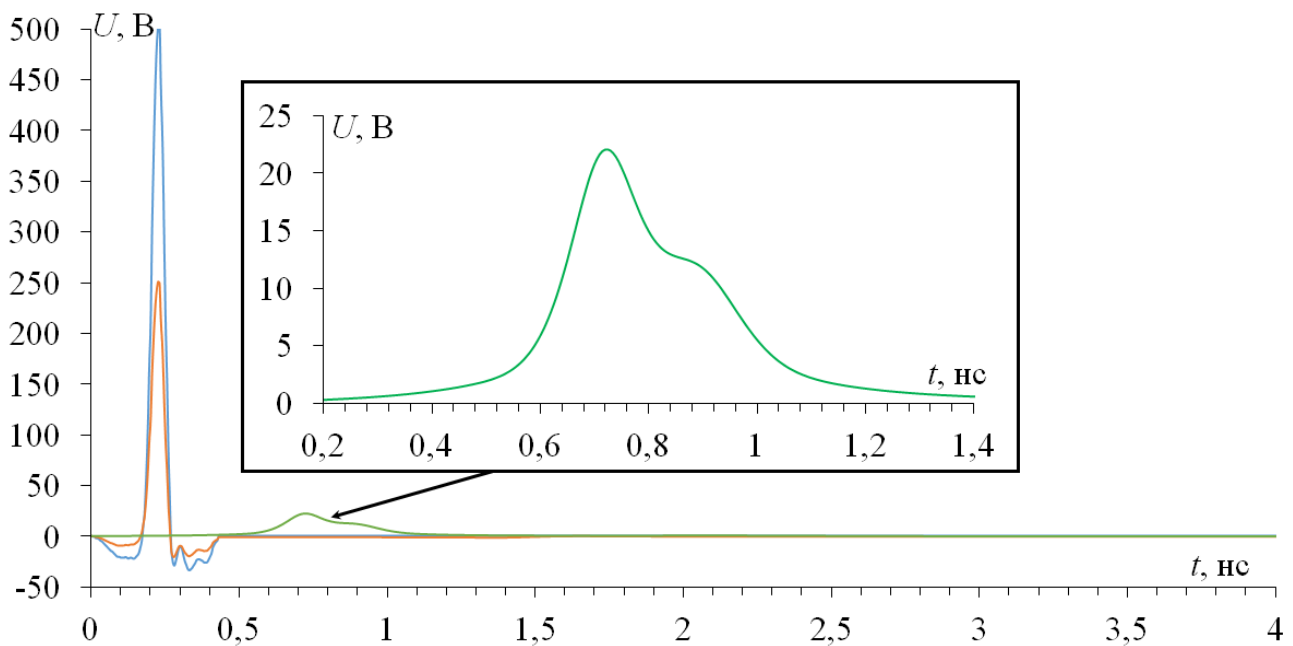


Рис. 19. Формы ЭДС (—), напряжения на входе (—) и выходе (—) МФ_К 2–6

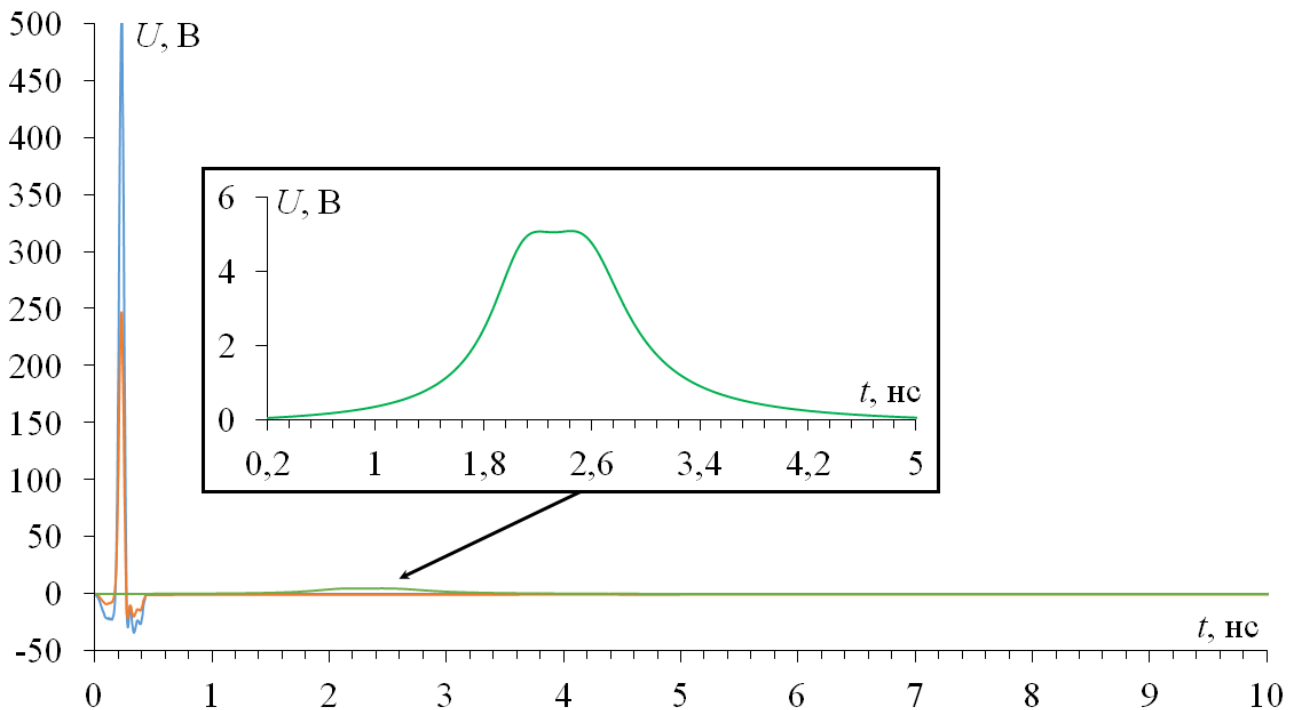


Рис. 20. Формы ЭДС (—), напряжения на входе (—) и выходе (—) МФ_К 7

Таблица 2 – $U_{вх}$, U_{max} и $U_{вх}/U_{max}$ в исследуемых структурах

Структура	МФ _П 1	МФ _П 2–6	МФ _К 1	МФ _К 2–6	МФ _К 7
$U_{вх}$, В	200			250	
U_{max} , В	40,22	28,25	13,76	22,11	5,09
$U_{вх}/U_{max}$	5	7	14,5	11,3	49,1

Для интеграции МФ_П 1–6 в состав Darwin 129, выполнена их трассировка с учетом допустимых габаритов корпуса БПЛА. Изначальные габариты МФ_П 1

составляли $139 \times 6,55 \times 0,305$ мм, а МФ_П 2–6 – $234 \times 4,26 \times 0,305$ мм, соответственно. В результате трассировки, для соответствия монтажным отверстиям ПП полетного контроллера и регулятора оборотов, габариты МФ_П были изменены: для МФ_П 1 они составили $30,5 \times 30,5 \times 0,305$ мм, а для МФ_П 2–6 – $30,3 \times 30,5 \times 0,305$ мм (рис. 21).

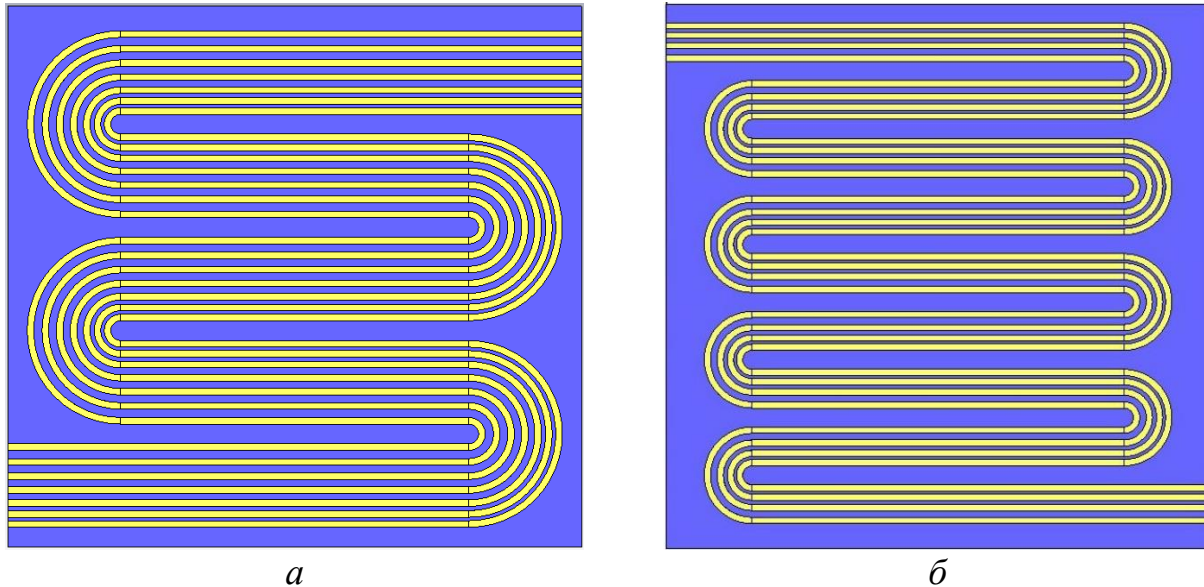


Рис. 21. Трассировка МФ_П 1 (а) и МФ_П 2–6 (б)

На рис. 22 приведены 3D модели МФ_К 1, МФ_К 2–6, МФ_К 7. Их сечения и длины аналогичны исходным кабелям. Так, они могут использоваться штатно, обеспечивая дополнительную защиту узлов Darwin 129 от воздействия внешних СШП помех.

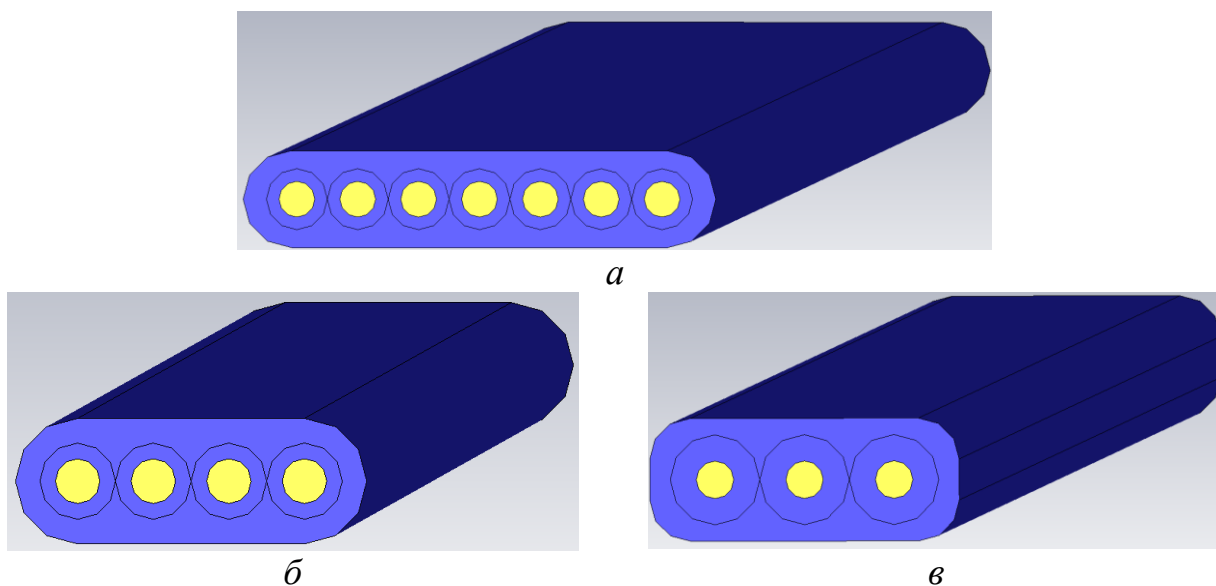


Рис. 22. 3D модели МФ_К 1 (а), МФ_К 2–6 (б), МФ_К 7 (в)

Важно отметить, что исследуемые МФ_П могут не обеспечить достаточно-го ослабления СШП импульсов до безопасного уровня для компонентов, распо-

ложенных по пути его распространения. Решением является реализация защиты с учетом структурной схемы цепей БПЛА из рис. 11. Она подразумевает включение МФ_П между МФ_К на пути к защищаемому узлу, что может значительно ослабить воздействующие СШП импульсы. По существу, исходные кабели заменяются МФ_К. Для оценки эффективности такого подхода выполнено электродинамическое моделирование на примере двух схем включения исследуемых МФ, представленных на рис. 23. Формы ЭДС и напряжений на входе отрезка 1 и выходе отрезка 3 схем 1 и 2, полученные в результате электродинамического моделирования, представлены на рис. 24 и 25.

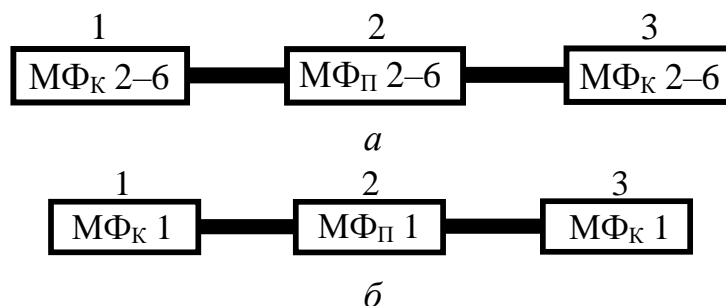


Рис. 23. Схемы последовательного включения: 1 – МФ_П 2–6 между двумя МФ_К 2–6 (а) и 2 – МФ_П 1 между двумя МФ_К 1 (б)

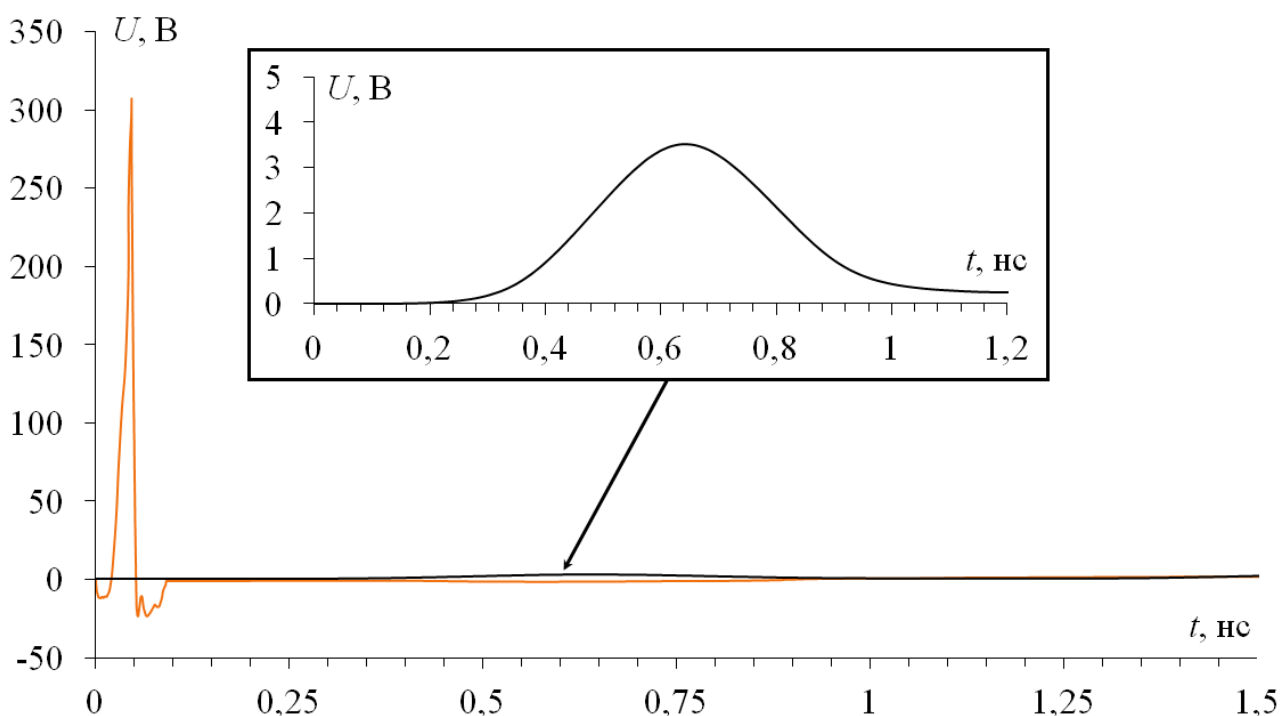


Рис. 24. Формы напряжения на входе отрезка 1 (–) и выходе отрезка 3 (–) схемы 1

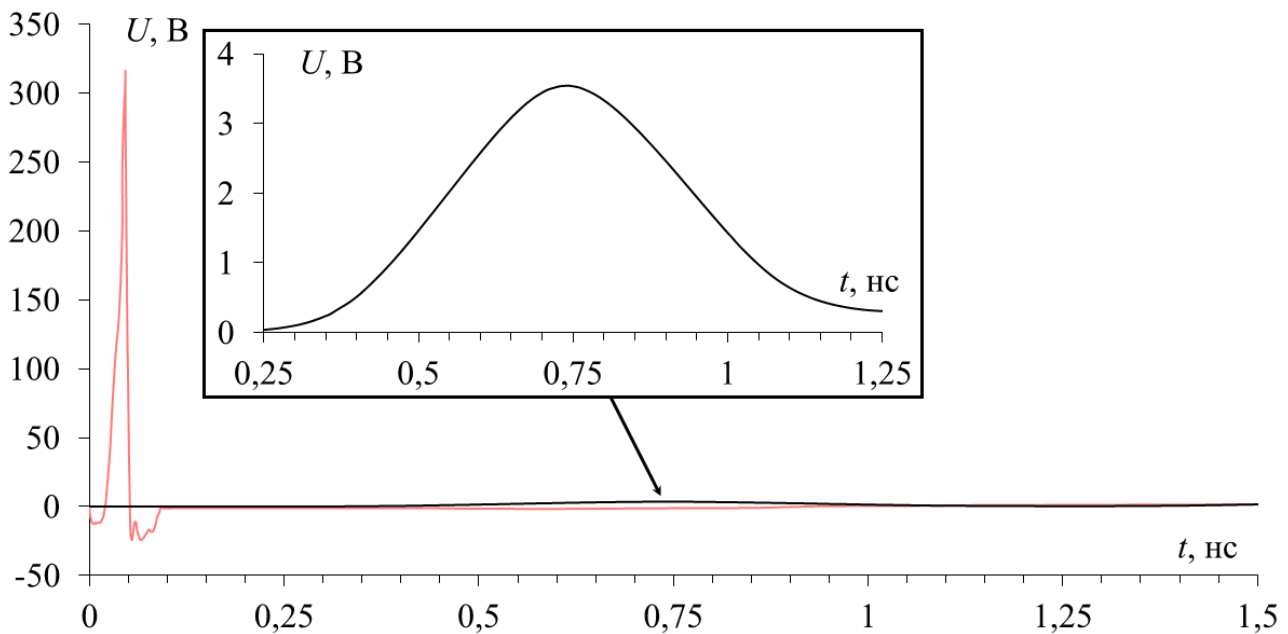


Рис. 25. Формы напряжения на входе отрезка 1 (—) и выходе отрезка 3 (—) схемы 2

Из рис. 24 видно, что к выходу схемы 1 приходит импульс (являющийся результатом суперпозиции импульсов мод с близкими временными интервалами между ними) с амплитудой не более 3,51 В, что меньше максимально допустимого напряжения 3,6 В первого компонента (микроконтроллера STM32) на пути распространения воздействующего СШП импульса. Так, ослабление СШП импульса в схеме 1 составило 86,9 раза (относительного $U_{вх}=305$ В). Из рис. 25 видно, что к выходу схемы 2 также приходит импульс с U_{max} не более 3,54 В. Так, ослабление СШП импульса в схеме 2 составило 90 раз (относительного $U_{вх}=315$ В).

Кроме того, проработана возможность физического размещения предложенных МФ в конструкции БПЛА Darwin 129. Они могут быть установлены в центральную часть БПЛА на опорные крепления полетного контроллера, регулятора оборотов и видеопередатчика. Это достижимо за счет уменьшения расстояния между ПП в составе БПЛА и увеличения высоты опорных креплений. Результат такого решения продемонстрирован на рис. 26.

Важно отметить, что использование предлагаемых МФ в БПЛА может негативно повлиять на целостность полезных сигналов в интерфейсах ввода/вывода его РЭС. Для оценки этого влияния выполнен соответствующий анализ. На рис. 27 представлена общая схема подключения РЭС БПЛА к плате полетного контроллера, в таблицу 3 сведены параметры их полезных сигналов, а в таблицу 4 – частоты среза (f_c) предлагаемых МФ (где МФ 1 и МФ 2–6 соответствуют схемам 1 и 2 на рис. 23, соответственно).

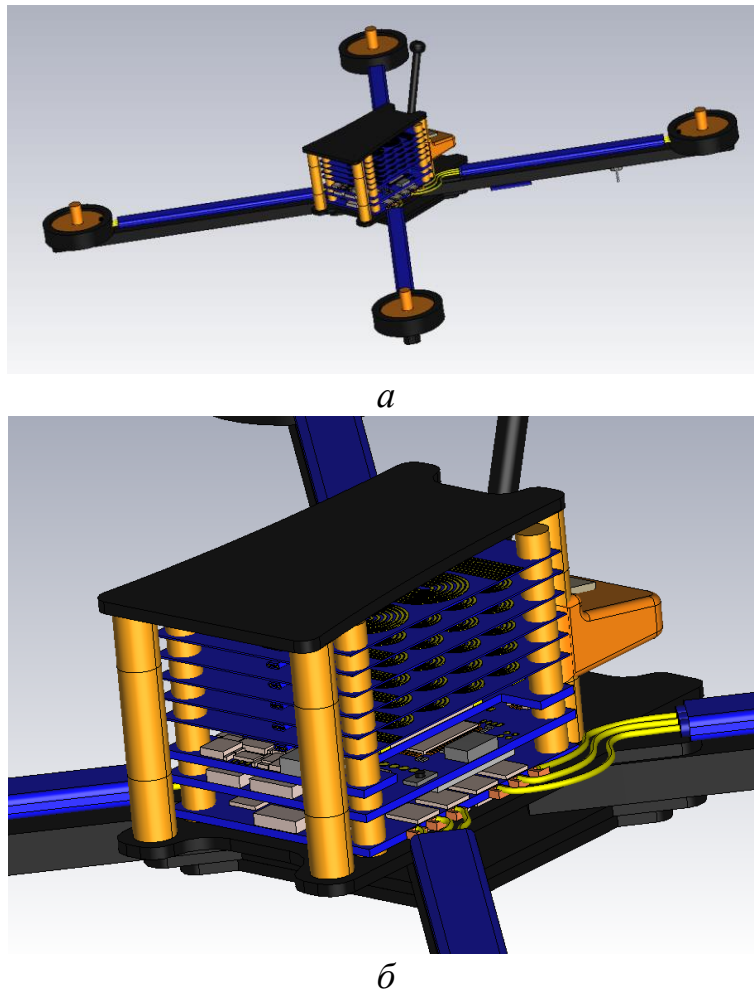


Рис. 26. 3D-модель Darwin 129 с МФ: общий вид БПЛА (а) и его центральная часть (б)

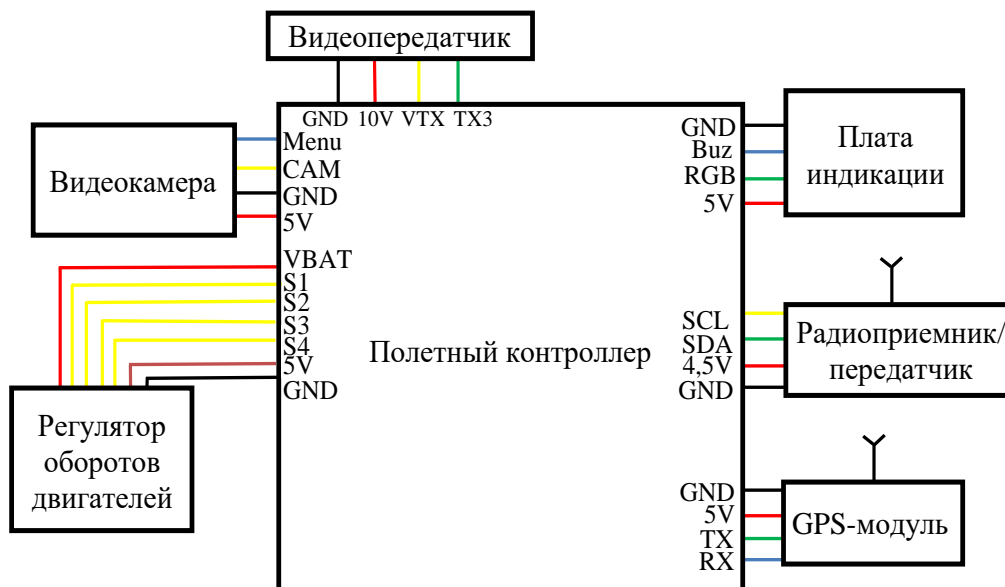


Рис. 27. Схема подключения РЭС БПЛА Darwin 129 к плате полетного контроллера

Таблица 3 – Параметры полезных сигналов РЭС в составе БПЛА

РЭС	Маркировка (из рис. 27)	Тип	Ампли- туда	Дли- тель- ность	Рабочая частота	Скорость передачи
Регулятор оборо- тов двигателей	S1	Цифр.	3,3 В	50 нс	20 МГц	20 Мбит/с
	S2					
	S3					
	S4					
Видеокамера	CAM	Аналог.	1 В	20 нс	70 МГц	50 Мбит/с
	Menu	Цифр.	5 В	100 нс	1,5 МГц	10 Мбит/с
Видеопередатчик	VTX	Аналог.	1 В	22 нс	130 МГц	45 Мбит/с
	TX3	Цифр.	5 В	35 нс	4 МГц	28 Мбит/с
ПП индикации	Buz	Аналог.	3 В	100 нс	20 кГц	10 Мбит/с
	RGB	Цифр.	3,3 В	100 нс	1,5 МГц	10 Мбит/с
Радиоприемник/ передатчик	SCL	Цифр.	4,5 В	0,42 нс	2,4 ГГц	2,4 Гбит/с
	SDA					
GPS-модуль	TX	Цифр.	5 В	0,62 нс	1,61 ГГц	1,61 Гбит/с
	RX					
Двигатели	PWM	Цифр.	5 В	8,3 мкс	3 кГц	120 кбит/с

Таблица 4 – f_c предлагаемых МФ

Структура	МФ _П 1	МФ _П 2-6	МФ _К 1	МФ _К 2-6	МФ _К 7	Схема 1	Схема 2
f_c , МГц	320	490	515	470	100	500	470

С учетом данных из таблиц 3 и 4, можно говорить о том, что все МФ могут эффективно использоваться с основными РЭС БПЛА Darwin 129, за исключением радиоприемника/передатчика и GPS-модуля (где используются МФ_П 2-6). Так, стабильная работа указанных РЭС требует обеспечения значения f_c предлагаемых МФ выше верхней частоты спектра полезных сигналов. Это связано с особенностями передачи данных в указанных РЭС (высокоскоростные цифровые сигналы с низким уровнем допустимых искажений). Для точной оценки влияния МФ на полезные сигналы построены глазковые диаграммы. При этом использовалась псевдослучайная последовательность данных длиной 10000 бит (с параметрами из таблицы 3). Глазковые диаграммы для МФ_П сведены на рис. 28, 29.

Из рис. 28, 29а, б, д, е видно, что глазковые диаграммы практически не содержат искажений, что свидетельствует о возможности использования МФ_П для соответствующих портов подключения. Между тем на рис. 29в, г, ж, з наблюдаются явно выраженные искажения. Несмотря на это, высота и ширина глазковых диаграмм остаются на уровне, обеспечивающем удовлетворительную целостность сигналов. Анализ показывает, что результаты, полученные различными методами, демонстрируют хорошее согласование.

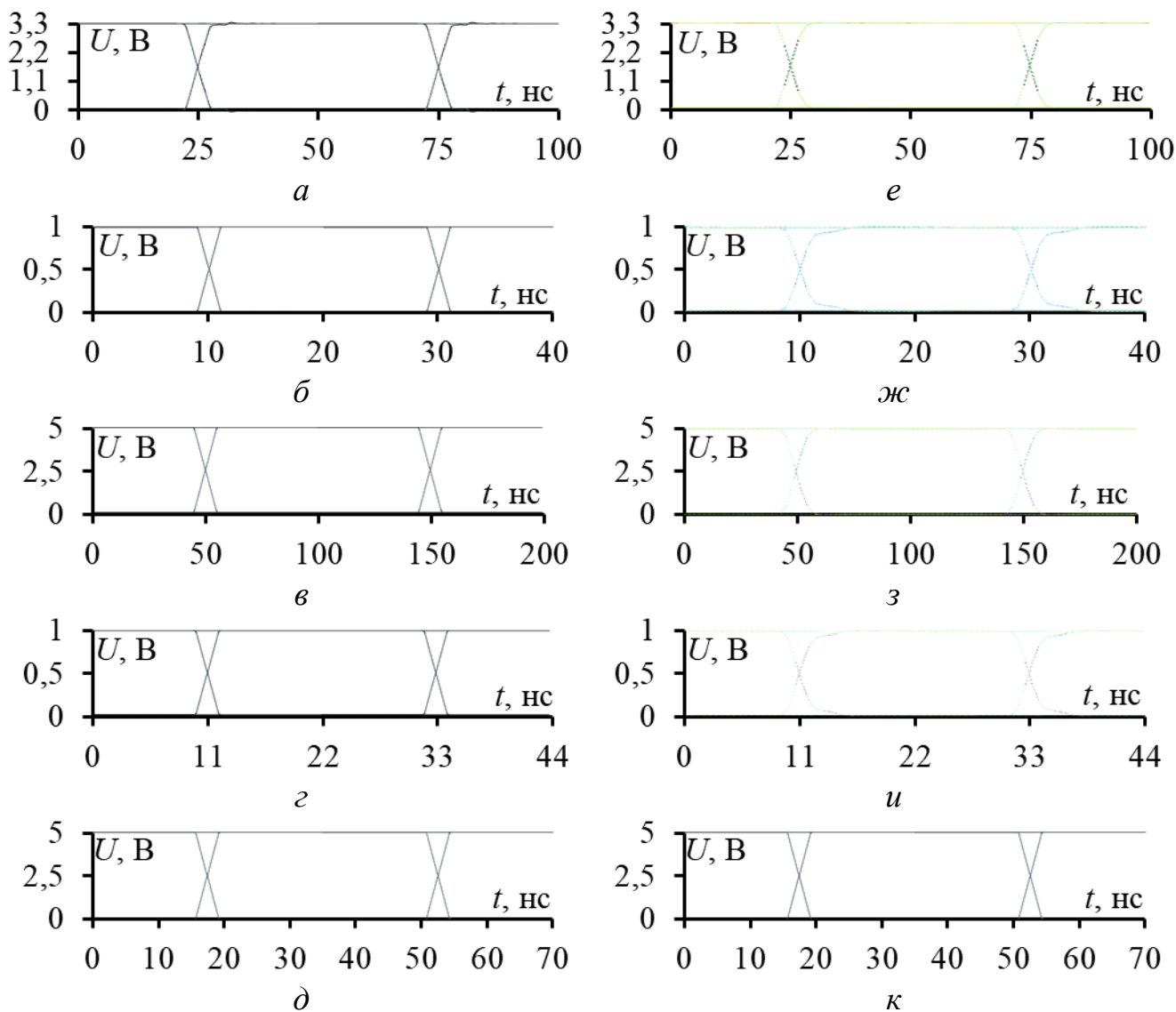
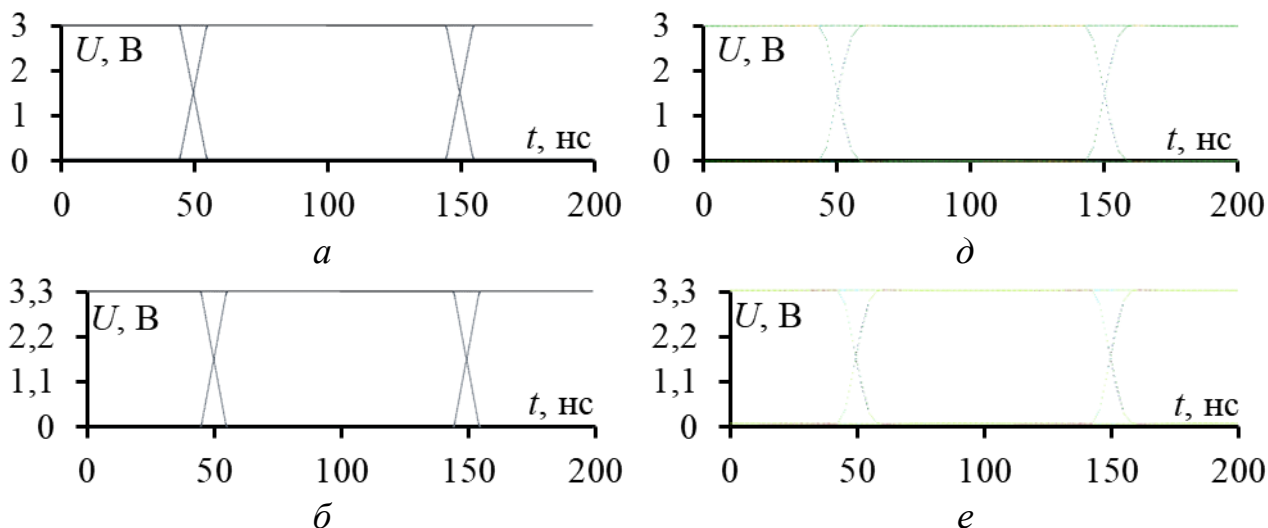


Рис. 28. Глазковые диаграммы для сигналов с контактов S1–S4 (а, е) при прохождении через МФП 1 и с контактов САМ (б, ж), MENU (в, з), VTX (г, и), TX3 (д, к) – через МФП 2-6, вычисленные в системах электродинамического (слева) и квазистатического (справа) анализа



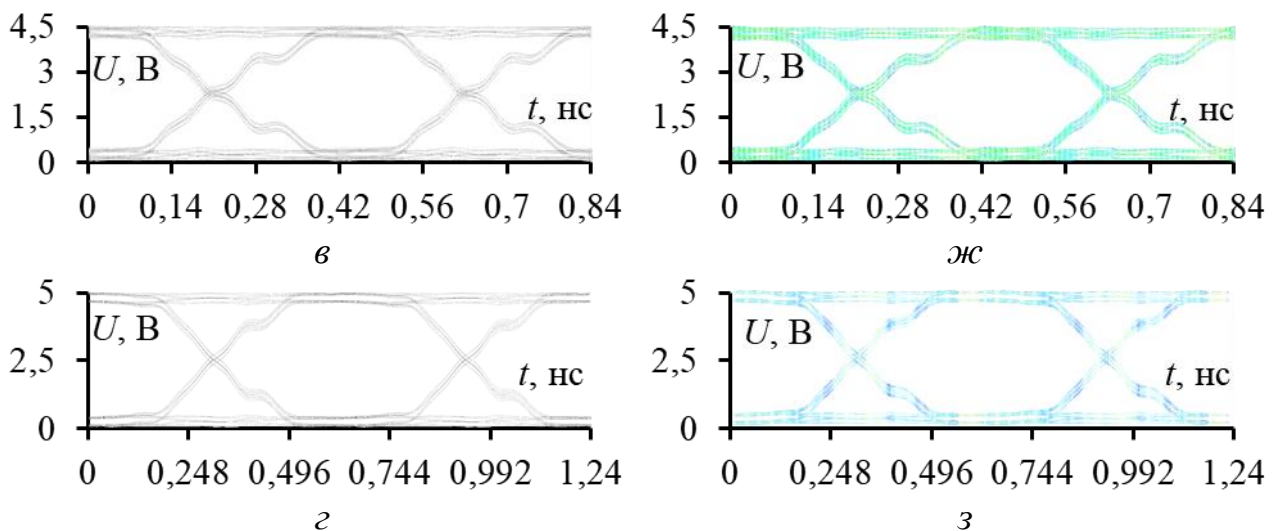


Рис. 29. Глазковые диаграммы для сигналов с контактов BUZ (а, б), RGB (б, в), SCL и SDA (в, г), TX и RX (г, д) при прохождении через МФ_П 2-6, вычисленные в системах электродинамического (слева) и квазистатического (справа) анализа

Аналогичный анализ выполнен для МФ_К и схем 1 и 2 из рис. 23. Результаты аналогичны, за исключением схемы 2 при подключении к контактам SCL, SDA, TX и RX. В этих случаях глазковые диаграммы сигналов содержат значительные искажения, а ширина и высота глаз существенно уменьшаются, что видно из рис. 30.

Для улучшения целостности полезного сигнала в МФ из схемы 2 выполнена параметрическая оптимизация эвристическим поиском МФ_П2-6 (рис. 12б и 14б). Оптимальные параметры составили: $w=350$ мкм, $s_1=200$ мкм, $s_2=350$ мкм, $s_3=600$ мкм, $h=500$ мкм, $d=1050$ мкм, $t=105$ мкм, $\varepsilon_{r2}=10,2$. Формы напряжений в МФ_П2-6 с оптимальными параметрами представлены на рис. 31, а на рис. 32 – их частотные зависимости $|S_{21}|$. Из рис. 31 видно, что к выходу МФ_П 2-6 приходит последовательность из 4 импульсов с $U_{\max}=38,1$ В. Так, ослабление составило 6,5 раза (относительно напряжения на входе). Из рис. 32 следует, что значение f_c составляет 700 МГц (на 210 МГц больше, чем в МФ_П 2-6 до оптимизации), а на частоте 2,4 ГГц ослабление составляет всего минус 10 дБ. Наконец, на рис. 33 представлены формы напряжений на выходе схемы 2 при использовании МФ_П 2-6 с оптимальными параметрами, а на рис. 34 – ее частотная зависимость $|S_{21}|$.

Из рис. 33 видно, что к выходу схемы 2 приходит последовательность из 2 импульсов, являющихся суперпозицией мод с близкими временными интервалами между ними, с U_{\max} не более 3,15 В. Так, ослабление воздействующего СШП импульса составило 79 раз (относительно напряжения на входе схемы 2). Из рис. 34 следует, что $f_c=660$ МГц (на 220 МГц больше, чем в схеме 2 при использовании МФ_П 2-6 до оптимизации). В этом случае формы глазковых диаграмм (рис. 35) значительно улучшились в сравнении с рис. 30.

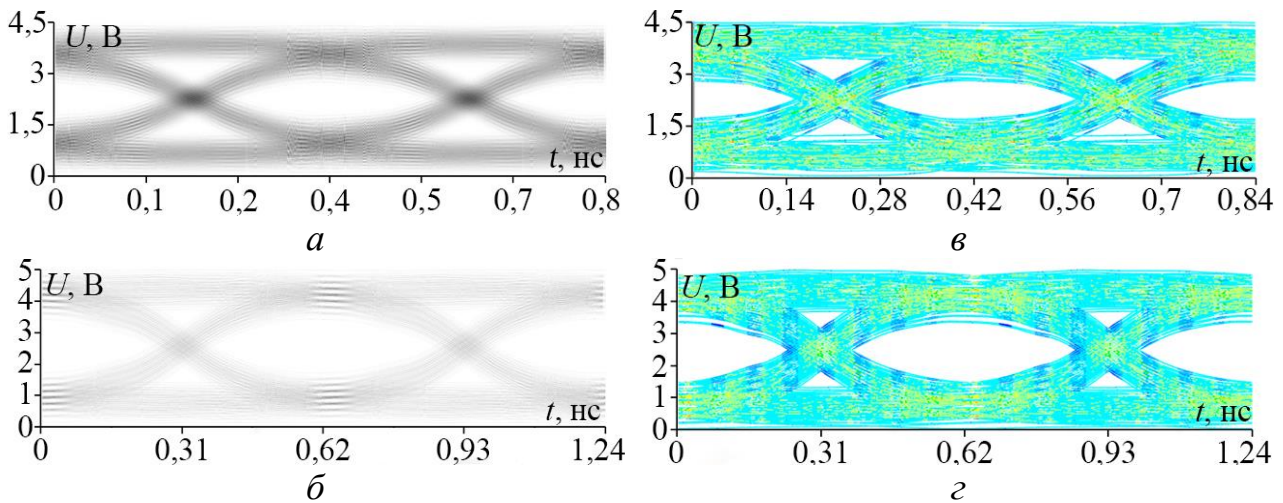


Рис. 30. Глазковые диаграммы для сигналов с контактов SCL, SDA (*a, в*) и TX, RX (*б, г*) для схемы 2, вычисленные в системах электродинамического (слева) и квазистатического (справа) анализа

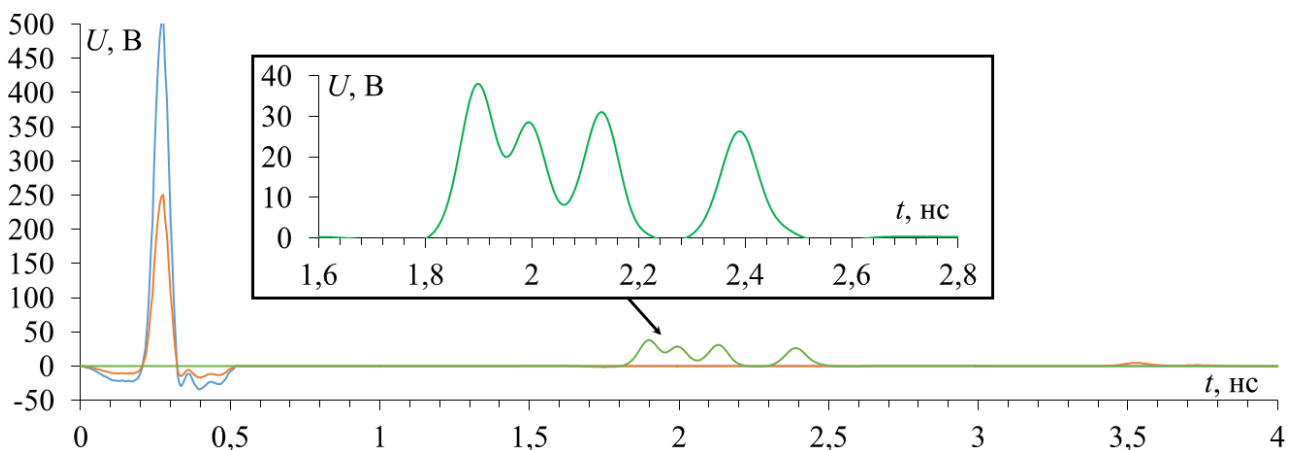


Рис. 31. Формы ЭДС (—), напряжения на входе (—) и выходе (—) МФП 2-6 с оптимальными параметрами

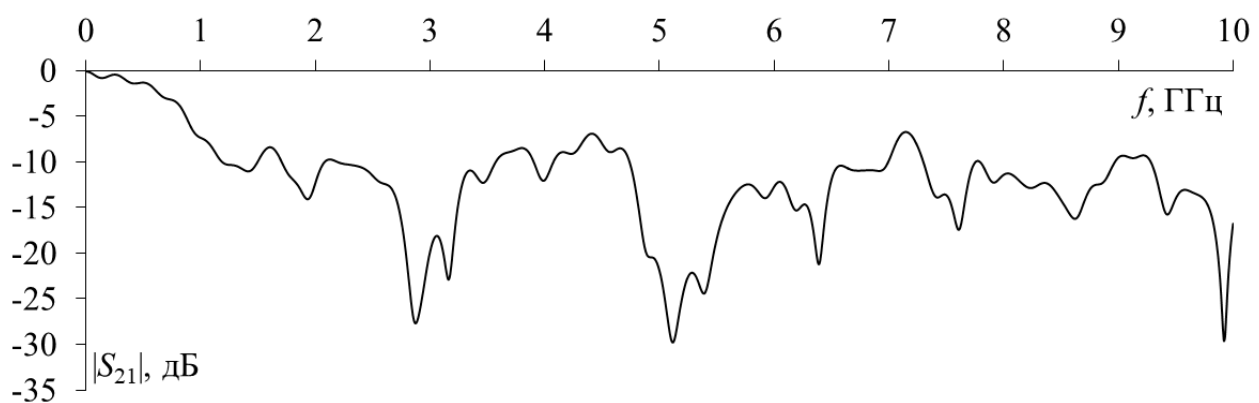


Рис. 32. Частотная зависимость $|S_{21}|$ МФП 2-6 с оптимальными параметрами

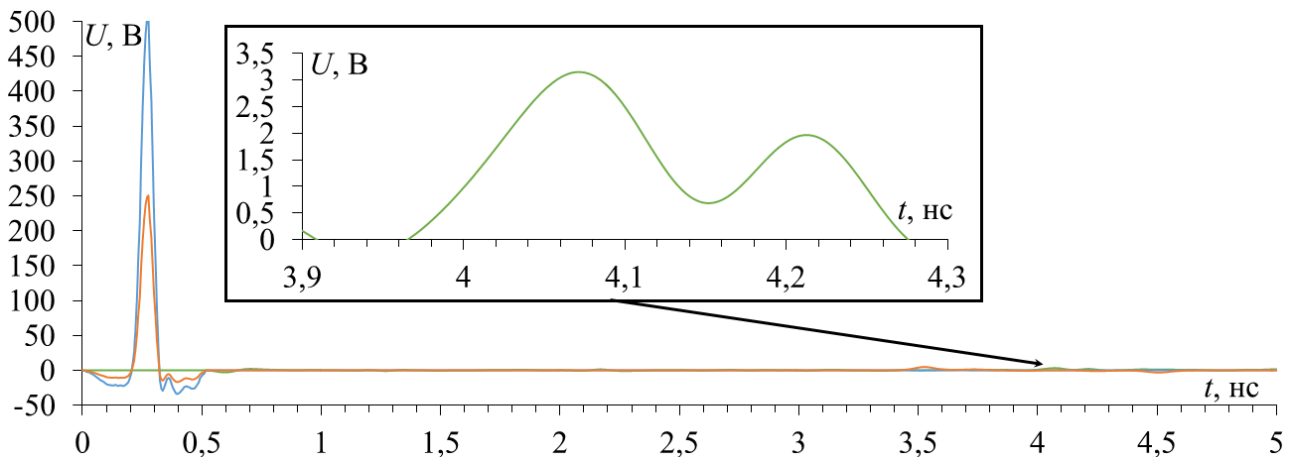


Рис. 33. Формы ЭДС (—), напряжения на входе (—) и выходе (—) схемы 2 при использовании МФП 2-6 с оптимальными параметрами

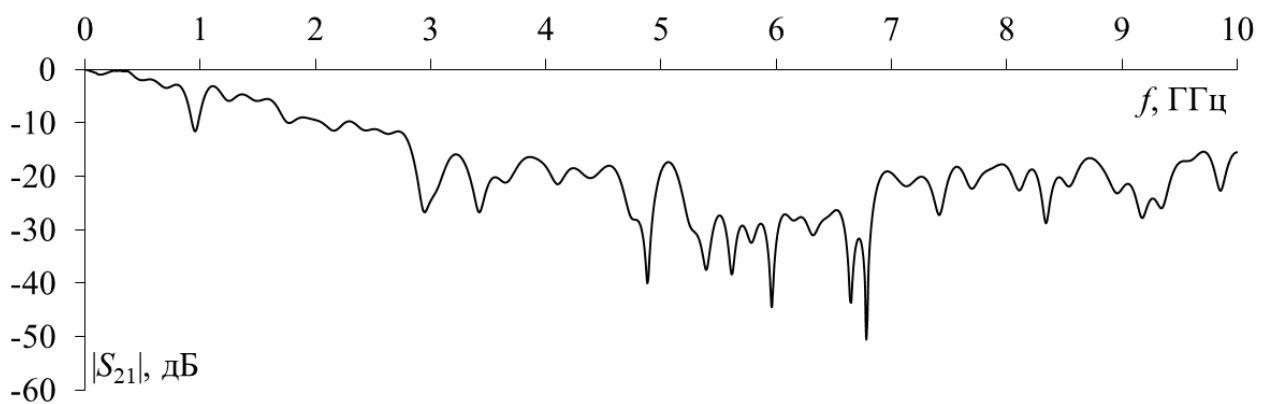


Рис. 34. Частотная зависимость $|S_{21}|$ схемы 2 при использовании МФП 2-6 с оптимальными параметрами

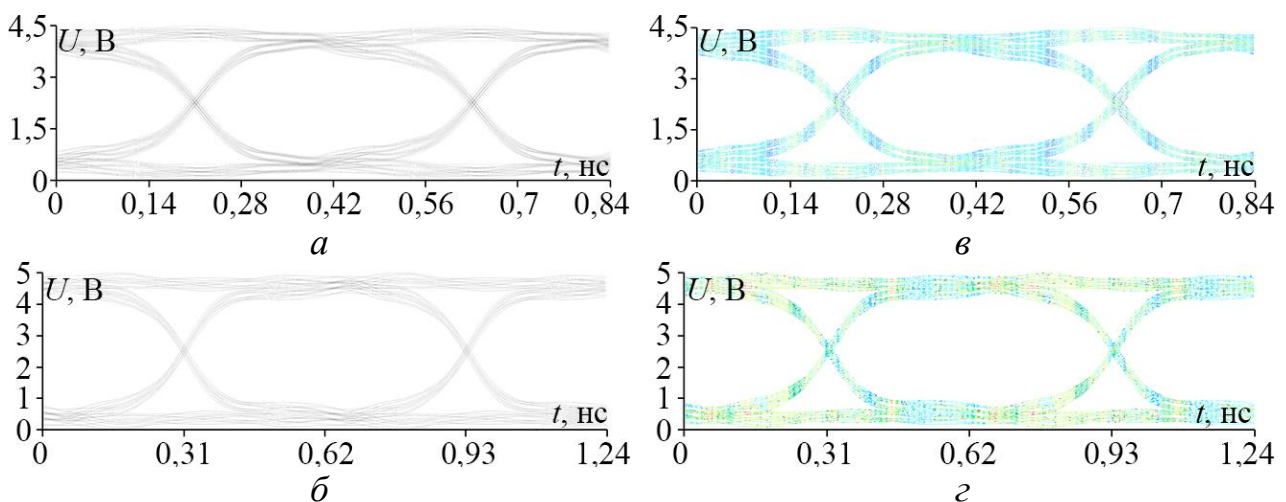


Рис. 35. Глазковые диаграммы для сигналов с контактов SCL, SDA (а, б) и TX, RX (в, г) для схемы 2 с МФП 2-6 с оптимальными параметрами, вычисленные в системах электродинамического (слева) и квазистатического (справа) анализа

Оценка восприимчивости радиоэлектронных средств к воздействию электромагнитного излучения

Для оценки восприимчивости РЭС в составе Darwin 129 к воздействию мощного импульсного электромагнитного излучения созданы 3D модели ряда основных плат для дальнейшего анализа. Они представлены на рис. 36.

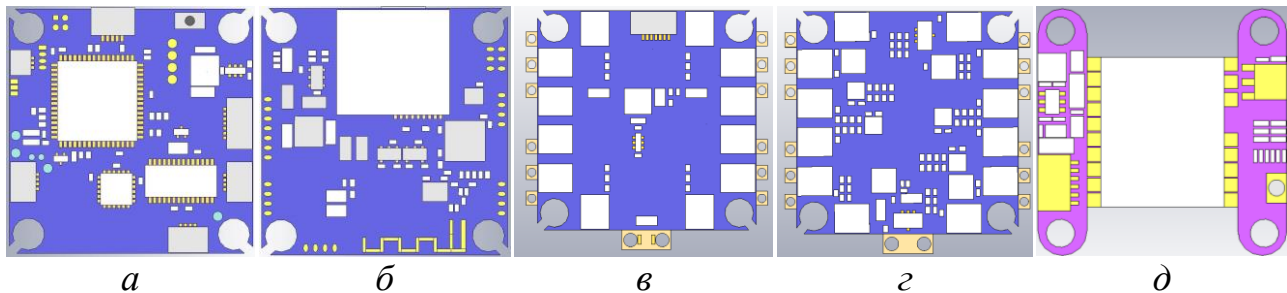


Рис. 36. 3D модели ПП: верхний (а) и нижний (б) слои полетного контроллера, верхний (в) и нижний (з) слои регулятора оборотов и видеопередатчик (д)

Для воздействия мощным электромагнитным излучением на РЭС в составе Darwin 129 использовался генератор радиоимпульсов с рупорной антенной [4]. Его параметры: длительность импульса 9 нс и U_{\max} на выходе 290 кВ. В импульсно-периодическом режиме генератор способен производить пачки по 1000 импульсов с частотой повторения до 200 Гц. На данном этапе исследования рассмотрен случай генерации одиночного импульса. Как правило, гражданские и военные БПЛА летают на высоте 200-400 м от поверхности земли. Поэтому оценка восприимчивости ПП из рис. 36 к подобному воздействию выполнялась на усредненной высоте 300 м. Центральная частота воздействующего сигнала составляет $\sim 1,2$ ГГц и характеризуется полосой $\sim 0,4$ ГГц (ширина спектра по уровню минус 10 дБ). Рупорная антенна формирует гауссово распределённый пучок с линейной поляризацией. С учётом длины волны $\lambda \approx 0,25$ м (для центральной частоты) и вариаций характерных размеров рупорных антенн $D \approx 0,3-0,5$ м, граница дальней зоны может оцениваться по формуле [21]

$$R = \frac{2D^2}{\lambda}. \quad (1)$$

Так, для $D=0,3$ м значение $R \approx 0,72$ м, а для $D=0,5$ м – порядка 2 м. Следовательно, на практике, в зависимости от выбора антенны, расстояние 1 м может находиться на границе ближней и дальней зон. Поэтому, сначала оценивался модуль напряженности поля $|E/|$ на расстоянии 1 м от рупорной антенны до ПП. Далее, на основе полученных данных, $|E/|$ на расстоянии 300 м рассчитывалась аналитически с использованием модели плоской электромагнитной волны. Подобная экстраполяция применяется как инженерное приближение (поскольку поле в ближней зоне неоднородно, а в дальней оно аппроксимируется плоской волной), позволяющее $|E/|$ на 300 м из-за важности общей оценки возникающих уязвимостей. Для расчета $|E/|$ на расстоянии 300 м использовалась формула обратного расстояния [21]

$$E = \frac{U_1}{r}, \quad (2)$$

где U_1 – максимальное наводимое напряжение на расстоянии 1 м от антенны (полагается, что U_1 масштабируется по $1/r$), r – расстояние, равное 300 м. $|E|$ на расстоянии 300 м вычислялась во временном интервале от 1 до 12 нс для оценки динамики изменения $|E|$. Сначала в системе электродинамического моделирования вычислено распределение $|E|$ по ПП регулятора оборотов двигателей (ПП 1), полетного контроллера (ПП 2) и видеопередатчика (ПП 3) на расстоянии 1 м от рупорной антенны, когда они находятся отдельно от БПЛА. Результаты представлены на рис. 37, где также указаны области с максимальным уровнем U_{\max} . Формы напряжений с этих областей представлены на рис. 38. Из них видно, что U_{\max} для ПП 1, ПП 2 и ПП 3 составили 206, 115 и 806 В. С учетом полученных результатов и (2), $|E|$ на расстоянии 300 м от антенны до ПП 1 составит 0,687 В/м, до ПП 2 – 0,383 В/м, а до ПП 3 – 2,69 В/м.

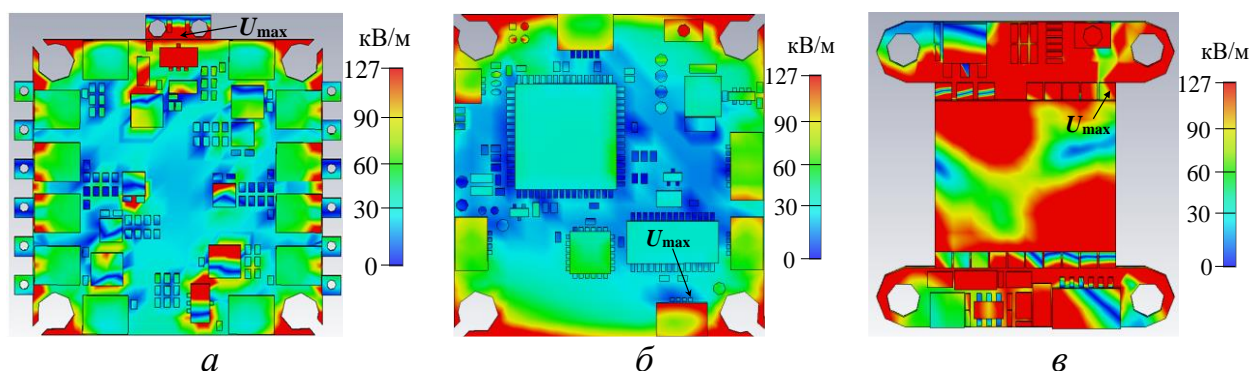
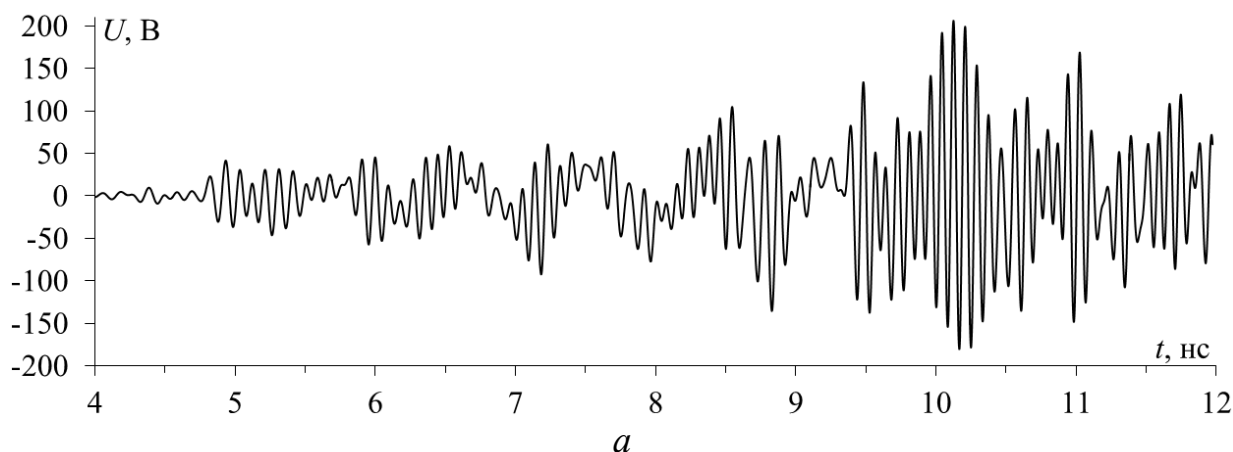


Рис. 37. Распределение $|E|$ по ПП 1 (а), ПП 2 (б) и ПП 3 (в) в 1 м от антенны



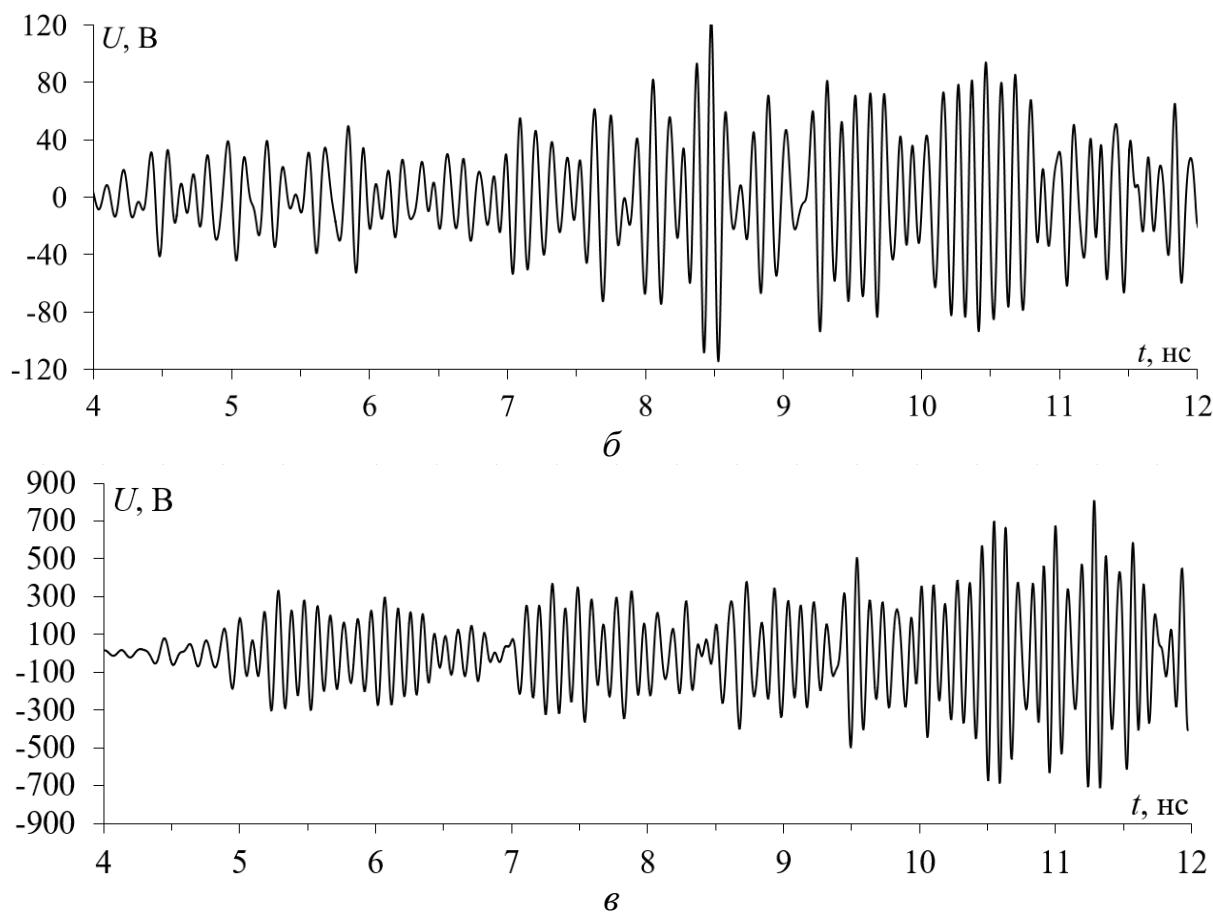


Рис. 38. Формы напряжений в областях с U_{\max} ПП 1 (а), ПП 2 (б) и ПП 3 (в)

Далее рассмотрено распределение $|E/|$ по ПП 1–3 на расстоянии 300 м от источника, когда они находятся отдельно от БПЛА, посредством воздействия на них плоской электромагнитной волной с учетом полученных ранее значений $|E/|$ (0,687 В/м, 0,383 В/м и 2,69 В/м). Плоская электромагнитная волна (красные линии на рис. 39) подавалась в различных направлениях и под разными углами относительно ПП. На рис. 40 представлены гистограммы с максимальными значениями напряженности поля ($|E_{\max}/|$) на ПП 1–3 для всех случаев из рис. 39.

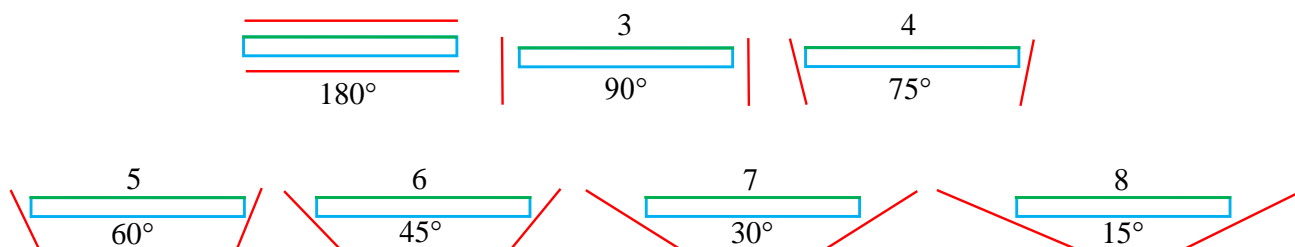


Рис. 39. Варианты падения плоской электромагнитной волны

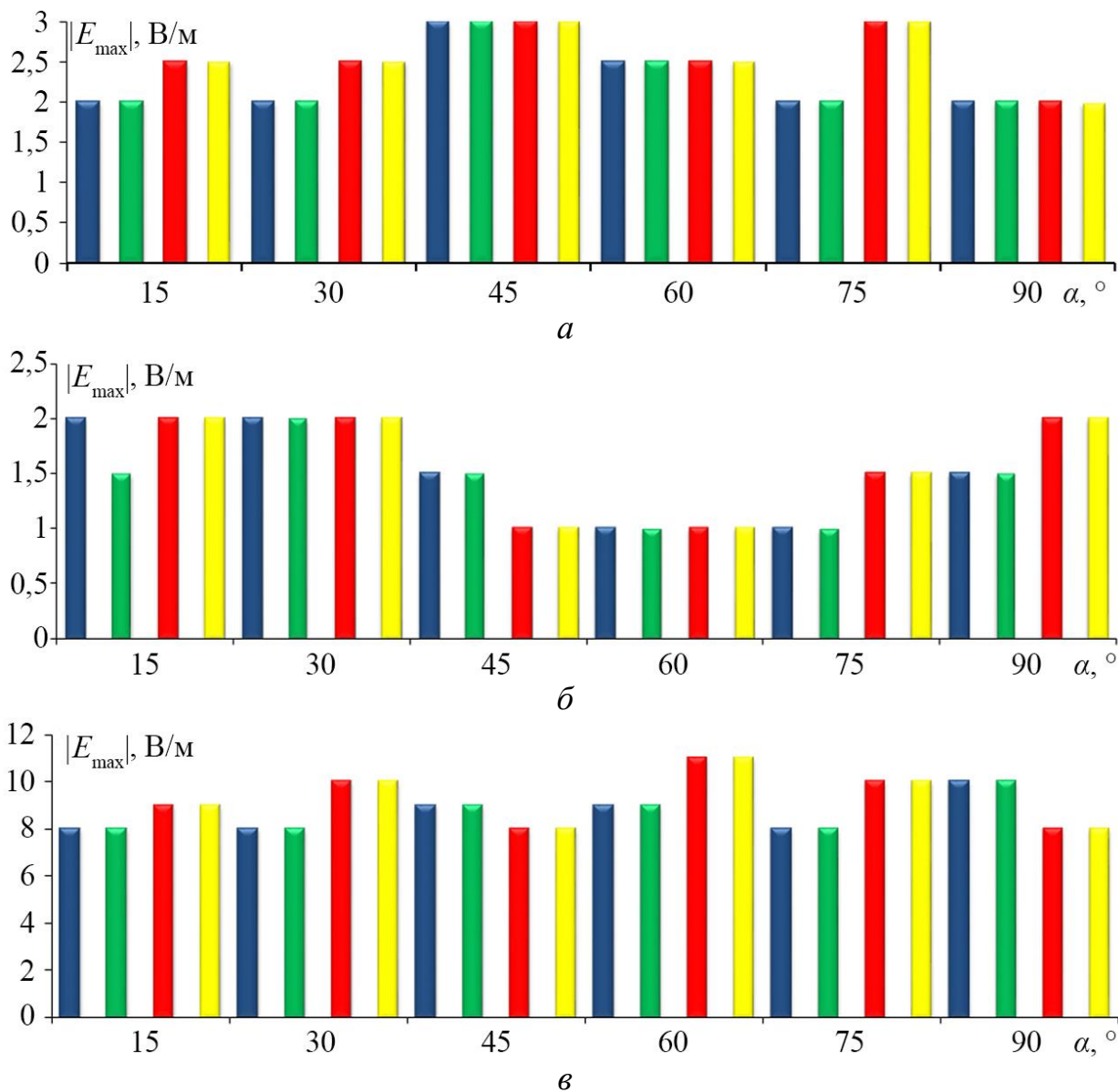


Рис. 40. Гистограмма с $|E_{\max}|$ на ПП 1 (а), ПП 2 (б) и ПП 3 (в), где (—) – плоская волна с левой стороны верхнего слоя, (—) – с левой стороны нижнего слоя, (—) – с правой стороны верхнего слоя и (—) – с правой стороны нижнего слоя

Видно, что в наихудшем случае $|E_{\max}|$ достигает 3 В/м на ПП1, 2 В/м на ПП2 и 11 В/м на ПП3. Далее выполнено моделирование для случая, когда платы размещены в составе БПЛА. Моделирование выполнено при 6 вариантах падения плоской электромагнитной волны (рис. 41).

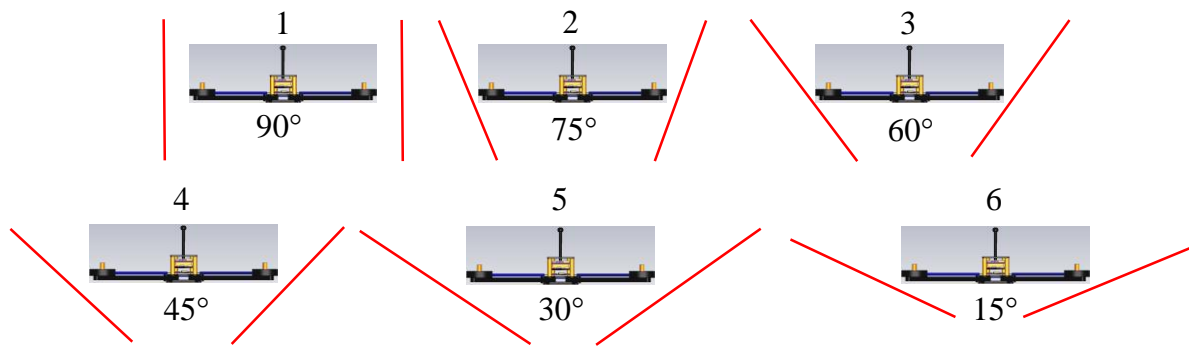
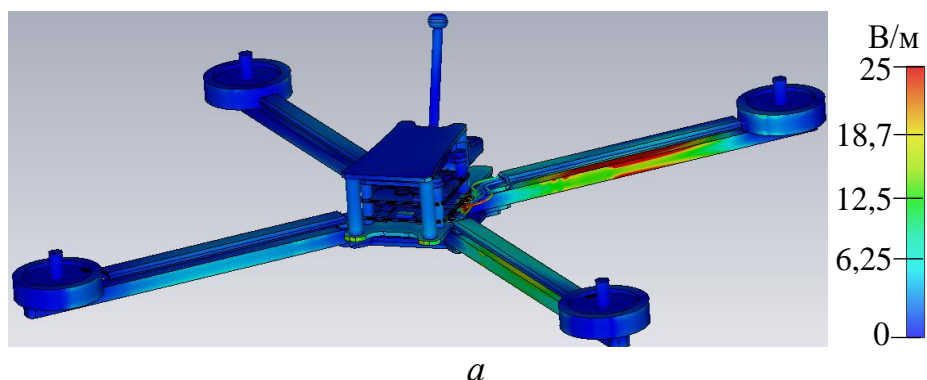


Рис. 41. Варианты падения плоской электромагнитной волны

Вычисленные $|E_{\max}|$ на корпусе БПЛА при вариантах из рис. 41 сведены в таблицу 5. Видно, что $|E_{\max}|$ уменьшается (от 25 до 10 В/м) при уменьшении угла расположения плоской электромагнитной волны относительно БПЛА. По существу, уровни $|E_{\max}|$ во всех рассмотренных случаях могут быть критичными для РЭС БПЛА Darwin 129, работающих на малых напряжениях (даже при одиночных воздействиях). Для наглядности на рис. 42 представлено вычисленное распределение $|E|$ по корпусу БПЛА. Также вычислены $|E_{\max}|$ на ПП 1–3, когда они находятся в составе БПЛА. Результаты сведены в таблицу 6, из которой видно, что наихудшим является вариант 1 с правой стороны (до 8 В/м).

Таблица 5 – Значения $|E_{\max}|$ при воздействии на БПЛА для вариантов из рис. 41

Вариант	Падение плоской электромагнитной волны	$ E_{\max} $, В/м
1	Левая сторона	19
	Правая сторона	25
2	Левая сторона	25
	Правая сторона	25
3	Левая сторона	18
	Правая сторона	18
4	Левая сторона	15
	Правая сторона	15
5	Левая сторона	11
	Правая сторона	11
6	Левая сторона	10
	Правая сторона	10



а

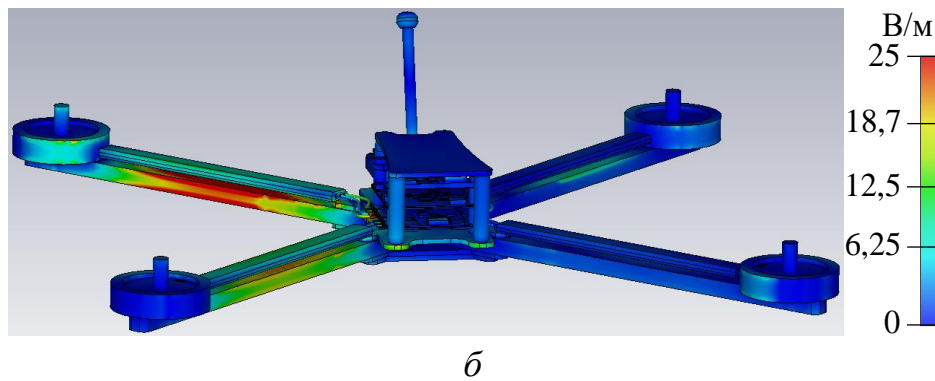


Рис. 42. Распределение $|E|$ по БПЛА с правой (а) и левой (б) сторон

Таблица 6 – $|E_{\max}|$ на ПП 1–3 в составе БПЛА для вариантов из рис. 41

Вариант	Расположение плоской электромагнитной волны	$ E_{\max} $, В/м		
		ПП 1	ПП 2	ПП 3
1	Левая сторона	6	2	3
	Правая сторона	8	2,5	5
2	Левая сторона	5	2	3
	Правая сторона	5	2	4
3	Левая сторона	5	1,5	2
	Правая сторона	5	1,5	2,5
4	Левая сторона	5	1,5	2
	Правая сторона	5	1	3
5	Левая сторона	4	1	2
	Правая сторона	4	1	3
6	Левая сторона	5	1	2
	Правая сторона	4	1	2

Оценка эффективности применения экранирующих конструкций

Рассмотрена возможность уменьшения $|E_{\max}|$ на рассматриваемых ПП. Для этого рассмотрены 3 варианта экранирующих корпусов (рис. 43). Они выполнены из трех слоев, состоящих из графеновых наноллистов и никеля (GN-Ni-GN). Внешний и внутренний слой выполнены из графеновых наноллистов, так как он обеспечивает эффективное экранирование электрического поля и СВЧ-излучения. Средний слой выполнен из никеля, который обладает высокой магнитной проницаемостью, что позволяет ему эффективно экранировать магнитные поля, а также поглощать электромагнитное излучение.

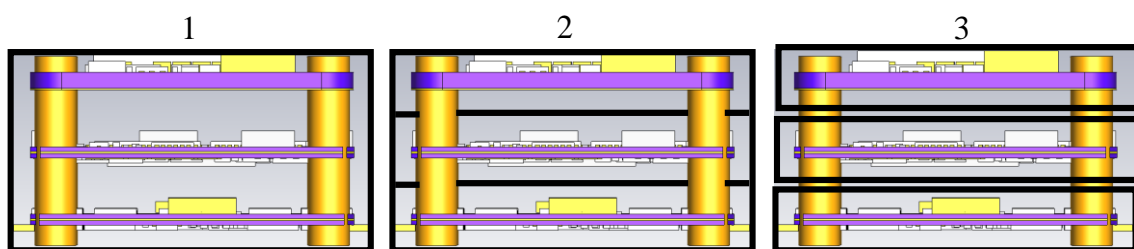


Рис. 43. Варианты экранирующих конструкций в составе БПЛА

Вариант 1 представляет собой общий корпус для ПП 1–3. Вариант 2 отличается от предыдущего наличием перегородок между ПП 1–3. Вариант 3 предполагает отдельные корпуса для ПП 1–3. Параметры корпусов следующие:

- Вариант 1: размеры 39,5×39×21,5 мм, толщина материала 2,5 мм (графен – 2 мм, никель – 0,5 мм), масса ~45,7 г.
- Вариант 2: размеры аналогичны предыдущему, размеры перегородки 34,9×33,8×1 мм, масса ~59,4 г.
- Вариант 3: размеры 37,8×36,2×5,7 мм (ПП1), 36,2×34,4×5,9 мм (ПП2) и 35,2×34,7×6,7 мм (ПП3), общая масса ~77,6 г.

По сравнению с полезной нагрузкой БПЛА 1612 г, масса экранирующих конструкций мала. На рис. 44 представлены 3D модели экранирующих конструкций в составе Darwin 129. Варианты 1 и 2 аналогичны по внешнему виду, отличаясь наличием внутренних перегородок. Кроме того, во всех корпусах предусмотрены апертуры, соответствующие соединителей разъемов экранируемых ПП. В таблицу 7 сведены $|E_{\max}|$ на ПП 1–3 в экранирующих корпусах (варианты 1–3) и без них, вычисленные при наихудшем случае, когда плоская электромагнитная волна падает справа под углом 90°.

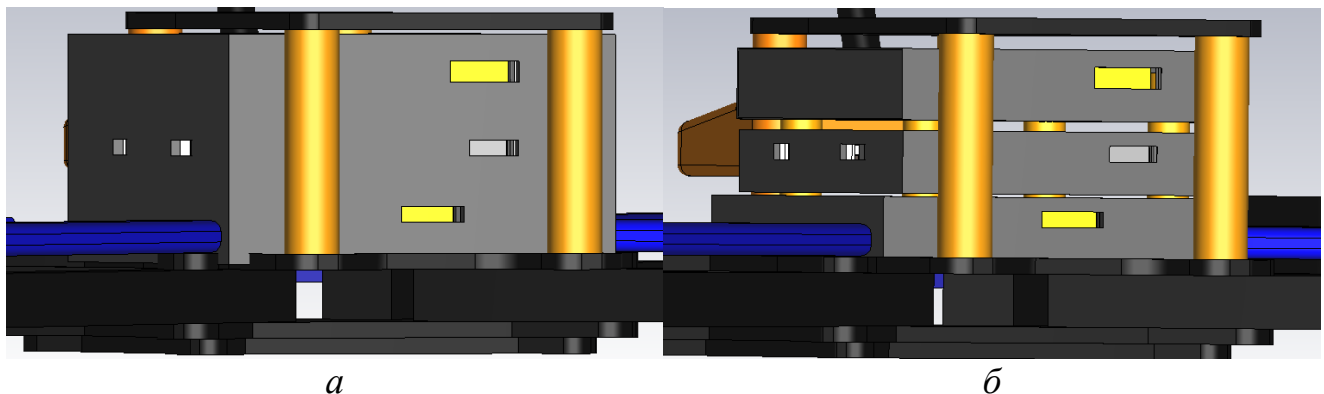


Рис. 44. Внешний вид экранирующих конструкций в составе БПЛА: варианты 1, 2 (а) и 3 (б)

Таблица 7 – Значения $|E_{\max}|$ экранированных ПП 1–3 в составе БПЛА

Вариант экранирующей конструкции	$ E_{\max} $, В/м		
	ПП1	ПП2	ПП3
1	0,055	0,03	0,035
2	0,035	0,02	0,02
3	0,07	0,05	0,1
Без экранов	8	2,5	3

Из таблицы 7 видно, что вариант 2 является наилучшим: $|E_{\max}|$ уменьшена на ПП 1–3 в 229, 125 и 150 раз, соответственно. Оценена эффективность экранирования (ЭЭ) предлагаемых экранов. Для этого измерительный монитор (ИМ) помещался в местах на ПП 1–3, где $|E|$ имеет максимальное значение. ИМ устанавливались на ПП1 для вариантов 1–3 (рис. 45а, где ИМ 1–3 – соот-

ветствуют вариантам корпусов 1–3), а для ПП2 и ПП3 рассмотрен наихудший случай, когда использовался вариант 3 (рис. 45б–в). Зависимости ЭЭ в диапазоне до 2,5 ГГц (обусловлена максимальной рабочей частотой 2,4 ГГц) представлены на рис. 46 и 47.

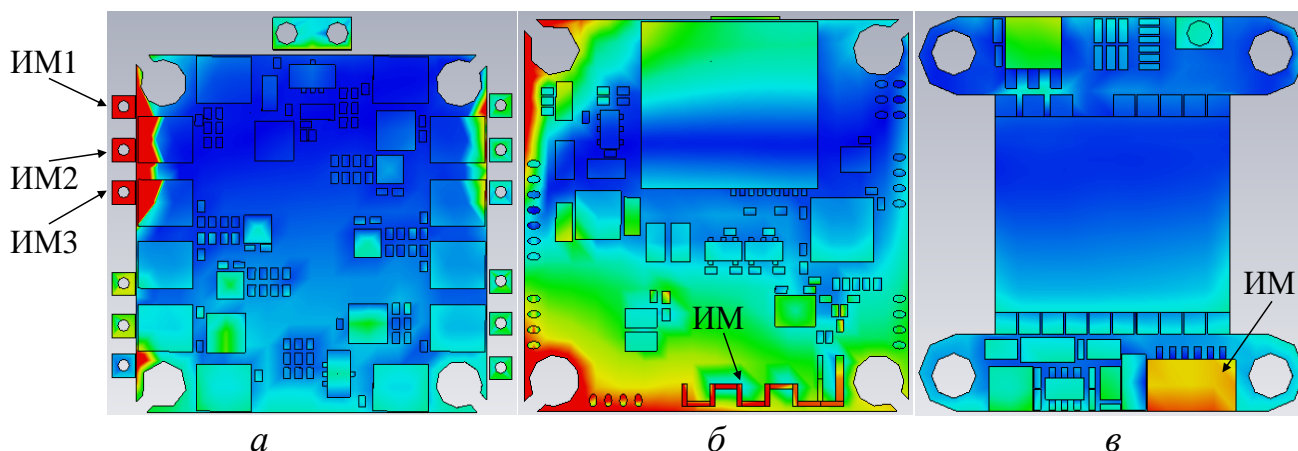


Рис. 45. Расположение ИМ на ПП1 (а), ПП2 (б) и ПП3 (в)

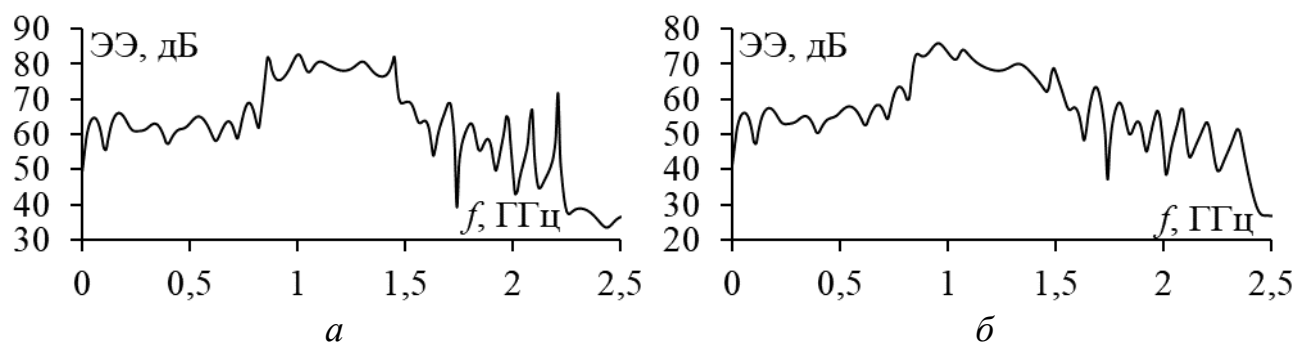


Рис. 46. Частотные зависимости ЭЭ вариантов 1 (а) и 2 (б)



Рис. 47. Частотные зависимости ЭЭ (вариант корпуса 3) для ПП1 (а), 2 (б) и 3 (в)

Из рис. 46а видно, что максимальная ЭЭ достигается на частотах 0,9–1,45 ГГц. До 0,8 ГГц ЭЭ для всех ПП составляет до 65 дБ и далее, на частоте 0,9 ГГц, ЭЭ резко возрастает до 84 дБ, после чего варьируется в пределах 80 дБ и на частоте 1,45 ГГц наблюдается спад до 65 дБ. На частотах резонанса 1,75 и 2,25 ГГц ЭЭ снижается до 40, а ближе к 2,5 ГГц уменьшается до 33 дБ. Для варианта 2 (рис. 46б) на частоте 0,95 ГГц ЭЭ достигает 77 дБ, но с ростом частоты снижается до 26 дБ на 2,5 ГГц. Так, ЭЭ достигает 80 дБ в диапазоне 0,8–1,4 ГГц и 70 дБ в диапазоне 0,95–1,5 ГГц для вариантов 1 и 2, соответственно.

Из рис. 47а видно, что до 0,8 ГГц ЭЭ в среднем составляет около 45 дБ. На частоте 0,95 ГГц ЭЭ резко возрастает до 74 дБ, но в диапазоне 1,1–1,5 ГГц происходит резкое снижение до 25 дБ. При дальнейшем увеличении частоты от 1,5 до 2,5 ГГц ЭЭ снова возрастает. Минимум ЭЭ (25 дБ) зафиксирован на частоте резонанса 1,45 ГГц. Из рис. 47б видно, что до 1,9 ГГц ЭЭ составляет около 50 дБ, но затем в диапазоне 1,95–2,5 ГГц снижается до 26 дБ. Максимум ЭЭ для этого варианта достигается на резонансной частоте 0,8 ГГц и составляет 63 дБ. Из рис. 47в следует, что ЭЭ уменьшается с ростом частоты до 2,3 ГГц. Минимум ЭЭ (10 дБ) зафиксирован на резонансной частоте 2,25 ГГц, а максимум ЭЭ (39 дБ) на частоте 0,2 ГГц. После 2,3 ГГц ЭЭ снова возрастает, достигая 26 дБ на частоте 2,5 ГГц. Стоит отметить, что на всех зависимостях наблюдается множество резонансов. Исходя из этого, наилучшие значения ЭЭ получены для вариантов 1 и 2: ЭЭ до 80 дБ в диапазоне 0,8–1,4 ГГц и 70 дБ в диапазоне 0,95–1,5 ГГц, соответственно.

Выводы

В результате работы продемонстрирована эффективность предложенных подходов к обеспечению ЭМС РЭС в составе реального БПЛА Darwin 129, включая использование модальной фильтрации и экранирующих конструкций, с сохранением целостности полезных сигналов. Для осуществления модальной фильтрации предложена замена всех кабелей, соединяющих полетный контроллер с другими платами, а также кабели между двигателями и платой регулятора оборотов на МФ на основе кабельных структур. Кроме того, предложено включение МФ на основе полосковых структур в разрывы кабелей (последовательное соединение кабель-плата-кабель) для дополнительного увеличения ослабления СШП импульса. Показана результативность предлагаемых подходов. Так, в зависимости от используемого МФ и места его включения, ослабление СШП импульса составило от 44 до 90 раз. При этом, во всех случаях после прохождения СШП импульса по МФ полученные значения U_{\max} не превышают максимальный допустимый уровень для первых компонентов плат на пути его распространения. Также определены основные пути распространения сигналов в межсоединениях ПП в составе БПЛА и оценены уровни перекрестных помех, возникающих при этом. Проработано включение в состав БПЛА предлагаемых МФ, спроектированных с учетом его размеров. Выполнена оценка целостности полезных сигналов интерфейсов ввода/вывода БПЛА при использовании в них МФ. Для этого вычислены и оценены их глазковые диаграммы. В результате выявлено, что полезные сигналы радиоприемника/передатчика и GPS-модуля

подвержены серьезным искажениям МФ 2-6. Для уменьшения влияния искажений оптимизированы параметры МФ 2-6.

Созданы 3D-модели корпуса БПЛА Darwin 129 и составляющих его РЭС. Выполнена оценка распределения $|E|$ на корпусе и ПП в его составе. В наихудшем случае $|E_{\max}|$ на корпусе составил 25 В/м (при падении плоской электромагнитной волны с правой стороны под углом 90° и с двух сторон под углом 75°), а на ПП – от 2,5 до 8 В/м (при падении плоской электромагнитной волны с правой стороны под углом 90°), в зависимости от рассматриваемой ПП. Для уменьшения $|E_{\max}|$ предложено экранирование за счет 3 вариантов исполнения экранирующих корпусов, состоящих из трех слоев (GN-Ni-GN). Выявлено, что наилучшим вариантом экранирования ПП в составе Darwin 129 является вариант 2 (общий корпус с внутренними перегородками между ПП). В этом случае $|E_{\max}|$ уменьшена на ПП 1–3 в 229, 125 и 150 раз, соответственно. Наконец, оценена ЭЭ предлагаемых корпусов. В результате такой оценки варианты 1 и 2 оказались наилучшими: ЭЭ до 80 дБ в диапазоне 0,8–1,4 ГГц и до 70 дБ в диапазоне 0,8–1,5 ГГц, соответственно. Масса экранирующих конструкций не превышает 52 г, что не критично для БПЛА Darwin 129, учитывая его полезную нагрузку 1612 г.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-79-00102, <https://rscf.ru/project/24-79-00102>.

Литература

1. Абрамов М. М. Новые и перспективные направления применения беспилотных летательных аппаратов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 3. С. 227–232.
2. Буренок М. Б. Формирование новых взглядов на применение беспилотных летательных аппаратов на основе анализа опыта специальной военной операции // Вооружение и экономика. 2024. № 1 (67). С. 5–8.
3. Макаренко С. И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам. Монография. – СПб.: Научное издание, 2020. 204 с.
4. Романченко И. В. Генерирование мощных наносекундных импульсов электромагнитного излучения на основе линий с ферритом. Дис. ... докт. техн. наук. – Томск: ИСЭ СО РАН, 2019. 220 с.
5. Макаренко С. И. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Часть 4. Функциональное поражение сверхвысокочастотным и лазерным излучениями // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 3. С. 122–157. doi: 10.24411/2410-9916-2020-10304.
6. Белоусов А. О. Подходы к обеспечению электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств в составе комплекса функционального поражения беспилотных летательных аппаратов мощным электромагнитным излучением // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 3. С. 134–196. DOI: 10.24412/2410-9916-2023-3-134-196.

7. Belousov A. O., Chernikova E. B., Samoylichenko M. A., Medvedev A. V., Nosov A. V., Gazizov T. R., Zabolotsky A. M. From symmetry to asymmetry: the use of additional pulses to improve protection against ultrashort pulses based on modal filtration // *Symmetry*. 2020. Vol. 12 (7). No. 1117. P. 1–39.

8. Mora N., Vega F., Lugrin G., Rachidi F. Study and classification of potential IEMI sources // *System and assessment notes*. 2014. Note 41. P. 1–51.

9. Gazizov T. R. Design of electronic systems protected from electromagnetic terrorism // *Proceedings of the 15-th International Wroclaw Symposium on EMC*. – Wroclaw, 2000. – P. 469–472.

10. Gazizov A. T., Zabolotsky A. M., Gazizov T. R. UWB Pulse Decomposition in Simple Printed Structures // *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2016. Vol. 58. № 4. P. 1136–1142.

11. Иванов А. А., Комнатнов М. Е. Полуаналитический метод для оценки эффективности экранирования корпуса с апертурой // *Доклады ТУСУР*. 2021. Т. 24. № 1. С. 16–23. doi: 10.21293/1818-0442-2021-24-1-16-23.

12. Ivanov A. A., Demakov A. V., Komnatnov M. E., Gazizov T. R. Semi-analytical approach for calculating shielding effectiveness of an enclosure with a filled aperture // *ELECTRICA*. 2022. № 22. P. 220–225.

13. Darwin 129 7" Long Range PNP // *Pyrodrone* [Электронный ресурс]. 15.10.2024. – URL: <https://pyrodrone.com/products/darwinfpv-darwin129-7-long-range-bnf> (дата обращения 15.10.2024).

14. Контроллер полета DarwinFPV Betaflight F4 OSD // *Aliexpress* [Электронный ресурс]. 15.10.2024. – URL: <https://aliexpress.ru/item/1005005500811827> (дата обращения 15.10.2024).

15. SpeedyBee 50A BLHeli_S 4-в-1 ESC // *Mydrone* [Электронный ресурс]. 15.10.2024. – URL: <https://mydrone.ru/regulyator-oborotov-speedybee-bls-50a-4v1/> (дата обращения 15.10.2024).

16. Видеопередатчик DarwinFPV TX805P 800 мВт 5,8 ГГц VTX // *Mydrone* [Электронный ресурс]. 15.10.2024. – URL: <https://mydrone.ru/> (дата обращения 15.10.2024).

17. Darwin FPV M80 GPS модуль // *Xmodels* [Электронный ресурс]. 15.10.2024. – URL: <https://xmodels.ru/fpv-oborudovanie/> (дата обращения 15.10.2024).

18. Приемник TBS Crossfire Nano RX (SE) // *Mydrone* [Электронный ресурс]. 15.10.2024. – URL: <https://mydrone.ru/> (дата обращения 15.10.2024).

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

20. Belousov A. O., Medvedev A. V., Chernikova E. B., Gazizov T. R., Zabolotsky A. M. Switching order after failures in symmetric protective electrical circuits with triple modal reservation // *Symmetry*. 2021. Vol. 13(6). No. 1074. P. 1–22.

21. Сазонов Д. М. Антенны и устройства СВЧ. – М.: Высшая школа, 1988. – 432 с.

References

1. Abramov M. M. New and promising directions for the application of unmanned aerial vehicle. *News of Tula State University. Technical Sciences*, 2022, no. 3, pp. 227–232 (in Russian).
2. Burenok V. M. Formation of new views on unmanned aerial vehicles employment based on the experience analysis of the special military operation. *Armament and Economics*, 2024, no. 1 (67), pp. 5–8 (in Russian).
3. Makarenko S. I. Protivodejstvie bespilotnym letatel'nym apparatam. Monografija [Counteracting unmanned aerial vehicles. Monography]. Saint Petersburg, Naukoemkie tekhnologii Publ, 2020. 204 p. (in Russian).
4. Romanchenko I. V. *Generirovanie moshchnyh nanosekundnyh impul'sov elektromagnitnogo izlucheniya na osnove linij s ferritom* [Generation of powerful nanosecond pulses of electromagnetic radiation based on ferrite lines. D.sc. Thesis]. Tomsk, Institute of High Current Electronics, 2019. 220 p. (in Russian).
5. Makarenko S. I. Counter unmanned aerial vehicles. Part 4. Functional destroying with microwave and laser weapons. *Control, communication and security systems*, 2020, no. 3, pp. 122–157. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10304 (in Russian).
6. Belousov A. O. Approaches to ensuring electromagnetic compatibility of radio electronic equipment as part of the EMI-based functional destruction means for unmanned aerial vehicles. *Control, communication and security systems*, 2023, no. 3, pp. 134–196. DOI: 10.24412/2410-9916-2023-3-134-196 (in Russian).
7. Belousov A. O., Chernikova E. B., Samoylichenko M. A., Medvedev A. V., Nosov A. V., Gazizov T. R., Zabolotsky A. M. From symmetry to asymmetry: the use of additional pulses to improve protection against ultrashort pulses based on modal filtration. *Symmetry*, 2020, vol. 12(7), no. 1117, pp. 1–39.
8. Mora N., Vega F., Lugrin G., Rachidi F. Study and classification of potential IEMI sources. *System and assessment notes, note 41*, July 2014, 92 p.
9. Gazizov T. R. Design of electronic systems protected from electromagnetic terrorism. *Proceedings of the 15th International Wroclaw Symposium on EMC*, Wroclaw, Poland, 27–30 June 2000, pp. 469–472.
10. 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.
11. Ivanov A. A., Komnatnov M. E. Semi-analytical method for evaluating shielding effectiveness of an enclosure with an aperture. *TUSUR reports*, 2021, vol. 24, no 1, pp. 16–23. doi: 10.21293/1818-0442-2021-24-1-16-23. (in Russian)
12. Ivanov A. A., Demakov A. V., Komnatnov M. E., Gazizov T. R. Semi-analytical approach for calculating shielding effectiveness of an enclosure with a filled aperture. *ELECTRICA*, 2022, no. 22, pp. 220–225.
13. Darwin 129 7" Long Range PNP. Pyrodrone, 15.10.2024. Available at: <https://pyrodrone.com/products/darwinfpv-darwin129-7-long-range-bnf> (accessed 15.10.2024).

14. Kontroller poleta DarwinFPV Betaflight F4 OSD [Flight controller DarwinFPV Betaflight F4 OSD]. Aliexpress, 15.10.2024. Available at: <https://aliexpress.ru/item/1005005500811827> (accessed 15.10.2024).
15. SpeedyBee 50A BLHeli_S 4-B-1 ESC. Mydrone Russia, 15.10.2024. Available at: <https://mydrone.ru/regulyator-oborotov-speedybee-bls-50a-4v1/> (accessed 15.10.2024).
16. Videoperedatchik DarwinFPV TX805P 800 мВт 5,8 ГГц VTX [Video transmitter DarwinFPV TX805P 800 мВт 5,8 ГГц VTX]. Mydrone Russia, 15.10.2024. Available at: <https://mydrone.ru/> (accessed 15.10.2024).
17. Darwin FPV M80 GPS modul' [Darwin FPV M80 GPS module]. Xmodels Russia, 15.10.2024. Available at: <https://xmodels.ru/fpv-oborudovanie/> (accessed 15.10.2024).
18. Priemnik TBS Crossfire Nano RX (SE) [Receiver TBS Crossfire Nano RX (SE)]. Mydrone Russia, 15.10.2024. Available at: <https://mydrone.ru/> (accessed 15.10.2024).
19. Kuksenko S. P., Gazizov T. R., Kvasnikov A. A., Demakov A. V., Ivanov A. A., Klyukin D. V., Alhadzh Hasan A., Maksimov A. E., Osincev A. V. Developing software for modelling radioelectronic equipment with respect to electromagnetic compatibility in TUSUR. *Nanoindustry*, 2023, vol. 16, no. S9-1 (119), pp. 170–178.
20. Belousov A. O., Medvedev A. V., Chernikova E. B., Gazizov T. R., Zabolotsky A. M. Switching order after failures in symmetric protective electrical circuits with triple modal reservation. *Symmetry*, 2021, vol. 13 (6), no. 1074, pp. 1–22.
21. Sazonov D. M. *Antenny i ustrojstva SVCH* [Antennas and microwave devices]. Moscow, Graduate school Publ, 1988. 432 p. (in Russian).

Статья поступила 30 декабря 2024 г.

Информация об авторах

Белусов Антон Олегович – кандидат технических наук. Докторант. Старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости». Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: электромагнитная совместимость, проектирование защитных устройств на основе модальной фильтрации, оптимизация защитных устройств. E-mail: ant1lafleur@gmail.com

Носов Александр Вячеславович – кандидат технических наук. Докторант. Старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости». Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: электромагнитная совместимость, проектирование защитных полосковых устройств. E-mail: alexns2094@gmail.com

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

Enhancing the Electromagnetic Immunity of the Unmanned Aerial Vehicle under High-Intensity Electromagnetic Radiation: A Comprehensive Approach

A. O. Belousov, A. V. Nosov

Problem formulation: unmanned aerial vehicles (UAVs) are widely used in various fields, which imposes stringent requirements on their reliability, particularly regarding the electromagnetic compatibility (EMC) of their onboard radio-electronic equipment (REE). Along with the development of UAV REE, the EMI-based functional destruction means are also advancing, potentially causing system failures or rendering onboard systems inoperable. Moreover, deploying «friendly» EMI-based functional destruction means against adversarial UAVs may compromise the functionality of one's own REE, including receiving and transmitting devices, signal generators, control and stabilization units, command generation modules, and various computing systems. This challenge arises due to the high power of generated EMI and the difficulty of ensuring its selective impact on targeted REE. Hence, improving the electromagnetic immunity of UAV REE against EMI-based functional destruction means remains a relevant issue. **Purpose:** to demonstrate the effectiveness of the proposed approaches to ensuring EMC of UAV REE, including the use of modal filtration and shielding constructions, while maintaining the integrity of useful signals. **Methods:** the approaches to ensuring EMC employed in this study include: the theory of inventive problem-solving within the diversion approach; modal filtration; parametric optimization using heuristic search; evaluation of the useful signals of key REE in UAVs; and the application of shielding structures in UAVs, including those containing magnetodielectric materials. The proposed approaches were validated through computational experiments involving quasi-static and electrodynamic analyses. **Novelty:** for the first time, the proposed approaches to ensuring EMC of REE were successfully validated on a real UAV, Darwin 129. These approaches are characterized by the use of modal filters (MF) based on strip and cable structures, preserving the integrity of useful signals, as well as shielding constructions made of multilayer materials in three design variants. **Results:** the effectiveness of the proposed approaches was demonstrated using the Darwin 129 UAV. Depending on the type and placement of the MF, suppression of ultra-wideband pulses ranged from 44 to 90 times. After passing through the MF, residual voltage levels did not exceed acceptable limits for the components of printed circuit boards (PCBs) within the UAV. The integrity of useful signals in the input/output interfaces of Darwin 129 was assessed during MF implementation. Parametric optimization of one of the MFs was performed to reduce distortion effects. The distribution of the electric field intensity over the body and PCBs of Darwin 129 was evaluated. In the worst-case scenario, the modulus of its maximum value on the UAV body reached 25 V/m (when a plane electromagnetic wave was positioned to the right at a 90° angle and on both sides at a 75° angle), and on the PCBs, it ranged from 2.5 to 8 V/m, depending on the PCB. To reduce the modulus of maximum field strength value, three design variants of shielding constructions made of multilayer materials (GN-Ni-GN) were proposed. Among these, Variant 2 (a common enclosure with internal partitions between PCBs) was found to be the most effective, reducing the modulus of maximum field strength value on three PCBs by 229, 125, and 150 times, respectively. **Practical relevance:** the proposed approaches, validated on the Darwin 129 UAV, can be adapted and effectively applied to other UAV models and types operating in environments with intense electromagnetic interference, including that created by EMI-based functional destruction means, due to their universality. Furthermore, the results of this study can be valuable during both the design and modernization stages of UAVs to enhance their electromagnetic immunity in the presence of external destabilizing factors.

Keywords: unmanned aerial vehicle, electromagnetic compatibility, modal filtration, shielding, intentional interference, optimization, ultra-wideband pulses, functional destruction.

Information about Authors

Anton Olegovich Belousov – Ph.D. of Engineering Sciences, Associate Professor and Doctoral Student at the Department of Television and Control, Senior Research Fellow of the research laboratory «Safety and electromagnetic compatibility of

radio-electronic means». Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. Field of research: electromagnetic compatibility, design of protective devices based on modal filtration, optimization of protective devices. E-mail: ant1lafleur@gmail.com

Alexander Vyacheslavovich Nosov – Ph.D. of Engineering Sciences, Associate Professor and Doctoral Student at the Department of Television and Control, Senior Research Fellow of the research laboratory «Fundamental Studies in Electromagnetic Compatibility». Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. Field of research: electromagnetic compatibility, design of protective strip devices. E-mail: alexns2094@gmail.com

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