

УДК 621.396.41

В.А. Пономарев, А.В. Вавилонский, М.Е. Юнеман, А.О. Белоусов

## Защита критичных радиоэлектронных средств беспилотного летательного аппарата MFD Mini Crosswind 1600 от воздействия сверхширокополосных помех

Рассмотрен беспилотный летательный аппарат (БПЛА) MFD Mini Crosswind 1600. Составлена структурная схема его основных радиоэлектронных средств (РЭС). Проведена оценка распространения кондуктивных помех по их цепям. В качестве защитных устройств от сверхширокополосных (СШП) помех рассмотрено применение модального фильтра (МФ) на основе полосковой структуры с лицевой связью и 6-проводного МФ на основе кабельной структуры. Выполнены моделирование экранирующего корпуса для системы автопилота БПЛА и оценка эффективности предложенных подходов к обеспечению электромагнитной совместимости в части защиты РЭС БПЛА от воздействия СШП-помех.

**Ключевые слова:** беспилотные летательные аппараты, электромагнитная совместимость, модальный фильтр, экранирование, печатная плата, защитные кабели, сверхширокополосные воздействия.

В настоящее время модернизация и изготовление беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) создают основу технологической самостоятельности национального авиастроения. Серийное изготовление собственных БПЛА является одним из приоритетных направлений производства многих современных стран. Так, гражданский рынок БПЛА в России растёт с каждым годом, поскольку спрос на БПЛА различных классов и типов увеличивается. При этом БПЛА используются не только в гражданских, но и в военных целях: в видео- и фотосъемке, мониторинге, ретрансляции радиосигналов, доставке, разведке, наведении, нанесении урона при ведении боевых действий и др. [1].

Современные государства разрабатывают и принимают на вооружение не только БПЛА, но и различные средства противодействия им, например, средства функционального поражения (ФП) электромагнитным излучением (ЭМИ). Между тем эффективность средств ФП ЭМИ напрямую зависит от знания конкретных характеристик радиоэлектронных средств (РЭС), входящих в состав конкретного БПЛА [2].

Ряд стран принимает на вооружение не только комплексы БПЛА различного назначения, но и средства и комплексы для противодействия им [3]. При этом знание характеристик реальных средств ФП ЭМИ поможет принять своевременные меры для обеспечения должного уровня электромагнитной совместимости применяемых БПЛА [1].

Поэтому актуально обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) РЭС в составе БПЛА, которые могут находиться в области поражения средств ФП ЭМИ [3]. Для этого предлагается выбор конкретного БПЛА и определение состава и характеристик его РЭС. Наконец, важно оценить пути распространения кондуктивных помех по цепям РЭС, а также повысить защитные характеристики выбранных РЭС от воздействия сверхширокополосных (СШП) помех посредством использования ряда подходов к обеспечению ЭМС.

Цель работы – выполнить такое исследование.

### Выбор БПЛА

В данной работе рассмотрен БПЛА самолетного типа – MFD Mini Crosswind 1600. Он представлен на рис. 1 [4].

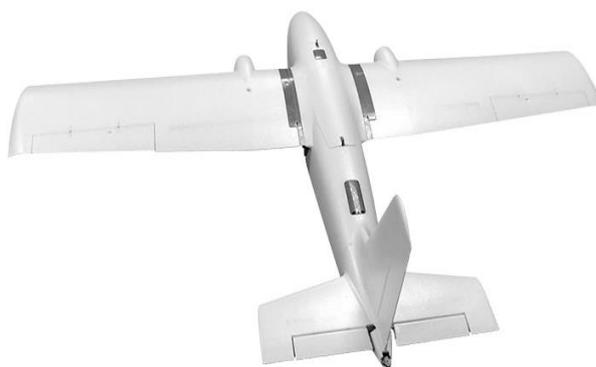


Рис. 1. MFD Mini Crosswind 1600

БПЛА имеет размах крыльев 1600 мм, длину корпуса 1080 мм и максимальную взлетную массу – 5000 г. Он выполнен из конструкционного пенопласта. Масса данного устройства без аккумулятора составляет 1760 г. Полезная нагрузка БПЛА составляет более 3000 г. В корпусе БПЛА имеется ряд отсеков, пригодных для установки дополнительного оборудования, что открывает возможность установки дополнительных защитных устройств.

### Радиоэлектронные средства в составе БПЛА

Структурная схема РЭС в составе Mini Crosswind 1600 представлена на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что в состав выбранного БПЛА входят разноплановые РЭС, объединение которых осуществляется посредством кабелей. Знание параметров и типов применяемых кабелей дает возможность заменить их (с сохранением характеристик полезного сигнала) на защитные структуры, предназначенные для защиты от СШП-помех. В рамках данной работы отразим результаты повышения защитных характеристик при воздействии кондуктивных СШП-помех одного из основных РЭС – автопилота MFD Crosshair.

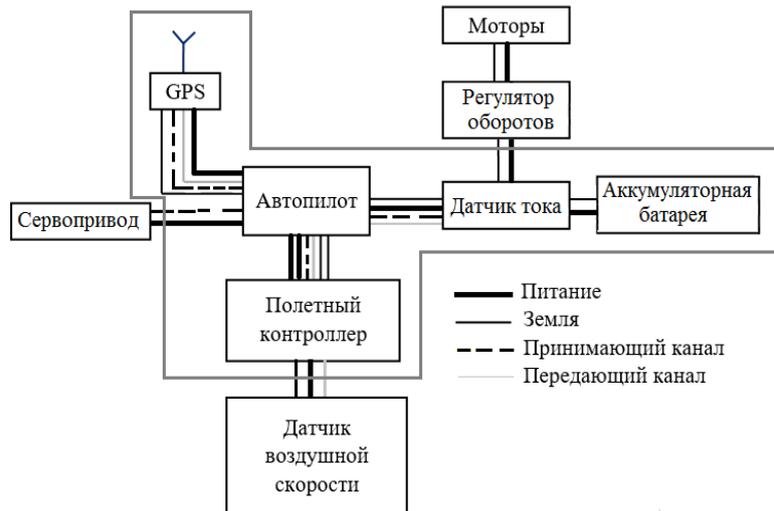


Рис. 2. Структурная схема MFD Mini Crosswind 1600

### Применение подходов к обеспечению ЭМС для защиты автопилота БПЛА от воздействия СШП-помех

Автопилот выполняет функции по стабилизации камеры фотоаппарата, обеспечению мобильности, исключению потенциально опасных параметров движения БПЛА и др. Он оснащен встроенными датчиками: гироскопом, акселерометром, электронным компасом и барометром. Данная модель имеет два основных процессора для управления полетом и обработки информации логики полета (рис. 3). Устройство имеет рабочий диапазон входного напряжения 7–26 В, а рекомендованное производителем рабочее напряжение составляет 12 В.



Рис. 3. Автопилот MFD Crosshair

Для защиты автопилота MFD от воздействия СШП-помех предлагается включить в состав БПЛА ряд МФ на основе полосковых и кабельных структур. Для этого предложена структурная схема РЭС БПЛА MFD Mini Crosswind 1600 (рис. 4).

Кроме этого, для предотвращения перекрестных помех между соседними платами, а также воздействия излучаемых СШП-помех непосредственно на применяемые МФ предлагается их экранирование за счет использования корпусов (МФ на основе полосковых структур) и материалов по типу экранирую-

щих лент/оплеток или фольги (МФ на основе кабельных структур).



Рис. 4. Структурная схема MFD Mini Crosswind 1600 с учетом МФ и защитных кабелей

Из рис. 4 видно, что МФ1 предлагается установить между GPS-модулем и антенной, поскольку антенна в БПЛА является главным рецептором воздействующих СШП-помех. МФ2 предлагается установить между датчиком тока и аккумулятором для дополнительной защиты этого отрезка электрической цепи от кондуктивных СШП-помех. В качестве примера рассмотрим МФ2.

### Моделирование МФ на основе полосковой структуры

Моделирование МФ осуществлялось в системе TALGAT [5]. МФ2 представляет собой полосковую структуру с лицевой связью. Его поперечное сечение в экранирующем корпусе представлено на рис. 5. Выполнена оптимизация посредством эвристического поиска для уменьшения уровня СШП-помехи на выходе МФ. Параметры МФ, получившиеся в результате оптимизации:  $w = 400$  мкм,  $s = 400$  мкм,

$t = 35$  мкм,  $d_1 = 400$  мкм,  $d_2 = 1200$  мкм,  $h_1 = 1000$  мкм,  $h_2 = 1200$  мкм,  $l = 1000$  мм,  $\epsilon_{r1} = 1$ . В качестве подложки выбран композитный материал Arlon AD 1000 со значением относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_{r2} = 10$  и тангенсом угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta = 0,025$ .

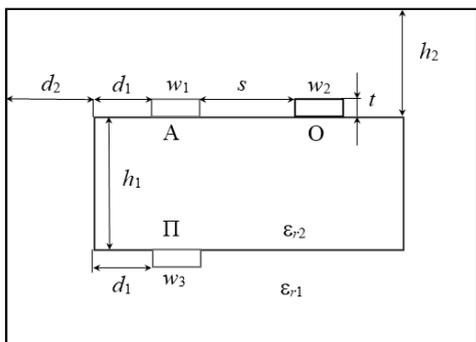


Рис. 5. Поперечное сечение МФ с лицевой связью

Эквивалентная схема МФ представлена на рис. 6. Длина МФ принята  $l = 1$  м (МФ2), а значения  $R_{\Gamma}$ ,  $R_{\Pi}$  и  $R$  – по 50 Ом. Параметры воздействующей СШП-помехи приняты следующими: амплитуда ЭДС 500 В, а длительности фронта нарастания 42 пс, спада – 30 пс, и плоской вершины – 4 пс (по уровням 0,1–0,9), так что общая длительность (по уровню 0,5) – 60 пс [6].

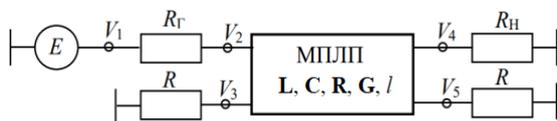


Рис. 6. Эквивалентная схема МФ с лицевой связью

На рис. 7 представлены формы ЭДС, а также напряжения на входе и выходе МФ2, включенного между датчиком тока и аккумуляторной батареей.

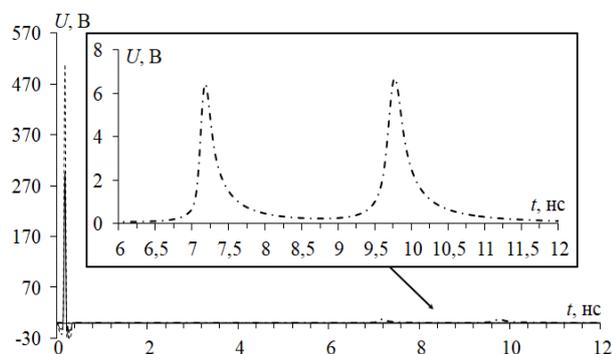


Рис. 7. Формы ЭДС (---), напряжения на входе (—) и выходе (---) МФ2

Из рис. 7 видно, что к выходу МФ2 приходят 2 основных импульса с максимальной амплитудой 6,6 В, так, максимальное напряжение на выходе МФ2 не превышает максимальное (26 В) и рекомендованное производителем (12 В) входное напряжение платы автопилота. Коэффициент ослабления МФ составляет 42 раза (относительно входного напряжения 280 В).

Для интеграции МФ в корпус БПЛА необходимо выполнить их трассировку с учетом свободного места в корпусе БПЛА. С учетом этого МФ были «свернуты» в витки со слабой электромагнитной связью между ними ( $3w$ ) [6]. Это позволило получить итоговые габариты печатной платы МФ2  $59 \times 60$  мм.

### Моделирование МФ на основе кабельной структуры

Между полетным контроллером и автопилотом проложены 6 одножильных проводов. Для внесения дополнительной защиты предлагается заменить их на МФ на основе кабельной структуры (с сохранением прежнего режима работы) для добавления дополнительной защиты в систему РЭС БПЛА. Поперечное сечение такого МФ представлено на рис. 8. В результате оптимизации получены следующие параметры:  $r_1 = 0,15$  мм;  $r_2 = 0,12$  мм;  $r_3 = 0,13$  мм;  $r_4 = 0,14$  мм;  $r_5 = 0,16$  мм;  $r_6 = 0,25$  мм,  $\epsilon_{r1} = 1$ ;  $\epsilon_{r2} = 7$ ;  $\epsilon_{r3} = 4,2$ .

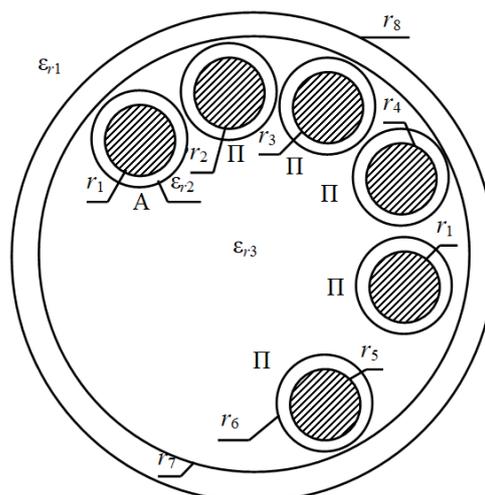


Рис. 8. Поперечное сечение 6-проводного МФ

Эквивалентная схема включения данного МФ представлена рис. 9. Длина МФ принята  $l = 400$  мм, а значения  $R_{\Gamma}$ ,  $R_{\Pi}$  и  $R$  – по 50 Ом. Параметры воздействующей СШП-помехи остались без изменений. Формы напряжений представлены на рис. 10.

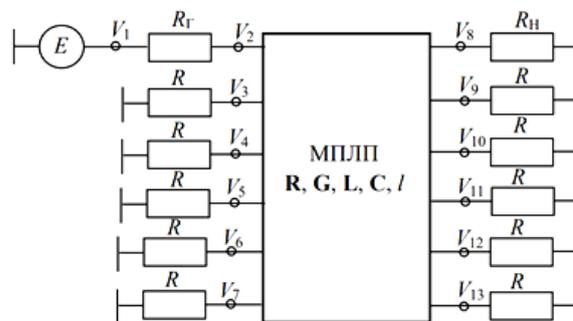


Рис. 9. Эквивалентная схема 6-проводного МФ на основе кабельной структуры

Из рис. 10 видно, что к выходу МФ приходят 6 основных импульсов с максимальной амплитудой 21,5 В. При этом максимальное рабочее напряжение полетного контроллера составляет 22 В. В данном случае между 1–4-м а также 5-м и 6-м импульсами

обеспечивается условие, при котором разница погонных задержек импульсов разложения больше длительности воздействующего импульса, а их частичное наложение объясняется влиянием потерь и дисперсией в кабельной структуре.

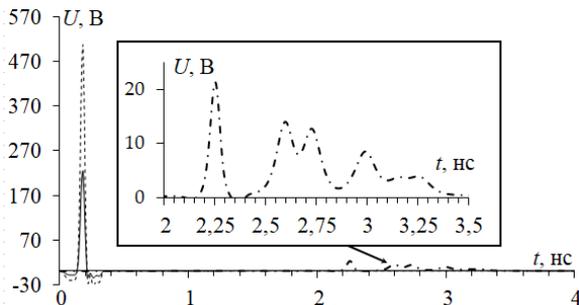


Рис. 10. Формы ЭДС (---), напряжения на входе (—) и выходе (-·-) 6-проводного МФ на основе кабельной структуры

В результате удалось ослабить воздействующую СШП-помеху в 10,2 раза (по сравнению с входным напряжением 220 В).

#### Экранирование

Экранирующие корпуса широко применяются для защиты РЭС от воздействия излучаемых электромагнитных помех. Способность корпуса обеспечивать защиту РЭС определяется значением его эффективности экранирования (ЭЭ), которая зависит от множества факторов: материала экрана, геометрических размеров экрана, его апертур и др. [7]. В данной работе предполагается использовать металлические корпуса с апертурами для экранирования основных элементов РЭС в составе БПЛА. Расчеты выполнены в среде 3D SE BOX [7].

Моделировался корпус для автопилота БПЛА длиной 100 мм, шириной 100 мм и высотой 100 мм с апертурой для кабелей. Частотная зависимость ЭЭ представлена на рис. 11.

Как видно из рис. 11, от 0 до 1,9 ГГц значение ЭЭ снижается со 150 до 80 дБ, от 1,9 до 3,8 ГГц – повышается до 120 дБ, а далее ЭЭ снижается до 0 дБ на частоте 5,5 ГГц. В диапазоне частот до 5 ГГц имеют место 2 резонанса на частотах 1,9 и 3,8 ГГц.

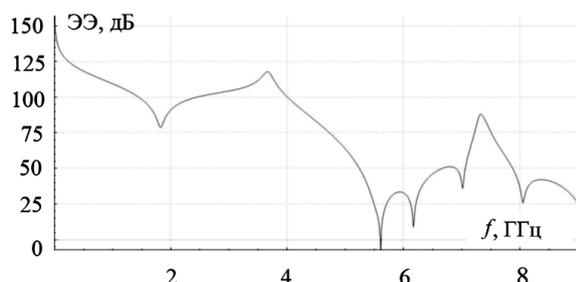


Рис. 11. Частотная зависимость ЭЭ модели корпуса автопилота MFD Crosshair

#### Заключение

Для обеспечения ЭМС в части защиты РЭС в составе БПЛА от воздействия СШП-помех в качестве структуры с модальными явлениями использо-

вались 2 различных МФ: на основе полосковой структуры с лицевой связью, включаемый между датчиком тока и аккумуляторной батареей, и 6-проводный МФ на основе полосковой структуры с лицевой связью способен ослабить СШП-помеху амплитудой 280 В до уровня 6,6 В, не превышающего максимального рабочего напряжения платы автопилота (12 В). Также рассмотрен 6-проводный МФ на основе кабельной структуры, включаемый между автопилотом и полетным контроллером. Структура позволяет разложить воздействующую СШП-помеху амплитудой на 6 мод с максимальным напряжением на выходе 21,87 В (с коэффициентом ослабления 11,6 раза). Наконец, сделан краткий анализ частотных зависимостей ЭЭ модели корпуса автопилота БПЛА.

В работе рассмотрен БПЛА MFD Mini Crosswind 1600. Составлена и модифицирована структурная схема основных РЭС в составе данного БПЛА, проведена оценка распространения кондуктивных помех. В качестве защитных устройств от воздействия СШП-помех рассмотрено применение МФ на основе полосковой структуры с лицевой связью и 6-проводного МФ на основе кабельной структуры. Выполнена оценка эффективности предложенных подходов к обеспечению ЭМС в части защиты РЭС БПЛА от воздействия СШП-помех. Результаты работы могут быть полезны для разработчиков БПЛА.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №22-29-01331, <https://rscf.ru/project/22-29-01331/>.

#### Литература

1. Макаренко С.И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам. – СПб.: Научное издание, 2020. – 204 с.
2. Методы противодействия БПЛА [Электронный ресурс]: сайт arsenal-otechestva.ru. – URL: <https://arsenal-otechestva.ru/article/1601-metody-protivodejstviya-bpla>. (дата обращения: 14.09.2023).
3. 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.
4. MFD Mini Crosswind 1600 // ru.banggood.com: Интернет-магазин 2020. – URL: [https://ru.banggood.com/New-MyFlyDream-MFD-Mini-Crosswind-1600mm-Wingspan-EPO-Aerial-Survey-Aircraft-FPV-Platform-Mapping-UAV-RC-Airplane-KIT-p-1546242.html?cur\\_warehouse=CN](https://ru.banggood.com/New-MyFlyDream-MFD-Mini-Crosswind-1600mm-Wingspan-EPO-Aerial-Survey-Aircraft-FPV-Platform-Mapping-UAV-RC-Airplane-KIT-p-1546242.html?cur_warehouse=CN) (дата обращения: 14.09.2023).
5. Система TALGAT – программный комплекс для моделирования задач электромагнитной совместимости [Электронный ресурс]: сайт talgat.org. – URL: <https://talgat.org/talgat-software/> (дата обращения: 15.09.2023).
6. Белоусов А.О. Анализ и оптимизация многопроводных структур с модальным разложением для обработки импульсных сигналов: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.04. – Томск, 2020. – 247 с.

7. Иванов А.А. Полуаналитический метод для оценки эффективности экранирования корпуса с апертурой / А.А. Иванов, М.Е. Комнатнов // Доклады ТУСУР. – 2021. – Т. 24, № 1. – С. 16–23.

---

**Пономарев Всеволод Алексеевич**  
Студент каф. телевидения и управления (ТУ) ТУСУРа  
Эл. почта: [ponomarev.vsevolod.2001@mail.ru](mailto:ponomarev.vsevolod.2001@mail.ru)

**Вавилонский Алексей Вячеславович**  
Студент каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: [lexa060602@gmail.ru](mailto:lexa060602@gmail.ru)

**Юнеман Марк Евгеньевич**  
Студент каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: [myuneman@bk.ru](mailto:myuneman@bk.ru)

**Белоусов Антон Олегович**  
Доцент каф. ТУ ТУСУРа, н.с. центра экспертизы и испытаний СахГУ, к.т.н.  
Эл. почта: [anton.belousov@tu.tusur.ru](mailto:anton.belousov@tu.tusur.ru)