

УДК 623.76

Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Часть 4. Функциональное поражение сверхвысокочастотным и лазерным излучениями

Макаренко С. И.

Актуальность. Начиная с середины 2000-х годов, в средствах массовой информации стали регулярно появляться сообщения об несанкционированном использовании беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в особо контролируемых зонах: в аэропортах, на военных объектах, против критической промышленной инфраструктуры и т.д. В настоящее время малые БПЛА широко используются для несанкционированного наблюдения важных объектов, проведения терактов и диверсий, переноски запрещенных грузов (оружия, наркотиков), а также в военном деле. В связи с этим, актуализировалась задача противодействия БПЛА, и особенно – малым БПЛА. Анализ публикаций в этой области показывает, что аналитических статей по данной тематике довольно мало. В подавляющем числе работ в этой области преобладают излишне оптимистические выводы относительно эффективности противодействия БПЛА существующими средствами радиоэлектронного подавления. Вместе с тем, проблема противодействия БПЛА, и, в особенности, малым БПЛА, является чрезвычайно сложной, многогранной и до сих пор эффективно не решенной. **Целями работы** являются систематизация и анализ различных способов и средств противодействия БПЛА, а также формирование общих направлений эффективного решения данной проблемы. Материал, представленный в данной статье, в частности, посвящен анализу возможностей средств функционального поражения сверхвысокочастотным (СВЧ) и лазерным излучением. **Результаты.** В статье представлены результаты систематизации и анализа различных способов и средств функционального поражения БПЛА с помощью СВЧ- и лазерного излучения. В основу систематизации положено более 50 открытых источников, анализ которых позволил вскрыть основные особенности функционального поражения радиоэлектронных компонентов БПЛА мощным СВЧ излучением, а также провести анализ эффектов, которые возникают вследствие воздействия на БПЛА лазерного излучения. **Элементами новизны работы** являются выявленные особенности процессов функционального поражения БПЛА, а также пути развития существующих средств – генераторов мощного СВЧ и лазерного излучения, в составе комплексов противодействия БПЛА. **Практическая значимость.** Материал статьи может использоваться для формирования исходных данных для моделирования и исследования эффективности комплексов противодействия БПЛА на основе СВЧ и лазерного излучения. Также, данная статья может быть полезна конструкторам, проектирующим интегрированные и перспективные системы противодействия БПЛА.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, БПЛА, БЛА, противодействие беспилотным летательным аппаратам, поражение беспилотного летательного аппарата, функциональное поражение, радиоэлектронная борьба, электромагнитный импульс, СВЧ-излучение, функциональное поражение электромагнитным излучением, лазерное оружие, лазер.

Введение

С появлением средних и малых беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) задачи противодействия их применению в особо контролируемых зонах существенно актуализировались. Начиная с середины 2000-х годов в сред-

Библиографическая ссылка на статью:

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.

Reference for citation:

Makarenko S. I. Counter Unmanned Aerial Vehicles. Part 4. Functional Destroying with Microwave and Laser Weapons. Systems of Control, Communication and Security, 2020, no. 3, pp. 122-157 (in Russian). DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10304.

ствах массовой информации стали регулярно появляться сообщения об опасном использовании малых БПЛА в районах аэропортов, а с середины 2010-х – о применении малых БПЛА для ведения несанкционированного наблюдения важных объектов, проведения терактов и диверсий, транспортировки запрещенных грузов (оружия, наркотиков), и широком использовании БПЛА в военном деле. В связи с этим на Западе началась активная научная разработка данного направления исследований, о чем можно судить по работам [1-9]. При этом данная проблематика является относительно новой, так как самая ранняя из работ по тематике противодействия БПЛА относится к 2008 г., а начало активных научных публикаций по этой тематике относится к 2016-2017 гг. В результате к 2020 г. в Западной научной печати были введены относительно устойчивые термины, а также определены основные направления исследований в этой предметной области: «противодействие БПЛА» – используются такие термины как «C-UAV», «CUAV», «C-UAVs», «CUAVs» (Counter Unmanned Aerial Vehicles); «системы противодействия БПЛА» – используются такие термины как «C-UAS», «CUAS» (Counter Unmanned Aircraft Systems), «C-UAV system», «CUAV-system», «AUDS» (Anti-UAV Defense System), Counter-Drone Systems; «технологии противодействия БПЛА» – используются такие термины как «Anti-Drone Technologies» и «Counter-UAVs Technologies».

При этом, если на начальном этапе появления задачи противодействия БПЛА (в начале 2000-х гг.) эта задача решалась исключительно средствами поражения зенитно-ракетных комплексов (ЗРК) противовоздушной обороны (ПВО), то в настоящее время специалисты осознали, что прямое отражение массированного налета БПЛА средствами ЗРК ПВО, во-первых, неоправданно экономически из-за использования дорогостоящих ракет по большому числу относительно дешевых БПЛА, а во-вторых, это ведет к быстрому исчерпанию боевого ресурса ЗРК и последующей их неспособности отразить удар уже пилотируемой авиации, а также крылатых ракет высокоточного оружия (ВТО). В связи с этим, в настоящее время широко исследуются дополнительные способы противодействия БПЛА, в том числе такие как применение средств радиоэлектронного подавления (РЭП), а также средств направленного излучения энергии – лазерного оружия. При этом, если применение лазерного оружия является еще относительно экспериментальной технологией, то способы противодействия БПЛА на основе совместного использования комплексов РЭП и ЗРК уже активно используются в практике локальных боевых действий (например, при действиях войск Воздушно-космической обороны (ВКО) России в Сирии), а также для формирования периметра защиты особо охраняемых объектов (например, специальных объектов РФ – объектов МО, МВД, ФСО, ФСИН и т.д.).

Анализ публикаций в области противодействия БПЛА показывает, что статей по данной тематике довольно мало, а в подавляющем числе работ в этой области преобладают излишне оптимистические выводы относительно успешности поражения всех видов БПЛА существующими отечественными средствами ПВО или же глубокое убеждение авторов в поистине «фантастических» возможностях средств РЭП. При этом многие авторы не вполне понимают

сложность задачи противодействия БПЛА, рассматривают исключительно отдельные, частные аспекты этой проблематики, а также не обладают сведениями о реальных возможностях существующих комплексов ПВО и РЭП. Вместе с тем, проблема (как видится автору – именно проблема) противодействия БПЛА, и, в особенности, малым БПЛА, является чрезвычайно сложной, многогранной, и до сих пор эффективно не решенной. Автор, имея определенный опыт разработки подобных систем, хотел бы отразить в данной работе всю сложность и многоаспектность проблематики разработки эффективных систем противодействия БПЛА, а также неприемлемость «поверхностных» и «однобоких» подходов к построению таких систем.

Обобщая вышесказанное, целями работы являются систематизация и анализ различных способов и средств противодействия БПЛА, а также формирование общих направлений эффективного решения данной проблемы.

Авторский материал по противодействию БПЛА, ввиду его большого объема, был разделен на несколько относительно независимых частей. Первая часть, представленная в статье [10], посвящена анализу БПЛА, как объекта обнаружения и поражения. Вторая часть, представленная в статье [11], была посвящена исследованию возможностей средств огневого поражения (средств ПВО) и физического перехвата БПЛА. Третья часть, представленная в статье [12], посвящена исследованию возможностей средств РЭП по подавлению систем управления, связи и навигации БПЛА. Четвертая часть, представленная в этой статье, посвящена рассмотрению противодействия БПЛА средствами функционального поражения электромагнитным излучением (ФП ЭМИ) – генераторами мощного сверхвысокочастотного (СВЧ) и лазерного излучений.

Материал данной статьи был декомпозирован на ряд логических подразделов.

1. Функциональное поражение БПЛА СВЧ электромагнитным излучением.
 - 1.1. Особенности функционального поражения радиоэлектронных средств СВЧ электромагнитным излучением.
 - 1.2. Характеристики и примеры средств функционального поражения СВЧ электромагнитным излучением, ориентированных на противодействие БПЛА.
 - 1.3. Эффективность функционального поражения БПЛА СВЧ электромагнитным излучением.
2. Противодействие БПЛА лазерным излучением.
 - 2.1. Особенности функционального поражения объектов лазерным излучением.
 - 2.2. Анализ средств функционального поражения БПЛА лазерным излучением.
 - 2.3. Эффективность функционального поражения БПЛА лазерным излучением.

Данная работа продолжает и развивает предыдущие работы автора, опубликованные по тематике оценки эффективности применения БПЛА и способов противодействия им, а именно – работы [10-15].

1. Функциональное поражение БПЛА

сверхвысокочастотным электромагнитным излучением

В работе [11] показано, что современные комплексы ПВО при поражении БПЛА вынуждены расходовать большое количество боеприпасов, которые с одной стороны, имеют низкую вероятность поражения, с другой стороны, являются невозполнимым материальным ресурсом, исчерпание которого ведет к невозможности комплекса ПВО в дальнейшем выполнять свою целевую задачу.

Средства РЭП не расходуют подобных материальных ресурсов и нуждаются исключительно в энергетическом обеспечении, которое может быть стационарным. Однако, как показано в работе [12], успешные вскрытие и подавление каналов навигации, управления и радиосвязи не гарантируют, что БПЛА прекратит свой полет в направлении контролируемой зоны. Именно отсутствие однозначной реакции БПЛА на успешное подавление является существенным недостатком комплексов противодействия БПЛА, основанным на РЭП. Вышеуказанного недостатка лишены другие средства, принцип функционирования которых основан на формировании направленного ЭМИ для нанесения ущерба целям – средствам ФП ЭМИ.

Средства ФП ЭМИ обладают большим «площадным эффектом», обеспечивая относительно эффективное прекращение полета практически всех БПЛА, попадающих в зону их действия независимо от их типа, режима управления (дистанционное управление или автономный полет), типа навигационной системы. Эффективность ФП ЭМИ основана на изменениях электрофизических параметров полупроводниковых элементов многочисленных радиоэлектронных средств (РЭС), функционирующих в составе БПЛА.

Вместе с тем эффективность средств ФП ЭМИ имеет и обратную сторону. В частности, им свойственны другие существенные недостатки – высокая мощность создаваемого ЭМИ и сложность обеспечения его «избирательности» в отношении поражаемых РЭС. Это остро ставит вопрос обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) средств ФП ЭМИ с другими РЭС в составе комплекса противодействия БПЛА.

Для всесторонней оценки данного способа поражения БПЛА рассмотрим основы функционального поражения РЭС СВЧ-излучением, имеющиеся в настоящее время прототипы подобных средств ФП ЭМИ, на основании чего проведем оценку эффективности применения данных средств поражения против БПЛА.

1.1. Особенности функционального поражения радиоэлектронных средств сверхвысокочастотным электромагнитным излучением

Функциональное поражение электромагнитным излучением – разрушение и/или повреждение элементов РЭС путем использования однократных или многократных импульсных электромагнитных воздействий, приводящих к необратимым изменениям электрофизических параметров в полупроводниковых или оптико-электронных элементах РЭС в результате их перегрева или пробоя [15].

Основным отличием ФП ЭМИ от РЭП является физический принцип нанесения ущерба. При ФП ЭМИ ущерб РЭС причиняется путем необратимого (катастрофического) или обратимого (восстанавливаемого) изменения физико-химической структуры элементов РЭС вследствие воздействия электромагнитных полей на материалы, входящие в состав электронных и полупроводниковых приборов и других компонентов этих систем. Эффект воздействия средств ФП ЭМИ на РЭС основан на возможности изменения физико-химических свойств электро- и радиоматериалов при облучении их сильными электромагнитными полями. Необратимые изменения свойств вещества, приводящие к качественно новым образованиям с иной электромагнитной структурой, происходят при значительной энергии воздействующего ЭМИ [15].

В зависимости от мощности, длительности импульсов, рабочей частоты источника ЭМИ и расстояния до РЭС эффекты от электромагнитного воздействия могут быть различными – от кратковременного снижения качества функционирования и временной потери работоспособности РЭС до его полного повреждения или разрушения в результате перегрева или полевого пробоя [15].

При воздействии ЭМИ на метровых и более длинных волнах на металлических корпусах РЭС наводятся значительные электродвижущие силы (ЭДС), отказывают различные электронные схемы и исполнительные элементы. При воздействии ЭМИ в дециметровом или сантиметровом диапазоне волн, совпадающем с рабочим диапазоном РЭС, повреждаются входные устройства (в частности, СВЧ-диоды). Миллиметровые волны проникают в щели экранов, повреждая как входные цепи, так и экранированные устройства микроэлектроники.

При взаимодействии мощных СВЧ-колебаний с РЭС БПЛА могут наблюдаться два основных эффекта [16]:

- 1) наведение на контурных элементах (выводах полупроводниковых приборов, печатных проводниках и т.д.) СВЧ-мощности, которая приводит к электрическим перегрузкам;
- 2) непосредственное взаимодействие СВЧ-импульсов со структурой и материалом полупроводникового элемента.

Мощности ЭМИ, формируемых известными средствами ФП ЭМИ, могут превышать десятки ГВт, при этом длительности их импульсов лежат в пределах от миллисекунд до наносекунд. В большинстве практических случаев функциональное поражение БПЛА при применении ЭМИ имеет место при отказе хотя бы одного из основных полупроводниковых элементов РЭС, управляющего полетом.

Перечень типовых нарушений работоспособности радио- и электротехнического оборудования РЭС при их эксплуатации в условиях воздействия ЭМИ приведен в таблице 1 [15, 17, 18].

Таблица 1 – Типовые нарушения работоспособности радио- и электротехнического оборудования РЭС при воздействии ЭМИ [15, 17, 18]

Тип устройства	Характер нарушения	Причина нарушения
Антенно-фидерные устройства (АФУ)	а) отказ антенного коммутатора; б) пробой изоляции антенны, излучателя и кабельной системы фидера; в) выход из строя входных устройств приемника и выходных устройств передатчика. Все нарушения в основном носят необратимый характер	а) появление перенапряжений в АФУ; б) низкая электрическая прочность входной элементной базы
Приемные и передающие устройства, генераторы синусоидальных сигналов и сигналов специальной формы	а) обратимые изменения электрического режима СВЧ-генераторов; б) временное увеличение коэффициента шума, изменение коэффициента шума, частоты и мощности генерируемых сигналов; в) сбои, выдача ложных импульсов и подавление полезных сигналов	а) превышение по амплитуде полезных сигналов наводками; б) перекрытие спектров полезных сигналов спектрами помеховых наводок; в) высокая чувствительность полупроводниковых элементов
Устройства управления, стабилизации и формирования команд	а) сбои в структуре команд; б) выдача ложных команд по разрядам кодовых групп; в) уменьшение амплитуды полезных сигналов; г) ложные срабатывания при обработке команд, их исполнении и отработке	а) наложение импульсов помех в цепях устройств на формируемые полезные сигналы и их суперпозиция во времени
Линейные усилители	а) выход из строя входных и выходных цепей; б) искажение формы входных (выходных) сигналов и появление ложных сигналов; в) самовозбуждение	а) появление перенапряжений в линиях связи; б) низкая электрическая прочность входных элементов усилителей; в) изменение тока поджига защитных разрядников
Электронные вычислительные машины (ЭВМ) и цифровые системы автоматики и управления	а) сбои в работе, нарушение нормального процесса выполнения программ; б) потери информации в регистрах оперативной памяти; в) ошибки и искажения вводимой и получаемой информации	а) наводки во внешних и внутренних цепях и схемах; б) выход из строя систем ввода и вывода информации
Источники питания	а) выход из строя первичных и вторичных источников электропитания; б) значительные амплитудные изменения выходного напряжения первичных источников и временное пропадание выходного напряжения вторичных источников питания	а) перенапряжение в питающих линиях электропередач; б) срабатывание линейной защиты и скачки тока и напряжения в питающих линиях; в) наводки по цепям питания и системам заземления; г) низкая электрическая прочность элементов преобразования

Элементная база РЭС весьма чувствительна к энергетическим перегрузкам. Поток электромагнитной энергии достаточно высокой плотности способен «выжечь» полупроводниковые переходы, полностью или частично нарушив их нормальное функционирование. Даже у кремниевых сильноточных биполярных транзисторов, обладающих повышенной стойкостью к перегревам, напряжение пробоя составляет 15-65 В, а у арсенид-галлиевых приборов – 10-12 В. Запоми-

нающие устройства имеют пороговые напряжения порядка 7 В, типовые логические интегральные схемы на МОП-структурах – 7-15 В, а микропроцессоры обычно прекращают свою работу при 3,3-5 В [15].

Кроме того, анализ результатов отечественных и зарубежных исследований воздействия импульсов ЭМИ наносекундной длительности напряженностью 2-10 кВ/м (при частоте следования импульсов порядка 1 МГц) на вычислительные блоки и микропроцессоры РЭС показал, что уровни наводимых напряжений приводят к отказам этих элементов и ложным срабатываниям в них, что делает практически невозможным корректное функционирование в них программного обеспечения [15].

Источниками импульсов мощного СВЧ ЭМИ могут быть мощные релятивистские СВЧ-генераторы (взрывомангнитные, магнитокумулятивные), обычные электровакуумные СВЧ-генераторы (усилители), в том числе с временной компрессией излучаемых импульсов, твердотельные генераторы с полупроводниковыми коммутаторами, генераторы с газовыми коммутаторами и др. В качестве излучателей также могут применяться апертурные антенны (зеркальные, рупорные), а также фазированные антенные решетки (ФАР) и активные ФАР [18].

Основным показателем устойчивости элементной базы к воздействию ЭМИ являются критериальные уровни поражения, определяемые значением энергии, при котором возникают восстанавливаемые и невосстанавливаемые отказы в элементах РЭС. В таблицах 2 и 3 приведены энергетические уровни поражения некоторых элементов, блоков и узлов РЭС.

Таблица 2 – Энергетические уровни поражения элементов РЭС при воздействии СВЧ-импульсов [19]

Тип прибора	Энергия повреждения, мкДж
СВЧ-диоды	0,1 – 10
Интегральные схемы	0,1 – 300
Цифровые интегральные схемы	80
Полевые транзисторы	10
Маломощные транзисторы	$1 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^4$
Транзисторы средней и большой мощности	$400 - 4 \cdot 10^4$
Выпрямительные диоды	$100 - 4 \cdot 10^5$
Быстродействующие переключающие диоды	20
Туннельные диоды	500
Кремниевые тиристоры	3000
Низкочастотные транзисторы	–

Критериальные (критические для поражаемого оборудования) уровни функционального поражения широкой номенклатуры РЭС отличаются большим разбросом и могут составлять от 10 до 5000 Вт/см². Типовые критериальные уровни различных полупроводниковых приборов приведены в работах [16, 19]. При этом наиболее уязвимыми элементами РЭС являются СВЧ-диоды, работающие во входных трактах преобразователей частоты, интегральные микросхемы и диоды с точечным контактом.

Таблица 3 – Уровни функционального поражения некоторых блоков и узлов РЭС при воздействии импульсного СВЧ-излучения [19]

Тип изделия	Плотность потока энергии, Вт/см ²	Поток энергии, Дж/см ²	Длительность импульса, с	Частота импульсов, кГц	Длительность воздействия, с
Усилители систем управления и связи	10 – 40	$10^{-2} - 4 \cdot 10^{-2}$	10^{-3}	–	–
Узлы систем управления и связи на интегральных схемах (ИС) и больших интегральных схемах (БИС)	70 – 600	$0,7 \cdot 10^{-2} - 6 \cdot 10^{-2}$	10^{-6}	1	1
Элементы радиопередатчиков	$10^4 - 10^5$	$10^{-3} - 10^{-4}$	10^{-7}	–	–
Радиоприемники через антенну с $S_{эфф} = 1-2 \text{ м}^2$	1 – 100	$10^{-5} - 10^{-6}$	10^{-7}	–	–
Телевизионные системы на видеоканалах (повреждение видеоусилителя)	$3 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^3$	0,6 – 2	$2 \cdot 10^{-4} - 4 \cdot 10^{-4}$	–	–

В таблице 4 приведены характеристики нескольких типов генераторов мощных ЭМИ-импульсов миллиметрового и сантиметрового диапазонов электромагнитных волн [19].

Таблица 4 – Характеристики некоторых мощных СВЧ-генераторов миллиметрового и сантиметрового диапазонов волн [19]

Тип генератора	Частота, ГГц	Длительность импульса	Выходная мощность	КПД, %	Примечание
Гиратрон с импульсным соленоидом, обладающий стабилизируемым носителем энергии	500	2 мкс	более 100 кВт	–	Эксперимент
Тиратрон с высокой эффективностью моды TE ₀₃₁	140	2 мкс	100 кВт	30	Эксперимент
Тиратрон с резонаторами моды TE ₀₃₁	100	–	1000 кВт	–	–
Виркатор	До 40	3 – 5 нс	до 1 ГВт	–	–
Релятивистский гиратрон	35	55 нс	0,2 ГВт	–	Разработан
Взрывоманитный генератор	–	1 мкс	10^{10} кВт	–	Разработан в Лос-Аламосе

Как видно из таблицы 4, наиболее короткие импульсы достигаются в виркаторах, а наибольшая выходная мощность реализуется во взрывоманитных генераторах. Современный уровень развития СВЧ-генераторов обеспечивает выделение в нагрузке энергии 10^7-10^8 Дж, мощность которой эквивалентна мощности энергии, освобождающейся при взрыве заряда взрывчатого вещества массой 10 кг [19].

Более подробные сведения о средствах ФП ЭМИ и вариантах их целевого применения представлены в работах [15-20].

1.2. Характеристики и примеры средств функционального поражения СВЧ электромагнитным излучением, ориентированных на противодействие БПЛА

Прикладные исследования по созданию экспериментальных средств ФП ЭМИ ведутся с 1995 г. при этом опытные образцы этих средств регулярно проходят испытания в ходе военных конфликтов [14].

К достоинствам средств ФП ЭМИ при их применении против БПЛА можно отнести следующие:

- расширение диапазона решаемых задач за счет возможности поражения не излучающих БПЛА;
- универсальность (способность ЭМИ поражать широкую номенклатуру БПЛА, при этом эффективность поражения БПЛА не зависит от их типа, габаритов, функционального назначения);
- внеполосность (способность ЭМИ проникать внутрь РЭС БПЛА помимо полосы пропускания его приемных трактов радиосвязных РЭС);
- эффективное воздействие на БПЛА с высокой помехозащищенностью к применению традиционных способов РЭП;
- отказ от сложных средств анализа и имитации сигналов для подавления канала навигации и радиосвязи БПЛА, которые традиционно используются в РЭП;
- снижение в ряде случаев требований к качеству целеуказания (по местоположению, частотному диапазону, режимам работы), которое необходимо для поражения БПЛА противника.

Перспективные образцы средств ФП ЭМИ основаны на генерации кратковременного импульса ЭМИ большой мощности, способном вывести из строя РЭС, составляющие основу системы управления любого БПЛА.

Основываясь на данных об испытании опытных образцов, представленных в работах [15, 19], можно сформировать приблизительные обобщенные ТТХ средств ФП ЭМИ.

Мобильные средства ФП ЭМИ:

- используемый диапазон частот: 0,5-20 ГГц;
- частота повторения импульсов: 10 Гц;
- длительность импульса: 200-1000 нс;
- импульсная мощность излучения: 1-5 ГВт;
- энергия в импульсе: 2-10 кДж;
- тип энергоустановки: газотурбинный генератор;
- тип источника ЭМИ: гираторы, виркаторы, черенковский генератор;
- КПД генераторного прибора 36-40%;
- КПД средства ФП ЭМИ в целом: 20-25%;
- масса: 6-10 т;
- варианты базирования: автомобиль, бронетранспортер;
- диаметр антенны: 2-5 м;
- дальность действия: в пределах прямой радиовидимости.

Средства ФП ЭМИ одноразового действия:

- используемый диапазон частот: 6-10 ГГц;
- энергия в импульсе: 3-5 ГВт;
- длительность импульса: 150-1500 нс;
- тип источника ЭМИ: взрывомагнитный генератор, резонансный магнетрон, виркатор;
- масса: 500 кг;
- дальность действия: 3-4 км.

Малогабаритные средства ФП ЭМИ:

- используемый диапазон частот: 0,5-100 ГГц;
- энергия в импульсе: 1-5 ГВт;
- длительность импульса: 1-100 нс;
- тип источника ЭМИ: взрывомагнитный генератор, ударно-волновой генератор;
- масса: 40-50 кг;
- дальность действия: 1-2 км.

Вместе с тем, вышеуказанные данные относятся к средствам ФП ЭМИ, так сказать, вообще, без ориентированности этих средств именно на какие-либо определенные объекты поражения. Что касается средств ФП ЭМИ ориентированных на поражение именно БПЛА, то достоверной информации по таким средствам чрезвычайно мало. Вместе с тем, судя по открытым публикациям, работы в направлении создания таких средств ведутся во всех технологически развитых странах, в том числе в США, России и Китае.

Как показано в статьях [21, 22] в США компания Raytheon с 2013 г. ведет разработку комплекса Phaser, задачей которого является функциональное поражение одиночных и групп БПЛА потоком мощных СВЧ-импульсов. Комплекс Phaser передан в опытную эксплуатацию в 2020 г., по итогам которой ожидается принятие решения о начале серийного производства. Phaser выполнен на основе стандартного грузового контейнера, внутри и снаружи которого устанавливаются необходимые системы (рис. 1). В том же контейнере организовано рабочее место оператора. Основная часть оборудования размещается внутри контейнера. На его крыше помещено поворотное основание с излучателем, который может складываться для транспортировки. Излучатель комплекса Phaser состоит из антенны и управляемого отражающего зеркала. Первая выполнена в виде прямоугольного полотна, установленного под наклоном. Рабочая поверхность направлена внутрь, в направлении зеркала. Зеркало выполнено в виде диска с приводами наведения в двух плоскостях. Его перемещение относительно излучателя обеспечивает управление направлением СВЧ-луча в двух плоскостях. Грубая наводка осуществляется поворотом всей конструкции. Параметры излучателя, мощность, энергопотребление, параметры луча, дальность эффективного поражения БПЛА и т.д. – в открытой печати отсутствуют. При этом, известно, что излучатель имеет два режима. Первый отличается меньшей мощностью излучения и предназначен для серьезного нарушения работы БПЛА. Второй режим предусматривает кратковременное включение излучателя

на большую мощность, с целью функционального поражения БПЛА. Комплекс Phaser получает целеуказание о направлении на БПЛА от внешних источников через существующие средства связи и управления. После этого выполняется расчет данных для наведения излучателя с последующим формированием последовательности СВЧ-импульсов. Собственные средства обнаружения и целеуказания в комплексе пока отсутствуют.



Рис. 1. Комплекс Phaser [22]

Основной задачей комплекса Phaser является создание бесполётных зон ПВО, за счет функционального поражения, прежде всего, БПЛА всех классов, а также, по возможности, пилотируемых летательных аппаратов [21, 22].

В 2016 г. компания Raytheon провела заводские испытания, в ходе которых комплекс Phaser успешно поразил 33 БПЛА разных типов, причем некоторые цели выполняли полет парами и тройками. Комплекс показал возможность противодействия БПЛА мощным направленным СВЧ-излучением, а также простоту эксплуатации и низкую стоимость боевого применения. Длительность и интенсивность работы в боевом режиме на излучение фактически зависят только от ресурса имеющейся системы энергоснабжения [21, 22].

В ходе дальнейших доработок компания Raytheon планирует сократить габариты изделия Phaser. Таким образом, в будущем могут появиться компактные и мобильные средства ПВО на основе принципов ФП ЭМИ [21, 22].

В статьях [23, 24] показано, что аналогичные разработки ведутся и в России. Так на выставке ЛИМА-2001 в Малайзии еще в 2001 г. Россия продемонстрировала действующий образец боевого комплекса ФП ЭМИ «Ранец-Э» разработки Московского радиотехнического института РАН (рис. 2).



Рис. 2. Комплекс Ранец-Э [23, 24]

По заявлению Рособоронэкспорта этот комплекс предназначен для борьбы с малыми БПЛА, а также крылатыми ракетами высокоточного оружия. Комплекс «Ранец-Э» состоит из антенны, высокомоушного генератора, подсистемы управления, измерительной установки и источника электропитания. «Ранец-Э» может быть изготовлен в стационарном и мобильном вариантах (масса собственно боевых средств – около 5 т). Мощностъ излучения – 500 МВт в импульсе длительностъю 10-20 нс в X-диапазоне. Комплектация изделия «Ранец-Э» предусматривает возможность использования 2-х антенн (рис. 3) [23, 24]:

- с усилением 50 дБи и с шириной главного лепестка диаграммы направленности антенны (ДНА) 15-20° – дальностъ эффективного поражения РЭС 7-14 км, дальностъ частичного нарушения функционирования РЭС – 22-40 км;
- с усилением 45 дБи и с шириной главного лепестка ДНА 60° – дальностъ эффективного поражения РЭС до 7 км, дальностъ частичного нарушения функционирования РЭС – до 23 км.

Эффект функционального поражения достигается путем формирования на поверхности цели напряженности электрического поля, превышающей 1 кВ/м, что вызывает пробой, выводящие из строя РЭС аппарата. Комплекс «Ранец-Э», подобно комплексу Phaser, также получает внешнее целеуказание от радиолокационных станций (РЛС) и пунктов управления (ПУ) сопрягаемых систем ПВО [23, 24].

Помимо разработки стационарных и мобильных комплексов ФП ЭМИ активно разрабатываются и другие средства такого типа поражения. Одним из перспективных вариантов применения средств ФП ЭМИ является создание малогабаритных генераторов мощного СВЧ-импульса, которые доставляются на рубеж гарантированного функционального поражения РЭС (50-100 м от БПЛА) путем встраивания в артиллерийские снаряды или в зенитно-управляемые ракеты (ЗУР) и запуска последних в направлении группы БПЛА. Такие способы применения выстреливаемых средств ФП ЭМИ рассмотрены в работах [25, 26].

1.3. Эффективность функционального поражения БПЛА сверхвысокочастотным электромагнитным излучением

В настоящее время, несмотря на потенциальную перспективность развития средств поражения этого типа, публикаций по оценке эффективности применения подобных средств именно против БПЛА относительно немного. К таким публикациям можно отнести работы [27-33].

В работе [27] исследуется эффективность способа воздействия мощных коротких СВЧ-импульсов на антенну средств радиосвязи БПЛА при их работе в С, S и L диапазонах. Результаты исследования представлены в таблице 5. Как показано в этой работе, эффект нарушения связи, а также необратимое функциональное поражение средств радиосвязи БПЛА происходят из-за наведения СВЧ-импульсами паразитного напряжения на его антенне, которое, вследствие низких изоляционных свойств материалов электронных компонентов БПЛА, начинает негативно влиять на элементы приемного тракта, прежде всего, усилители, вплоть до их полного отказа. Аналогичные результаты и выводы о функциональном поражении усилителей в приемном тракте средств радиосвязи БПЛА были получены и в работе [28], в которой исследовалось воздействие СВЧ-импульсов длительностью 0,5-4,5 нс мощностью 1 ГВт с частотой следования 1-100 Гц.

Таблица 5 – Результаты исследования воздействия коротких СВЧ-импульсов на антенну средств радиосвязи БПЛА [27]

Диапазон	Плотность потока мощности, Вт/см ²	Частота следования импульсов, Гц	Продолжительность воздействия, с	Длительность импульса, нс	Достижимый эффект
С	100	50	3	200	Эффекты отсутствуют
S	100	50	3	200	Эффекты отсутствуют
L	5-30	1	1	100	Перебои в радиосвязи
	30	1	1	200	Перебои в радиосвязи
	30	10	1	200	Перебои в радиосвязи
	30	10	3	100	Долговременная потеря радиосвязи
	40-50	1	1	100	Перебои в радиосвязи
	50	10	1	100	Необратимая потеря связи без ее восстановления

В работе [29] представлены экспериментальные исследования влияния СВЧ-импульсов на малые коммерческие БПЛА DJI Phantom 3 и Phantom 4. Результаты исследования показывают, что воздействие СВЧ-импульсов шириной 2-3 ГГц с максимумом в области 1-2 ГГц с длительностью 200-270 пс, в зависимости от значений напряжённости формируемого на БПЛА электрического поля, ведут к двум типам отказов. При формировании напряжённости электрического поля порядка 1,4 кВ/м наблюдаются необратимое нарушение функционирования БПЛА, потеря управления и его «неуправляемая посадка», т.е. фак-

тически его полное функциональное поражение. При формировании напряжённости электрического поля порядка 0,05-0,07 кВ/м наблюдается обратимые эффекты нарушения приема-передачи данных, ошибки в выполнении команд управления и т.д. При такой напряженности, прекращение воздействия ведет к восстановлению управляемости БПЛА.

В целом вышеуказанные данные, согласуются с критическими значениями напряженности электрического поля на поверхности БПЛА, необходимыми для его функционального поражения, приводимыми для комплекса «Ранец-Э» (рис. 3), которой был рассмотрен ранее. Судя по графику, уровень напряженности электрического поля, ведущий к нарушению функционирования БПЛА, составляет от 1 кВ/м, а уровень полного функционального поражения – 3 кВ/м [24].

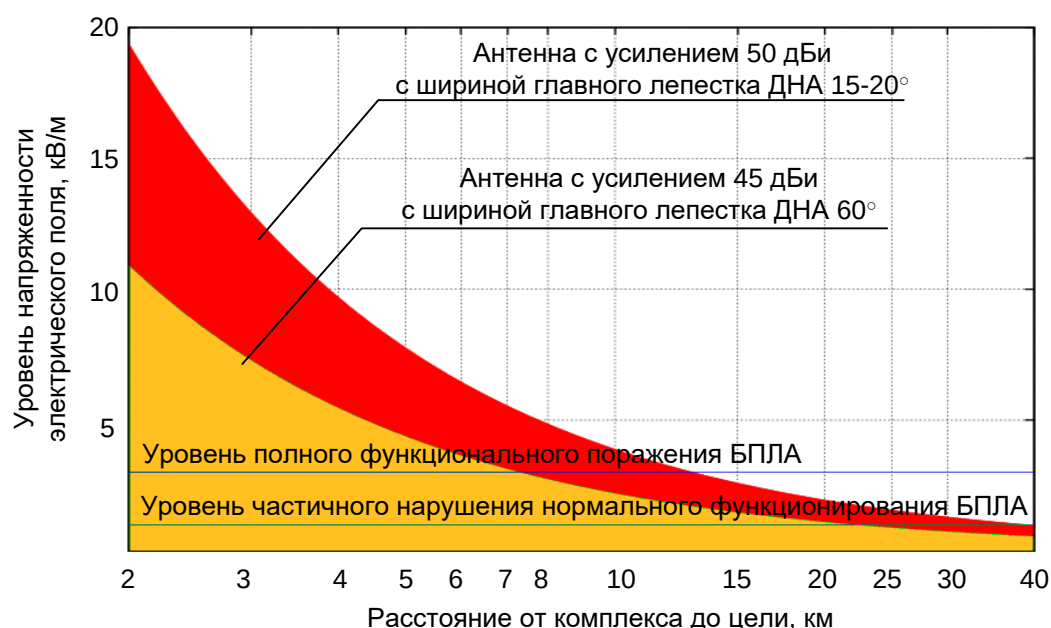


Рис. 3. Уровни напряженности электрического поля на поверхности цели, формируемые комплексом «Ранец-Э» на различных расстояниях до цели [24]

В работах [30-33] рассмотрены вопросы обоснования ТТХ потенциальных средств ФП ЭМИ, мощности излучателей и параметров ФАР, обеспечивающих внеполосное функциональное поражение БПЛА.

В работах [30-32] показано, что для реализации внутрисполостного режима функционального поражения БПЛА требуется обеспечить следующую мощность на входе соответствующих радиоэлектронных элементов БПЛА. Для деградации микроволновых диодов и интегральных схем необходима мощность на входе приемников поражаемых РЭС от 0,006 до 0,4 Вт, коммутирующих диодов и маломощных транзисторов – 0,06-9,5 Вт, микроволновых диодов и микросхем – от 6,125 до 125 Вт, коммутирующих диодов и маломощных транзисторов соответственно – от 62 Вт. Расчетная напряженность электрического поля, обеспечивающая такую деградацию радиоэлектронных элементов с учетом коэффициента потерь $K_{\pi} = -28$ дБ, составляет порядка 70 кВ/м при величине рассогласования направлений главных лепестков ДНА средства ФП ЭМИ

и БПЛА на 5 дБ, при использовании пачки импульсов длительностью 255 мкс с количеством импульсов $N=1000$ шт. (длительность одиночного импульса 5 нс, период их следования 250 нс). Предложена конструкция антенной системы на основе цилиндрической ФАР с выходной мощностью излучения 0,25 МВт, позволяющей осуществлять внутриволновое функциональное поражение БПЛА с вышеуказанными параметрами в диапазоне частот от 10 ГГц до 12 ГГц на дальности действия до 5 км.

В работе [33] предложен вариант системы функционального подавления БПЛА в котором критериальные уровни деградации радиоэлектронных элементов достигаются путем фокусировки ЭМИ. Показано, что для внеполосного подавления РЭС БПЛА с чувствительностью от $5 \cdot 10^{-13}$ до 10^{-14} Вт на дальностях 0,5-1 км требуется средство ФП ЭМИ с эффективной площадью апертуры антенны 0,2-0,5 м² выходной мощностью 2 кВт, формирующие плотность потока мощности СВЧ ЭМИ в районе БПЛА от $3,8 \cdot 10^{-3}$ до 50 мкВт/см².

В целом, анализ работ [27-33] показывает, что несмотря на отсутствие в настоящее время реальных средств ФП ЭМИ, ориентированных на поражение БПЛА, разработка прототипов подобных средств активно ведется многими технологически развитыми странами. При этом первые опытные экземпляры подобных средств поражения демонстрируют высокую эффективность и могут обеспечивать необратимое поражение всех типов БПЛА на дальности до 10 км. Недостатком этих средств является то, что одновременно с поражением БПЛА поражаются и другие типы РЭС попадающие в зону воздействия, что исключает применение средств ФП ЭМИ в мирное время, в населенных пунктах и на промышленных объектах. Кроме того, отдельным проблемным вопросом, который, судя по всему, пока никак не прорабатывается, является обеспечение электромагнитной безопасности операторов средств ФП ЭМИ.

2. Функциональное поражение БПЛА лазерным излучением

Функциональное поражение БПЛА лазерным излучением является в настоящее время еще одним перспективным, но пока еще не получившим широкого распространения, способом противодействия БПЛА. Для всесторонней оценки данного способа поражения БПЛА рассмотрим основы поражения объектов лазерным излучением, имеющиеся в настоящее время прототипы подобных средств поражения, на основании чего проведем оценку эффективности применения данных средства против БПЛА.

2.1. Особенности функционального поражения объектов лазерным излучением

Лазер, являющийся оптическим квантовым генератором, способен формировать сильное ЭМИ в оптическом диапазоне волн с высокой плотностью энергии в весьма узком телесном угле. Свойство очень узкой направленности луча и высокая энергетическая плотность излучения позволяют применять лазер в качестве средства функционального поражения [17, 35].

Атмосфера прозрачна для лазерного излучения в диапазоне длин волн 0,3-1 мкм. Это несколько шире видимой области. Лазеры способны генери-

ровать ЭМИ в широком оптическом диапазоне, однако, как средства функционального поражения практический интерес представляют оптические квантовые генераторы, работающие в так называемых «окнах прозрачности» атмосферы, которым соответствуют волны оптического диапазона $\lambda = 0,5-2$ мкм, за исключением «непрозрачных» участков $\lambda = 0,95; 1,15; 1,3-1,5$ мкм [17].

В ИК-диапазоне тоже есть «окна прозрачности», где отсутствуют линии молекулярного поглощения различных атмосферных газов и аэрозольных примесей. Однако для длин волн менее 0,3 мкм атмосфера абсолютно непрозрачна. Но даже в диапазоне прозрачности атмосферы лазерный луч рассеивается в облаках, в тумане, на аэрозолях и на пылинках [17].

Из всего многообразия лазеров наиболее целесообразными к использованию в качестве лазерного оружия считаются твердотельные, химические, со свободными электронами и др. [35].

Обобщенные характеристики лазерных устройств приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Обобщенные характеристики лазерных устройств

Активная среда	Длина волны, мкм	Энергия импульса, Дж	Длительность импульса, с	Диаметр луча на выходе, мм
Рубин	0,69	300	10^{-3}	6
Стекло с ниодимом	1,06	150	10^{-3}	6
Полупроводник	0,84	10^{-4}	–	
Газовая He+Ne	1,15	$2 \cdot 10^{-2}$	Непрерывный режим	10

Сформированное лазером ЭМИ обладает высокой степенью пространственно-временной когерентности. Временная когерентность поля достигает значения $\tau_{\text{ког}} \approx 0,1$ с, благодаря чему удастся получить сигнал с узким спектром ($f \approx 10$ Гц) [17].

Высокая степень пространственной когерентности позволяет с помощью простых оптических устройств концентрировать энергию лазера в весьма узком телесном угле. Эта способность лазера позволяет при сравнительно небольшой энергии излучения на выходе оптической системы даже на больших расстояниях до подавляемого РЭС формировать ЭМИ с плотностью энергии, которой достаточно для достижения эффекта функционального поражения на значительных расстояниях (около 10 км). Однако вследствие весьма малого сечения лазерного луча (0,2-0,8 м²) на расстоянии от 20 км и выше возникает проблема точного наведения луча на цель [17].

Можно выделить следующие механизмы функционального поражения объектов лазерным оружием [17].

1. Непосредственное поражение электронных приборов путем прямого воздействия мощного узконаправленного лазерного ЭМИ.
2. Выведение из строя объекта за счет вторичного индуцированного излучения плазмы, порождаемой взаимодействием сильного электромагнитного поля и твердого вещества (например, материала корпуса цели). В частности, при облучении управляемых ракет лазерным излучением с плотностью мощности порядка 10 Вт/см² вблизи поверхности

обтекателя возникает мощное плазменное образование, являющееся источником некогерентного оптического излучения [17]. В этом случае возможно обратимое (временное) поражение РЭС, которое через некоторое время восстанавливает свои функции.

3. Деструктивное воздействие на поверхностный слой материала цели, в результате лазерное излучение может разрушить тонкостенные оболочки тепловым или ударным воздействием. В этом случае поражающее действие лазерного оружия определяется в основном термомеханическим и ударно-импульсным воздействием лазерного луча на цель и достигается за счет нагревания до высоких температур материалов объекта. Это вызывает расплавление или даже испарение материалов.

Действие лазерного излучения отличается внезапностью, скрытностью, отсутствием внешних признаков в виде огня, дыма, звука, высокой точностью, прямолинейностью распространения и практически мгновенным действием [17, 35].

Среди общих преимуществ лазерного оружия военные специалисты отмечают огромную концентрацию энергии на единице площади, практически мгновенное поражение объекта на недостижимых для других видов оружия дальностях, высокую избирательность поражения. При этом лазерные боевые комплексы могут быть наземного, морского, воздушного базирования [18, 35].

Более подробная общетеоретическая информация о методах и способах функционального поражения лазерным излучением представлена в работах [17, 16, 20].

2.2. Анализ средств функционального поражения БПЛА лазерным излучением

В США с 1996 г. дочерней фирмой «Boeing» – Boeing Defense and Space Group велись разработки лазерного оружия большой мощности. В частности, разрабатывался химический лазер COIL (Chemical Oxygen Iodine Laser) авиационного базирования, общей мощностью 6 МВт, способный поражать баллистические ракеты на дальности 400-460 км. Однако комплекс специфичных проблем, связанных с созданием генераторов мощного лазерного излучения, таких как расфокусировка луча вследствие изменения оптико-физических свойств линз под влиянием лазерного излучения, необходимость отвода большого количества тепла, не позволил успешно завершить данный проект.

В 2009 г. компания Northrop Grumman Corporation сумела создать мощный и надежный боевой твердотельный лазер. Ей удалось первой в мире достичь на лазере подобной конструкции мощности луча в 105,5 кВт. Работы ведутся в рамках военной программы JHPSSL (Joint High Power Solid-State Laser – «Модульный высокомоощный твердотельный лазер»). В 2010 г. удалось добиться непрерывной работы твердотельного лазера на этой мощности в течение 6 ч. Это произошло во время тестовых испытаний в процессе интеграции системы наведения и слежения перед полевыми испытаниями. По габаритам установка-демонстратор JHPSSL сопоставима с автобусом и состоит из 7 лазерных усилителей мощностью каждого порядка 15 кВт, что в сумме дает 105,5 кВт. В одном из пресс-релизов Northrop Grumman Corporation за 2009 г. сообщалось, что бы-

ло проведено успешное испытание системы из 8 лазерных усилителей общей мощностью 120 кВт.

В 2011 г. прошли испытания «Морского лазера-демонстратора» MLD (Maritime Laser Demonstrator), созданного Northrop Grumman Corporation. В испытаниях участвовал твердотельный лазер, разрабатываемый в рамках военной программы JHPSSL и состоящий из нескольких модулей мощностью по 15 кВт, который был установлен на борту выведенного из боевого состава эсминца типа Spruance Paul Foster. В пресс-релизе по итогам тестирования сообщалось, что впервые боевая лазерная система для корабля была интегрирована с его радиолокационной системой обнаружения и его навигационной системой, а также впервые лазерное оружие производило «выстрелы» в море с движущейся платформы.



Рис. 4. Морской лазер-демонстратор MLD [34]

По мнению американских экспертов, лазерные средства поражения идеально подходят для корабельных систем ПВО и ПРО по следующим причинам. Во-первых, на кораблях стоят мощные энергетические установки, зачастую избыточной мощности. Во-вторых, над морем воздух чище, чем над сушей [39]. При этом, изменение акцента разработчиков с мегаваттной мощности в сторону киловаттной скорректировало применение лазерных средств в сторону их использования для поражения БПЛА в составе систем ПВО, а также в сторону создания гибридных систем ПВО-ПРО.

На портале YouTube было выложено официальное видео испытаний созданного исследовательской лабораторией Командования морских систем ВМС лазера LaWS (Laser Weapon System), проходивших 30 июля 2012 г. в Сан-Диего на борту USS Dewey (DDG-105) [40]. В апреле 2013 г. ВМС США заявили о

планах оснащения в 2014 г. боевых кораблей лазерами, способными поражать БПЛА и мелкие суда [41]. В конце 2014 г. первая боевая лазерная установка была развернута на корабле ВМС США в Персидском заливе [42].

В 2012 г. компания Lockheed Martin официально представила прототип компактной наземной системы лазерной ПВО-ПРО ADAM (Area Defense Anti-Munitions) [43]. Система испытывалась в 2012 и 2013 г. для борьбы с небольшими БПЛА и ракетами на расстоянии в 1,5-2 км и в 2014 г. – против моторных лодок [44].

Корпорация Boeing в кооперации с британским подразделением европейского консорциума BAE System создало гибрид лазера и малокалиберной автоматической пушки Mk-38. Автоматом Mk-38 на турели вооружаются десантные и вспомогательные суда ВМС США. Эффективный огонь может вестись на дальность 2,5 км. Исполнители в июле 2011 г. объявили о создании прототипа тактической лазерной системы TLS (Tactical Laser System) для поражения БПЛА и малых судов [14].

Годом раньше подобную систему ПВО-ПРО на авиакосмическом салоне Farnborough-2010 в Великобритании показала американская компания Raytheon. Шесть волоконных лазеров LaWS (Laser Weapon System) общей мощностью 50 кВт были объединены с корабельной 20-мм шестиствольной автоматической артиллерийской установкой Mark 15 Phalanx CIWS (Close-In Weapon System – «орудийная система ближнего боя»). Подразумевается, что комбинированная установка сможет поражать цель 6 лазерами, чьи лучи сведены в одну точку. В первую очередь она предназначена для борьбы с противокорабельными ракетами. Если же это не удастся, то на более близком расстоянии в дело вступит шестиствольная пушка, выпускающая 4500 снарядов в минуту (дальность эффективной стрельбы Mark 15 Phalanx – 1,5 км). На испытаниях в мае 2010 г. система обнаружила, захватила, взяла на сопровождение и поразила четыре БПЛА, летевших на разных высотах и дальностях. Представители Raytheon дали понять, что условия испытаний были близки к реальным боевым. При этом в британских СМИ появилось неподтвержденное сообщение, что один из БПЛА был поражен на дальности 3,2 км при скорости 480 км/ч [14].

В декабре 2013 г. в США прошли испытания боевого мобильного лазера HEL MD (High Energy Laser Mobile Demonstrator) мощностью 10 кВт для подразделений тактического звена. Во время испытаний установка уничтожила более 90 минометных снарядов и несколько БПЛА. Разработку программы HEL MD ведет корпорация Boeing. В 2014 г. были проведены успешные его испытания в сложных погодных условиях. Идут работы по установке с мощностью лазера 50 кВт, а в дальнейшем – 100 кВт. Это позволит уничтожать цели с более высокой скоростью движения [14, 47].

Американское военное агентство DARPA испытало в начале 2014 г. установку Excalibur. Она включает в себя 28 волоконных лазеров, объединенных в систему, которая способна фокусировать луч на расстоянии, превышающем 7 км. Каждый элемент обладает излучающей мощностью в 10 кВт. Лазеры объединены в блоки по 7 шт., при этом диаметр такого блока составляет 10 см, а их общее количество и мощность можно наращивать простым соединением. Экс-

перименты DARPA показали эффективность масштабируемого лазера с набором излучателей. Excalibur использует особый алгоритм оптимизации лазерного излучения и в течение считанных миллисекунд корректирует параметры лазерного луча, компенсируя турбулентность атмосферы. В течение следующих трех лет планируется довести мощность до 100 кВт. Данной мощности достаточно для уничтожения ракет, снарядов, БПЛА и поражения живой силы. Кроме того, такую систему можно будет совместить с существующими платформами: вертолетами, самолетами, кораблями и бронетехникой. Разработчики ожидают, что волоконно-оптический лазер будет в 10 раз легче и компактнее текущих опытных твердотельных лазерных систем [48].

В 2014 г. ВМС США и компания Kratos Defense & Security Solutions провели модернизацию десантного корабля USS Ponce (LPD-15), в ходе которой он получил новое вооружение и сопутствующее оборудование. На корабле была смонтирована лазерная система ПВО AN/SEQ-3 Laser Weapon System или XN-1 LaWS (рис. 5).



Рис. 5. AN/SEQ-3 Laser Weapon System (LaWS)

Основным элементом комплекса XN-1 LaWS является твердотельный инфракрасный лазер регулируемой мощности, с пиковой мощностью до 30 кВт. Предполагается, что комплекс XN-1 LaWS может использоваться кораблями ВМС США для самообороны от БПЛА и малых надводных целей. За счет изменения энергии ЭМИ может регулироваться степень воздействия на цель. Так, маломощные режимы смогут поражать ОЭС БПЛА, а полная мощность позволит обеспечить физическое поражение цели, за счет его нагрева и разрушения. Таким образом, лазерная система способна защитить корабль от различных угроз, отличаясь определенной гибкостью применения. Испытания лазерного комплекса AN/SEQ-3 были начаты в середине 2014 г. в режиме с ограничением

мощности генератора до 10 кВт. В дальнейшем планировалось провести ряд проверок с постепенным наращиванием мощности. На расчетные 30 кВт планировалось выйти в 2016 г. [49].

Примечательно, что лазерные системы борьбы с БПЛА заинтересовали не только ВМС, но и сухопутные войска США.

Так, в интересах сухопутных войск в 2015 г. компанией Boeing был представлен комплекс Compact Laser Weapon Systems (CLWS или CLaWS) – рис. 6. Задачей этого проекта является создание малогабаритной лазерной системы противодействия БПЛА, которую можно будет транспортировать при помощи легкой техники или силами расчета из двух человек. Комплекс CLWS оснащается лазером мощностью всего 2 кВт, что позволило достигнуть приемлемых боевых характеристик при компактных размерах. Тем не менее, несмотря на меньшую мощность в сравнении с другими аналогичными комплексами, система CLWS способна решать поставленные боевые задачи.



Рис. 6. Лазерный комплекс CLWS

В 2015 г. в ходе учений Black Dart состоялись испытания комплекса CLWS в условиях, приближенных к реальным. Учебно-боевой задачей расчета было обнаружение, сопровождение и уничтожение малогабаритного БПЛА. Автоматика системы CLWS успешно взяла на сопровождение цель в виде БПЛА самолетного типа, а затем направила лазерный луч на хвостовую часть цели. В результате воздействия на пластиковые агрегаты цели в течение 10-15 с произошло возгорание нескольких деталей с образованием открытого пламени (рис. 7). Испытания были признаны успешными. В 2016 г. по заказу сухопутных войск США были проведены испытания 2 кВт лазера CLWS в рамках испытаний Maneuver Fires Integrated Experiment, для чего лазер смонтировали на

стандартном бронеавтомобиле JLTV. В кабине машины установили пульт управления, а блок с излучателем разместили на стойке над грузовой площадкой. Такая компоновка позволяла осуществлять круговую наводку и контролировать почти всю верхнюю полусферу. JLTV с CLWS успешно справился с поиском и уничтожением БПЛА условного противника. В дальнейшем, по мере развития этого проекта планируется разработка комплексов с мощностью 5 и 10 кВт. Так, лазер мощностью 10 кВт должен был выйти на испытания в 2019 г. Однако, пока же продолжаются испытания менее мощной системы [45].

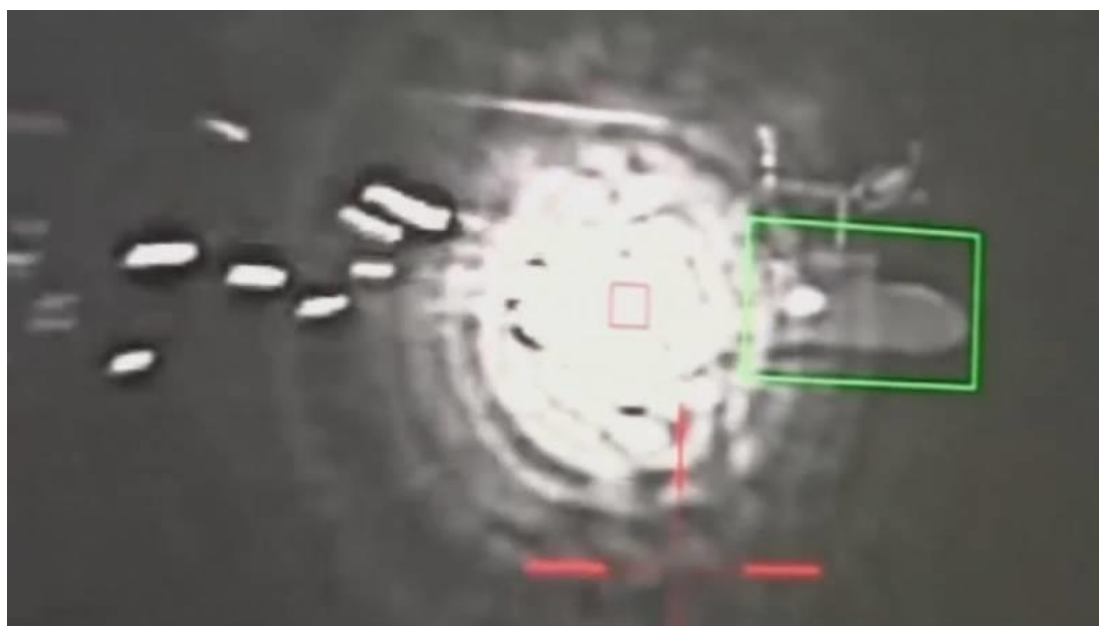


Рис. 7. Атака БПЛА системой CLWS, съемка в ИК-диапазоне. Наблюдается разрушение конструкции БПЛА вследствие ее нагрева лазером [49]

Близким к принятию на вооружение можно считать разработанный для БТР Stryker лазерный комплекс GDLS компании Boeing мощностью 5 кВт, задачей которого является борьба с малоразмерными БПЛА во взаимодействии с другими системами ПВО. Этот комплекс получил наименование Stryker MENEL 2.0. В ходе испытаний MFIХ (Maneuver Fires Integrated Experiment) в 2016 г. в США, комплекс Stryker MENEL 2.0 поразил 21 БПЛА из 23 запущенных. На последней версии комплекса дополнительно установлены системы РЭП для подавления каналов связи и навигации БПЛА. Компания Boeing планирует последовательно увеличивать мощность лазера вначале до 10 кВт, а в дальнейшем и до 60 кВт [37].

В октябре 2018 г. в рамках тех же испытаний MFIХ уже другая компания – Raytheon продемонстрировала работу малогабаритной лазерной установки противодействия тактическим БПЛА. Один лазер, установленный на легковом автомобиле, поразил за короткий период 12 БПЛА на удалении до 1,4 км [38].

В перспективе в армии США должны появиться лазерные системы противодействия БПЛА мощностью до 100 кВт, позволяющие осуществлять их по-

ражение на удалении до 5 км. Ключевое преимущество систем лазерного поражения БПЛА – в уникальной дешевизне единичных «выстрелов».

Не отстают от США и другие технологически развитые страны. Так в 2012 г. немецкая компания Rheinmetall провела испытания лазерной системы мощностью 50 кВт, состоящей из двух комплексов на 30 кВт и 20 кВт, предназначенных для перехвата миномётных снарядов в полёте, а также для поражения воздушных целей, в том числе – БПЛА. В ходе испытаний с расстояния в 1 км была перерезана стальная балка толщиной 15 мм, а с расстояния 3 км были уничтожены 2 малых БПЛА. Необходимая мощность комплексов в этой системе обеспечивается интеграцией необходимого количества модулей по 10 кВт. В 2015 г. на выставке DSEI-2015 компания Rheinmetall представила лазерный модуль мощностью уже 20 кВт, установленный на машину Boxer 8×8. В 2019 г. компания Rheinmetall сообщила об успешном испытании боевого лазерного комплекса мощностью 100 кВт. Данный комплекс включает высокомогущный источник энергии, модульный генератор лазерного излучения, управляемый оптический резонатор, формирующий направленный лазерный луч, систему наведения, отвечающую за поиск, обнаружение, распознавание и сопровождение целей, с последующим наведением и удержанием лазерного луча. Система наведения обеспечивает круговой обзор в секторе 360° и угол наведения по вертикали 270°. Лазерный комплекс может быть размещен на наземных, воздушных и морских носителях, что обеспечивается модульностью конструкции. Испытания, проведенные в декабре 2018 г., показали высокие результаты, свидетельствующие о возможном скором запуске оружия в серийное производство. В качестве мишеней для проверки возможностей оружия были задействованы БПЛА и минометные снаряды. Таким образом, компания Rheinmetall последовательно, год за годом, развивала лазерные технологии, и в результате она может стать одним из первых производителей, предлагающих заказчикам серийно производимые боевые лазерные комплексы достаточно высокой мощности, ориентированные на решение задач ПВО, в том числе – на противодействие БПЛА [37].

В 2015 г. немецкая оборонная компания MBDA на Парижском авиасалоне представила лазерную установку мощностью 40 кВт, которая может сбивать мини-БПЛА в радиусе 3-5 км и успешно использовалась по воздушным целям на расстоянии более 2 км и высоте 1 км. Для подсветки цели и более точного наведения боевого лазера предполагалось использовать еще один лазер малой мощности. При этом ранее компания MBDA испытала лазерную установку мощностью 20 кВт, которая успешно уничтожила мини-БПЛА на расстоянии 500 м, затратив на это 3,4 с. В модернизированной установке были использованы 4 лазера мощностью по 10 кВт, лучи которых фокусировались с помощью системы зеркал. Коэффициент полезного действия (КПД) составлял около 30%. Благодаря модульному принципу можно собирать и более мощные установки. Инженеры MBDA сочли оптимальным использование от 4 до 6 лазерных модулей в установке, что позволит сохранить небольшие габариты всей системы. Компания также планировала разработать самоходную лазерную установку с переменной мощностью от 5 до 20 кВт [36].

2.3. Эффективность функционального поражения БПЛА лазерным излучением

Обобщая вышесказанное, можно сделать вывод, что функциональное поражение БПЛА существующими лазерными комплексами достигается за счет возникновения одного или нескольких эффектов:

- поражение электронных приборов, прежде всего матриц приемников оптико-электронных средств (ОЭС) бортовой аппаратуры наблюдения БПЛА путем прямого воздействия сильного узконаправленного лазерного ЭМИ;
- нагревание до высоких температур материалов БПЛА, с последующим их возгоранием, расплавлением или разрушением;
- индуцирование плазмы, порождаемой взаимодействием лазерного ЭМИ и твердого вещества (например, пластикового корпуса) БПЛА;
- лазерные средства могут применяться совместно со средствами огневого поражения ПВО для «подогрева» цели, в интересах повышения ее «видимости» для ИК-головок самонаведения (ГСН) зенитных управляемых ракет (ЗУР) комплексов ПВО.

Подавляющее число существующих лазерных комплексов из вышеуказанных эффектов, в основном используют только первые два – поражение ОЭС и поражение конструкции БПЛА путем его нагрева. Рассмотрим их более подробно.

Одним из основных элементов БПЛА, подвергающихся лазерному излучению, является фото- видео-приемник ОЭС. Рассмотрение воздействия излучения большой мощности на фотоприемники основывается на процессах взаимодействия лазерного излучения с полупроводниками, из которых изготавливают приемники оптического излучения ОЭС. Экспериментальные исследования показали, что при плотности энергии лазерного излучения $5 \cdot 10^{-3} - 10^{-2}$ Дж/см² и длительности импульсов 0,3 с температура наружной поверхности фильтра на площади, куда попало излучение, превышает температуру плавления его поверхностного слоя. При плотностях энергии импульсного лазерного излучения на входном зрачке ОЭС порядка 10^{-2} Дж/см² происходит быстрый нагрев приемника излучения до высокой температуры. Такие уровни облучения могут быть созданы лазерным источником с энергией излучения в импульсе 200-300 Дж на дальностях порядка 5 км [16].

Что касается поражения БПЛА путем его нагрева, то здесь необходимо отметить, что такой способ поражения зависит от мощности лазерного ЭМИ и времени удержания лазерного луча на БПЛА. Результаты испытаний показывают, что для теплового поражения БПЛА требуется удержание на нем лазерного луча мощностью 2 кВт в течении 10-15 с, а луча 20-50 кВт – 0,5-5 с. Такая длительность удержания луча на цели является существенной проблемой на высоких дальностях поражения (свыше 10 км). Например, для того, чтобы попасть в отсек с двигателем БПЛА с размахом крыла 1 м на удалении 2 км требуется угловая точность наведения лазерного луча не хуже $0,00145^\circ$. Поскольку БПЛА находится в движении и маневрирует, то реальная точность ориентации лазерного луча для получения эффекта поражения БПЛА должна быть еще на

порядок выше. Выдержать это требование в ближайшее время вряд ли будет возможно [50].

Сегодня функциональное поражение БПЛА является еще экспериментальной технологией. Однако, результаты испытаний первых прототипов позволяют утверждать, что именно данный тип поражения малых коммерческих БПЛА имеет высокую эффективность и наилучшие перспективы развития. К основным достоинствам данного типа поражения стоит отнести следующее.

1. В сравнении со средствами ПВО, лазерные средства поражения не расходуют какой-либо ресурс материальных средств (снаряды, ракеты и т.п.), при этом возможности непрерывной работы на отражение массированного налета группы БПЛА ограничены исключительно энергоемкостью источника питания, а при наличии стационарного питания – ограничены режимом непрерывной работы генератора лазерного ЭМИ на излучение.
2. В сравнении со средствами РЭП лазерные средства поражения, обеспечивают однозначный эффект прекращения полета БПЛА за контролируемую зону путем его нагрева с последующим разрушением. Причем данный эффект не завит от достоверности предварительного вскрытия параметров командной радиолнии управления или эффективности постановки помех. Средства поражения лазерным излучением обладают высокой избирательностью, могут применяться против БПЛА, осуществляющих полет в режиме «радиомолчания» и по автономной программе, днем и ночью, в условиях как мирного, так и военного времени, в том числе – в черте городской застройки и на промышленных объектах.
3. В сравнении со средствами поражения СВЧ ЭМИ при сопоставимой эффективности лазерные средства поражения не требуют проведения масштабных мероприятий по обеспечению ЭМС с другими РЭС, а также мероприятий по электромагнитной безопасности операторов данных средств.

Вероятность функционального поражения БПЛА без отражателей и защитных экранов $P_{\text{пор}}$ с помощью лазерного излучения можно определить по выражению [50]:

$$P_{\text{пор}} = P_{\text{обн}} P_{\text{нав}} P_{\text{уд}} P_{\text{разр}},$$

где:

$P_{\text{обн}}$ – вероятность обнаружения БПЛА в интересах выдачи целеуказания на лазерное средство поражения. Обнаружение может производиться как РЛС так и ОЭС, при этом подробные вероятностно-дальностные оценки обнаружения БПЛА представлены в работе [10];

$P_{\text{нав}}$ – вероятность успешного наведения лазерного луча на БПЛА. Для механической следящей системы этот показатель применительно к рассмотренным выше условиям находится на уровне 0,8-0,87 [50];

$P_{\text{уд}}$ – вероятность удержания лазерного луча на БПЛА в течение заданного времени. Для БПЛА летящего прямолинейно с постоянной скоростью

$P_{уд} \approx 0,9$. Для БПЛА маневрирующего с перегрузкой $g \geq 1,7$ вероятность удержания луча составляет $P_{уд} \leq 0,3$ [50];

$P_{разр}$ – вероятность того, что воздействие лазерного луча на конструкцию БПЛА приведёт к её разрушению, возгоранию, взрыву горючего или боеприпаса. При возможности точной идентификации цели эта величина может достигать значения $P_{разр} \rightarrow 1$. В других случаях, прожиг пустотелого корпуса или плоскости крыла, к фатальным последствиям для БПЛА не приведет. По крайней мере, все попытки повредить вращающийся воздушный винт БПЛА во время экспериментов окончились безрезультатно [50]. Кроме того, на эту вероятность влияют факторы трассы распространения луча – облачность, дымка, туман, осадки резко снижают вероятность разрушения $P_{разр}$ даже при условии высоких показателей обнаружения, наведения и удержания луча.

К недостаткам и проблемным вопросам использования лазерных средств поражения можно отнести следующее.

1. Эффективность лазерных средств поражения существенно зависит от метеоусловий. Низкая облачность, дымка, туман, осадки, все это резко снижает эффективность применения данных средств.
2. Эффективность лазерных средств поражения может быть существенно снижена, фактически сведена к нулю, применением одиночными или группой БПЛА таких элементарных способов маскировки как распыление аэрозолей типа «дымовая завеса».
3. Лазерные средства поражения требуют высокоточного внешнего целеуказания, как правило, от РЛС или ОЭС обнаружения БПЛА.
4. Для достижения эффекта поражения БПЛА требуется удержание лазерного луча на цели в течение 0,5-15 с, что на высоких дальностях и при маневренном полете БПЛА является достаточно сложной технической задачей.
5. С развитием и широким распространением технологий лазерного поражения ожидается переход к использованию в корпусах БПЛА материалов, специально ориентированных на отражение или рассеивание лазерного излучения.

В целом отметим, что современные лазерные системы находятся только в начале своего пути в качестве эффективной системы ПВО и противодействия БПЛА. Научно-исследовательский задел 2010-х гг., полученный при проведении испытаний первых образцов лазерного вооружения, позволил сформировать основные принципы построения лазерных комплексов ПВО – использование твердотельных и волоконных лазеров, а также построение лазерных систем по модульному принципу, путем объединения нескольких лазерных генераторов в единый комплекс. Однако несмотря на наличие успешно работающих прототипов, вопросы объединения большого числа генераторов, объединение генераторов высокой мощности, синхронизация их работы и сведение всех лучей на цели на высокой дальности, повышение КПД лазерных систем, а также создание эффективных систем теплоотведения – это сложные технические задачи, которые до конца еще не решены.

Заключение

В статье представлены результаты систематизации и анализа различных способов и средств противодействия БПЛА, основанных на их функциональном поражении СВЧ и лазерным излучениями. В основу систематизации положен анализ открытых источников, что позволило вскрыть основные особенности БПЛА, как объекта функционального поражения, а также провести подробный анализ перспективных комплексов ФП ЭМИ и их потенциальной эффективности при работе по воздушным целям такого типа.

Элементом новизны работы являются выявленные общие особенности процессов функционального поражения БПЛА, а также системные недостатки используемых технологических решений в комплексах ФП ЭМИ, а также перспективные направления их развития.

Материал статьи может использоваться для формирования исходных данных для моделирования и исследования эффективности комплексов ФП ЭМИ при их противодействии БПЛА. Также, данная статья может быть полезна конструкторам, проектирующим системы противодействия БПЛА.

Исследование выполнено в рамках госбюджетной темы НИР СПИИРАН № 0073-2019-0004.

Литература

1. Michel A. H. Counter-drone systems. – Center for the Study of the Drone at Bard College, 2018. – 23 с.
2. Countering rogue drones. – FICCI Committee on Drones, EY, 2018. – 31 с.
3. de Visser E., Cohen M. S., LeGoullon M., Sert O., Freedy A., Freedy E., Weltman G., Parasuraman R. A Design Methodology for Controlling, Monitoring, and Allocating Unmanned Vehicles // Third International Conference on Human Centered Processes (HCP-2008). – 2008. – С. 1-5.
4. Sheu B. H., Chiu C. C., Lu W. T., Huang C. I., Chen W. P. Sheu B. H. et al. Development of UAV Tracing and Coordinate Detection Method Using a Dual-Axis Rotary Platform for an Anti-UAV System // Applied Sciences. 2019. Т. 9. № 13. С. 2583.
5. Kratky M., Minarik V. The non-destructive methods of fight against UAVs // 2017 International Conference on Military Technologies (ICMT). – IEEE, 2017. – С. 690-694.
6. Kim B. H., Khan D., Choi W., Kim M. Y. Real-time counter-UAV system for long distance small drones using double pan-tilt scan laser radar // Preceding SPIE 11005, Laser Radar Technology and Applications XXIV, 110050C (2 May 2019). – 2019. DOI: 10.1117/12.2520110.
7. Gaspar J., Ferreira R., Sebastião P., Souto N. Capture of UAVs Through GPS Spoofing // 2018 Global Wireless Summit (GWS). – IEEE, 2018. – С. 21-26.
8. Müller W., Reinert F., Pallmer D. Open architecture of a counter UAV system // Preceding SPIE 10651, Open Architecture/Open Business Model Net-Centric Systems and Defense Transformation 2018, 1065106 (9 May 2018). – 2018. DOI: 10.1117/12.2305606.

9. Hartmann K., Giles K. UAV exploitation: A new domain for cyber power // 8th International Conference on Cyber Conflict (CyCon). – IEEE, 2016. – С. 205-221.

10. Макаренко С. И., Тимошенко А. В., Васильченко А. С. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Часть 1. Беспилотный летательный аппарат как объект обнаружения и поражения // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 1. С. 109-146. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10105.

11. Макаренко С. И., Тимошенко А. В. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Часть 2. Огневое поражение и физический перехват // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 1. С. 147-197. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10106.

12. Макаренко С. И. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Часть 3. Радиоэлектронное подавление систем навигации и радиосвязи // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 2. С. 101-175. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10205.

13. Макаренко С. И. Робототехнические комплексы военного назначения – современное состояние и перспективы развития // Системы управления, связи и безопасности. 2016. № 2. С. 73-132. DOI: 10.24411/2410-9916-2016-10204.

14. Макаренко С. И., Иванов М. С. Сетецентрическая война – принципы, технологии, примеры и перспективы. Монография. – СПб.: Научные технологии, 2018. – 898 с.

15. Макаренко С.И. Информационное противоборство и радиоэлектронная борьба в сетевых войнах начала XXI века. Монография. – СПб.: Научные технологии, 2017. – 546 с.

16. Добыкин В. Д., Куприянов А. И., Пономарев В. Г., Шустов Л. Н. Радиоэлектронная борьба. Силовое поражение радиоэлектронных систем / Под ред. А.И. Куприянова. – М.: Вузовская книга, 2007. – 468 с.

17. Куприянов А. И., Шустов Л. Н. Радиоэлектронная борьба. Основы теории. – М.: Вузовская книга, 2011. – 800 с.

18. Буренок В. М., Ляпунов В. М., Мудров В. И. Теория и практика планирования и управления развитием вооружения / Под ред. А.М. Московского. – М.: Изд-во «Вооружение. Политика. Конверсия», 2005. – 418 с.

19. Перунов Ю. М., Мацукевич В. В., Васильев А. А. Зарубежные радиоэлектронные средства / Под ред. Ю.М. Перунова. В 4-х книгах. Кн. 2: Системы радиоэлектронной борьбы. – М.: Радиотехника, 2010. – 352 с.

20. Леньшин А. В. Бортовые системы и комплексы радиоэлектронного подавления – Воронеж: Научная книга, 2014. – 590 с.

21. Рябов К. Проект Raytheon PHASER: фантастическое оружие в опытной эксплуатации // Военное обозрение [Электронный ресурс], 30.09.2019. – URL: <https://topwar.ru/162882-proekt-raytheon-phaser-fantastika-v-opytnoj-jekspluatacii.html> (дата обращения 10.06.2020).

22. Mizokami K. The Army's Real-Life "Phaser" Would Knock Out an Entire Drone Swarm With One Shot // Popular Mechanics [Электронный ресурс], 14.11.2016. – URL: <https://www.popularmechanics.com/military/weapons/a23881/the-army-is-testing-a-real-life-phaser-weapon/> (дата обращения 10.06.2020).
23. Рябов К. «Ранец» против ракет // Военное обозрение [Электронный ресурс], 18.04.2012. – URL: <https://topwar.ru/13539-ranec-protiv-raket.html> (дата обращения 10.06.2020).
24. Боевой ЭМИ-генератор "Ранец-Е" // Око планеты [Электронный ресурс], 04.04.2012. – URL: <https://oko-planet.su/politik/politikarm/110924-boevoy-emi-generator-ranec-e-rossiya.html> (дата обращения 10.06.2020).
25. Юрков Н. К., Горячев Н. В., Кузина Е. А. Способ двухфакторного функционального подавления беспилотного летательного аппарата // Патент России RU 2700206 C1 от 13.09.2019. Бюл. № 26 от 13.09.2019.
26. Юрков Н. К., Горячев Н. В., Кузина Е. А. Способ функционального подавления беспилотного летательного аппарата // Патент России RU 2700207 C1 от 13.09.2019. Бюл. № 26 от 13.09.2019.
27. Zhang D., Zhou X., Cheng E., Wan H., Chen Y. Investigation on Effects of HPM Pulse on UAV's Datalink. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2020. Т. 62. № 3. С. 829-839.
28. Shukun G., Erwei C., Yazhou C., Yuming W. Research on ultra-wideband electromagnetic pulse irradiation effect and protection method of Unmanned Aerial Vehicle // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Т. 1325. № 1. С. 012165. doi: 10.1088/1742-6596/1325/1/012165.
29. Sakharov K. Yu., Sukhov A. V., Ugolev V. L., Gurevich Yu. M. Study of UWB Electromagnetic Pulse Impact on Commercial Unmanned Aerial Vehicle // Proceedings of the 2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2018), Amsterdam, The Netherlands, August 27 - 30, 2018.
30. Ясечко М. Н., Воробйов О. М. Рекомендации по технической реализации формирующих каналов цилиндрических фазированных антенных решеток с V-образными распределениями частот по апертуре для средств функционального поражения БПЛА // Системи обробки інформації. 2013. № 4 (111). С. 48-51.
31. Ясечко М. Н., Максютя Д. В., Дзигора А. М. Обоснование выбора цилиндрической фазированной антенной решетки для средств функционального поражения радиоэлектронной аппаратуры // Системи озброєння і військова техніка. 2014. № 1 (37). С. 251-253.
32. Ясечко М. Н., Очкуренко А. В., Ковальчук А. А., Максютя Д. В. Современные радиотехнические средства борьбы с беспилотными летательными аппаратами в зоне проведения АТО // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. 2015. № 3 (44). С. 54-57.
33. Гомозов А. В., Грецких Д. В., Демченко А. В., Цикаловский Н. М. Средства функционального подавления радиоэлектронных средств малоразмерных беспилотных летательных аппаратов с фокусировкой

электромагнитного излучения // Космическая техника. Ракетное вооружение. 2018. № 1 (115). С. 13-19.

34. Maritime Laser destroys target boat in at-sea test // optics.org [Электронный ресурс]. 11.04.2016. – URL: <https://optics.org/news/2/4/15> (дата доступа 20.06.2020).

35. Владимиров В. А., Лебедев А. В. Анализ состояния и тенденций развития современных видов оружия // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. 2012. № 2. С. 61-80.

36. Сысуев С., Умеренков С., Игнатов А., Акатьев С. Боевые лазеры: состояние, перспективы // Армейский сборник [Электронный ресурс]. 02.04.2020. – URL: <https://army.ric.mil.ru/Stati/item/253471/> (дата доступа 20.06.2020).

37. Митрофанов А. Лазерное оружие: сухопутные войска и ПВО. Часть 3 // Военное обозрение [Электронный ресурс]. 19.03.2019. – URL: <https://topwar.ru/155508-lazernoe-oruzhie-suhoputnye-vojska-i-pvo-chast-3.html> (дата доступа 20.06.2020).

38. Федоров Е. Война с дронами. Саудовский голиаф против хуситов // Военное обозрение [Электронный ресурс]. 28.09.2019. – URL: <https://topwar.ru/162842-vojna-s-dronami-saudovskij-goliaf-protiv-husitov.html> (дата доступа 20.06.2020).

39. Рябов К. Новости проекта CBARS (США) // Военное обозрение [Электронный ресурс]. 2016. – URL: <https://topwar.ru/91693-novosti-proekta-cbars-ssha.html> (дата доступа 29.06.2016).

40. Laser Weapon System (LaWS) // YouTube [Электронный ресурс]. 08.04.2013. – URL: <https://www.youtube.com/watch?v=OmoldX1wKYQ&feature=youtu.be> (дата обращения 19.01.2017).

41. США намерены оснащать военные корабли лазерным оружием // Информационное агентство РИА-новости [Электронный ресурс]. 2013. – URL: <https://ria.ru/world/20130409/931642.html> (дата доступа 20.06.2020).

42. ВМС США вооружились лазерной пушкой, чтобы сбивать дроны, сообщают СМИ // Информационное агентство РИА-новости [Электронный ресурс]. 18.11.2014. – URL: https://ria.ru/defense_safety/20141118/1033980337.html (дата обращения 20.06.2020).

43. Area Defense Anti-Munitions (ADAM) // Lockheed Martin [Электронный ресурс]. 2012. – URL: <http://www.lockheedmartin.com/us/products/ADAM.html> (дата обращения 20.06.2020).

44. Lockheed Martin Demonstrates New Ground-Based Laser System in Tests Against Rockets and Unmanned Aerial System // Lockheed Martin [Электронный ресурс]. 27.11.2012. – URL: <http://www.lockheedmartin.com/us/news/pressreleases/2012/november/1127-ss-adam.html> (дата обращения 20.06.2020).

45. Проект Boeing CLWS. Лазерная ПВО для Пентагона // Военное обозрение [Электронный ресурс], 24.06.2019. – URL: <https://topwar.ru/159300-proekt-boeing-clws-lazernaja-pvo-dlja-pentagona.html> (дата доступа 20.06.2020).

46. Настоящее и будущее беспилотной авиации. Часть 1 // Военное обозрение [Электронный ресурс]. 25.01.2016. – URL: <https://topwar.ru/89642-nastoyaschee-i-budushee-bespilotnoy-aviacii-chast-1.html> (дата обращения 20.06.2020).

47. Армия США провела испытания наземного боевого лазера против воздушных целей // Независимое военное обозрение [Электронный ресурс]. 13.12.2013. – URL: <http://nvo.ng.ru/news/452359.html> (дата обращения 20.06.2020).

48. Excalibur Prototype Extends Reach of High-Energy Lasers // DARPA [Электронный ресурс]. 03.06.2014. – URL: <http://www.darpa.mil/news-events/2014-03-06> (дата обращения 20.06.2020).

49. О борьбе с беспилотными летательными аппаратами // Военное обозрение [Электронный ресурс], 18.07.2016. – URL: <https://topwar.ru/98134-o-borbe-s-bespilotnymi-letatelnyimi-apparatami.html> (дата доступа 20.06.2020).

50. Ростопчин В. В. Ударные беспилотные летательные аппараты и противовоздушная оборона – проблемы и перспективы противостояния // Беспилотная авиация [Электронный ресурс]. 2019. – URL: https://www.researchgate.net/publication/331772628_Udarnye_bespilotnye_letatelnye_apparaty_i_protivovozdusnaa_oborona_-_problemy_i_perspektivy_protivostoania (дата обращения 20.05.2019).

References

1. Michel A. H. *Counter-drone systems*. Center for the Study of the Drone at Bard College, 2018. 23 p.

2. *Countering rogue drones*. FICCI Committee on Drones, EY, 2018. 31 p.

3. de Visser E., Cohen M. S., LeGoullon M., Sert O., Freedy A., Freedy E., Weltman G., Parasuraman R. A Design Methodology for Controlling, Monitoring, and Allocating Unmanned Vehicles. *Third International Conference on Human Centered Processes (HCP-2008)*, 2008, pp. 1-5.

4. Sheu B. H., Chiu C. C., Lu W. T., Huang C. I., Chen W. P. Sheu B. H. et al. Development of UAV Tracing and Coordinate Detection Method Using a Dual-Axis Rotary Platform for an Anti-UAV System. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9, no. 13, pp. 2583.

5. Kratky M., Minarik V. The non-destructive methods of fight against UAVs. *2017 International Conference on Military Technologies (ICMT)*. IEEE, 2017, pp. 690-694.

6. Kim B. H., Khan D., Choi W., Kim M. Y. Real-time counter-UAV system for long distance small drones using double pan-tilt scan laser radar. *Preceding SPIE 11005, Laser Radar Technology and Applications XXIV, 110050C (2 May 2019)*, 2019. DOI: 10.1117/12.2520110.

7. Gaspar J., Ferreira R., Sebastião P., Souto N. Capture of UAVs Through GPS Spoofing. *2018 Global Wireless Summit (GWS)*, IEEE, 2018, pp. 21-26.

8. Müller W., Reinert F., Pallmer D. Open architecture of a counter UAV system. *Preceding SPIE 10651, Open Architecture/Open Business Model Net-Centric Systems and Defense Transformation 2018, 1065106 (9 May 2018)*. 2018. DOI: 10.1117/12.2305606.

9. Hartmann K., Giles K. UAV exploitation: A new domain for cyber power. *8th International Conference on Cyber Conflict (CyCon)*. IEEE, 2016. pp. 205-221.

10. Makarenko S. I., Timoshenko A. V., Vasilchenko A. S. Counter Unmanned Aerial Vehicles. Part 1. Unmanned aerial vehicle as an object of detection and destruction. *Systems of Control, Communication and Security*, 2020, no. 1, pp. 109-146 (in Russian). DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10105.

11. Makarenko S. I., Timoshenko A. V. Counter Unmanned Aerial Vehicles. Part 2. Rocket and Artillery Fire, Physical Interception. *Systems of Control, Communication and Security*, 2020, no. 1, pp. 147-197 (in Russian). DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10106.

12. Makarenko S. I. Counter Unmanned Aerial Vehicles. Part 3. Electronic Warfare against Navigation and Radio Connection Subsystems of Unmanned Aerial Vehicles. *Systems of Control, Communication and Security*, 2020, no. 2, pp. 101-175 (in Russian). DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10205.

13. Makarenko S. I. Military Robots - the Current State and Prospects of Improvement. *Systems of Control, Communication and Security*, 2016, no. 2, pp. 73-132 (in Russian). DOI: 10.24411/2410-9916-2016-10204.

14. Makarenko S. I., Ivanov M. S. *Setecentricheskaya vojna - principy, tekhnologii, primery i perspektivy. Monografiya [Network-centric warfare - principles, technologies, examples and perspectives. Monograph]*. Saint Petersburg, Naukoemkie Tekhnologii Publ., 2018. – 898 p. (in Russian).

15. Makarenko S. I. *Informatsionnoe protivoborstvo i radioelektronnaia borba v setetsentricheskikh voinakh nachala XXI veka. Monografiia [Information warfare and electronic warfare to network-centric wars of the early XXI century. Monograph]*. Saint Petersburg, Naukoemkie Tekhnologii Publ., 2017. 546 p. (in Russian).

16. Dobykin V. D., Kupriianov A. I., Ponomarev V. G., Shustov L. H. *Radioelektronnaia bor'ba. Silovoe porazhenie radioelektronnykh sistem [Electronic Warfare. Power Failure of Electronic Systems]*. Moscow, Vuzovskaia Kniga Publ., 2007. 468 p. (in Russian).

17. Kuprijanov A. I., Shustov L. N. *Radioelektronnaia bor'ba. Osnovy teorii [Electronic warfare. Fundamentals of the theory]*. Moscow, Vuzovskaia Kniga Publ., 2011. 800 p. (in Russian).

18. Burenok V. M., Liapunov V. M., Mudrov V. I. *Teoriia i praktika planirovaniia i upravleniia razvitiem vooruzheniia [Theory and practice of planning and managing the development of weapons]*. Moscow, "Vooruzhenie. Politika. Konversii" Publ., 2005. 418 p. (in Russian).

19. Perunov Ju. M., Matsukevich V. V., Vasil'ev A. A. *Zarubezhnye radioelektronnye sredstva. Tom 2: Sistemy radioelektronnoi bor'by [Overseas Radio-Electronic Equipment. Tom 2: Electronic Warfare Systems]*. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2010. 352 p. (in Russian).

20. Lenshin A. V. *Bortovye sistemy i kompleksy radioelektronnogo podavleniia* [Onboard systems and complexes of radio-electronic suppression]. Voronezh, Nauchnaia Kniga Publ., 2014. 590 p. (in Russian).
21. Rjabov K. Proekt Raytheon PHASER: fantasticheskoe oruzhie v opytnej jekspluatacii [Project Raytheon PHASER: a fantastic weapon in experimental operation]. *Voennoe obozrenie* [Military review], 30 September 2019. Available at: <https://topwar.ru/162882-proekt-raytheon-phaser-fantastika-v-opytnej-jekspluatacii.html> (accessed 10 June 2020) (in Russian).
22. Mizokami K. The Army's Real-Life "Phaser" Would Knock Out an Entire Drone Swarm With One Shot. *Popular Mechanics*, 14 November 2016. Available at: <https://www.popularmechanics.com/military/weapons/a23881/the-army-is-testing-a-real-life-phaser-weapon/> (accessed 10 June 2020).
23. Rjabov K. «Ranec» protiv raket ["Pack" against missiles]. *Voennoe obozrenie* [Military review], 18 April 2012. Available at: <https://topwar.ru/13539-ranec-protiv-raket.html> (accessed 10 June 2020) (in Russian).
24. Boevoy JeMI-generator "Ranec-E" [Combat EMI generator "Pack-E"]. *Oko planety*, 04 April 2012. Available at: <https://oko-planet.su/politik/politikarm/110924-boevoy-emi-generator-ranec-e-rossiya.html> (accessed 10 June 2020) (in Russian).
25. Jurkov N. K., Gorjachev N. V., Kuzina E. A. Sposob dvuhfaktornogo funkcional'nogo podavlenija bespilotnogo letatel'nogo apparata [Method of two-factor functional suppression of an unmanned aerial vehicle]. Patent of Russia no. RU 2700206 C1, 13 September 2019. (in Russian).
26. Jurkov N. K., Gorjachev N. V., Kuzina E. A. Sposob funkcional'nogo podavlenija bespilotnogo letatel'nogo apparata [Method of functional suppression of an unmanned aerial vehicle]. Patent of Russia no. 13 September 2019. (in Russian).
27. Zhang D., Zhou X., Cheng E., Wan H., Chen Y. Investigation on Effects of HPM Pulse on UAV's Datalink. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2020, vol. 62, no. 3, pp. 829-839.
28. Shukun G., Erwei C., Yazhou C., Yuming W. Research on ultra-wideband electromagnetic pulse irradiation effect and protection method of Unmanned Aerial Vehicle. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1325, no. 1, pp. 012165. doi: 10.1088/1742-6596/1325/1/012165.
29. Sakharov K. Yu., Sukhov A. V., Ugolev V. L., Gurevich Yu. M. Study of UWB Electromagnetic Pulse Impact on Commercial Unmanned Aerial Vehicle. *Proceedings of the 2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2018)*, Amsterdam, The Netherlands, August 27 - 30, 2018.
30. Iasechko M. N., Vorobyov O. M. Recommendations from technical realization of cylindrical channel forming a phased arrays from V-vivid distributions of frequencies on aperture for facilities of functional defeat of unmanned aerial vehicles. *Information Processing Systems*, 2013, vol. 111, no. 4, pp. 48-51 (in Russian).
31. Iasechko M. N., Maksyuta D. V., Dzigora A. M. Rationale for selecting cylindrical phased array flows functional damage radio-electronic equipment. *Information Processing Systems*, 2014, vol. 37, no. 1, pp. 251-253 (in Russian).

32. Iasechko M. N., Ochkurenko A. V., Kovalchuk A. A., Maksyuta D. V. Modern electronic means of dealing with unmanned aircraft in the zone of the ATO. *Scientific Works of Kharkiv National Air Force University*, 2015, vol. 44, no. 3, pp. 54-57 (in Russian).

33. Gomofov A. V., Greckih D. V., Demchenko A. V., Cikalovskij N. M. Sredstva funkcional'nogo podavlenija radioelektronnyh sredstv malorazmernyh bespilotnyh letatel'nyh apparatov s fokusirovkoj jelektromagnitnogo izluchenija [Means of functional suppression of radio electronic means of small-sized unmanned aerial vehicles with electromagnetic radiation focusing]. *Space Technology. Missile Armaments*, 2018, vol. 115, no. 1, pp. 13-19 (in Russian).

34. Maritime Laser destroys target boat in at-sea test. *optics.org*, 11 April 2016. Available at: <https://optics.org/news/2/4/15> (accessed 20 June 2020).

35. Vladimirov V. A., Lebedev A. V. Analiz sostojanija i tendencij razvitija sovremennyh vidov oruzhija [Analysis of the state and trends in the development of modern weapons]. *Strategiia grazhdanskoi zashchity: problemy i issledovaniia*, 2012, no. 2, pp. 61-80 (in Russian).

36. Sysuev S., Umerenkov S., Ignatov A., Akat'ev S. Boevye lazery: sostojanie, perspektivy [Combat lasers: status, prospects]. *Armejskij sbornik*, 02 April 2020. Available at: <https://army.ric.mil.ru/Stati/item/253471/> (accessed 20 June 2020) (in Russian).

37. Mitrofanov A. Lazernoe oruzhie: suhoputnye vojska i PVO. Chast' 3 [Laser weapon: ground forces and air defense. Part 3]. *Voennoe obozrenie*, 19 Mach 2019. Available at: <https://topwar.ru/155508-lazernoe-oruzhie-suhoputnye-vojska-i-pvo-chast-3.html> (accessed 20 June 2020) (in Russian).

38. Fedorov E. Vojna s dronami. Saudovskij goliaf protiv husitov [War with drones. Saudi Goliath against the Houthis]. *Voennoe obozrenie*, 28 Semptember 2019. Available at: <https://topwar.ru/162842-vojna-s-dronami-saudovskij-goliaf-protiv-husitov.html> (accessed 20 June 2020) (in Russian).

39. Rjabov K. Novosti proekta CBARS (SShA) [CBARS project news (USA)]. *Voennoe obozrenie*, 2016. Available at: <https://topwar.ru/91693-novosti-proekta-cbars-ssha.html> (accessed 20 June 2020) (in Russian).

40. Laser Weapon System (LaWS). *YouTube*, 08 April 2013. Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=OmoldX1wKYQ&feature=youtu.be> (accessed 19 January 2017).

41. SShA namereny osnashhat' voennye korabli lazernym oruzhiem [The US intends to equip warships with laser weapons]. *RIA Novosti*, 2013. Available at: <https://ria.ru/world/20130409/931642.html> (accessed 20 June 2020) (in Russian).

42. VMS SShA vooruzhilis' lazernoj pushkoj, chtoby sbivat' drony, soobshhajut SMI [The US Navy armed itself with a laser gun to shoot down drones, according to media reports]. *RIA Novosti*, 18 November 2014. Available at: https://ria.ru/defense_safety/20141118/1033980337.html (accessed 20 June 2020) (in Russian).

43. Area Defense Anti-Munitions (ADAM). *Lockheed Martin*, 2012. Available at: <http://www.lockheedmartin.com/us/products/ADAM.html> (accessed 20 June 2020).

44. Lockheed Martin Demonstrates New Ground-Based Laser System in Tests Against Rockets and Unmanned Aerial System. *Lockheed Martin*, 27 November 2012. Available at: <http://www.lockheedmartin.com/us/news/pressreleases/2012/november/1127-ss-adam.html> (accessed 20 June 2020).

45. Proekt Boeing CLWS. Lazernaja PVO dlja Pentagona [The Boeing CLWS project. Laser air defense for the Pentagon]. *Voennoe obozrenie*, 24 June 2019. Available at: <https://topwar.ru/159300-proekt-boeing-clws-lazernaja-pvo-dlja-pentagona.html> (accessed 20 June 2020).

46. Nastojashhee i budushhee bespilotnoj aviicii. Chast' 1 [The present and future of unmanned aviation. Part 1]. *Voennoe obozrenie*, 25 January 2016. Available at: <https://topwar.ru/89642-nastoyashee-i-budushee-bespilotnoj-aviicii-chast-1.html> (accessed 20 June 2020).

47. Armija SShA provela ispytaniya nazemnogo boevogo lazera protiv vozdushnyh celej [The US army has tested a ground combat laser against air targets]. *Nezavisimoe voennoe obozrenie*, 13 December 2013. Available at: <http://nvo.ng.ru/news/452359.html> (accessed 20 June 2020).

48. Excalibur Prototype Extends Reach of High-Energy Lasers. *DARPA*, 03 June 2014. Available at: <http://www.darpa.mil/news-events/2014-03-06> (accessed 20 June 2020).

49. O bor'be s bespilotnymi letatel'nymi apparatami [About the fight against unmanned aerial vehicles]. *Voennoe obozrenie*, 18 July 2016. Available at: <https://topwar.ru/98134-o-borbe-s-bespilotnymi-letatel'nymi-apparatami.html> (accessed 20 June 2020).

50. Rostopchin V. V. Udarnye bespilotnye letatel'nye apparaty i protivovozdushnaja oborona – problemy i perspektivy protivostojaniya. [Strike unmanned aerial vehicles and air defense-problems and prospects of confrontation]. *Bespilotnaya aviaciya* [Unmanned aircraft], 2019. Available at: https://www.researchgate.net/publication/331772628_Udarnye_bespilotnye_letatelnye_apparaty_i_protivovozdusnaa_oborona_-_problemy_i_perspektivy_protivostojaniya (accessed 20 may 2019).

Статья поступила 8 июля 2020 г.

Информация об авторе

Макаренко Сергей Иванович – доктор технических наук, доцент. Ведущий научный сотрудник. Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН. Профессор кафедры информационной безопасности. Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина). Область научных интересов: сети и системы связи; радиоэлектронная борьба; информационное противоборство. E-mail: mak-serg@yandex.ru

Адрес: 199178, Россия, Санкт-Петербург, 14 линия, д. 39.

Counter Unmanned Aerial Vehicles. Part 4. Functional Destroying with Microwave and Laser Weapons

S. I. Makarenko

Relevance. There have been reports of unauthorized use of unmanned aerial vehicles (UAVs) in highly controlled areas (airports, military installations, against critical industrial infrastructure) in the media since the mid-2000s. Nowadays, small UAVs are widely used for unauthorized surveillance of important objects, conducting terrorist attacks and sabotage, carrying prohibited goods (weapons, drugs), as well as for military purposes. For this reason, the problem of countering UAVs, and especially small UAVs, has become extremely relevant. Analysis of publications in this area has shown a small number of serious studies on this topic. There are often too optimistic conclusions about the effectiveness of existing electronic warfare (EW) systems for countering all types of UAVs in many papers. However, the problem of countering UAVs, and especially small UAVs, is highly complex, multi-faceted, and has not been solved yet. **The purpose of this paper** is to systematize and analyze various ways and means of countering UAVs, as well as to form general directions for effective solution of the problem. The material is presented in the paper focuses on the analysis of the capabilities such EW-systems as microwave and laser weapons. **Results.** The results of systematization and analysis of various means of countering UAVs, which are based on microwave and laser weapons, are presented in the article. The analysis of the sources show the main features of the UAV as an object of functional destroying, and made possible a detailed multi-aspect analysis of modern with microwave and laser weapons, their effectiveness and disadvantage and effects that appeared because of impact microwave and laser rays at UAVs. **Elements of the novelty of the paper** are the general features of the functional destroying of UAVs with microwave and laser weapons, as well as advantage and disadvantage the weapons when they are used against UAVs. **Practical significance.** The material of the paper can be used to generate initial data for modeling and studying the combat effectiveness of the microwave and laser weapons when countering UAVs. This article can be useful for designers who design countering UAV systems as well.

Key words: Unmanned Aerial Vehicle, UAV, Counter Unmanned Aerial Vehicles, C-UAV, C-UAS, Anti-UAV Defense System, Counter-Drone Systems, Anti-Drone Technologies, Counter-UAVs Technologies, electronic warfare, microwave weapon, laser weapon.

Information about Author

Sergey Ivanovich Makarenko – Dr. habil. of Engineering Sciences, Docent. Leading Researcher. St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences. Professor of Information Security Department. Saint Petersburg Electrotechnical University 'LETI'. Field of research: stability of network against the purposeful destabilizing factors; electronic warfare; information struggle. E-mail: mak-serg@yandex.ru

Address: Russia, 197376, Saint Petersburg, 14th Linia, 39.