УДК 621.391

Повышение устойчивости автоматизированной системы управления комплекса с беспилотными летательными аппаратами в условиях воздействия средств физического поражения и радиоэлектронного подавления

Иванов М. С., Афонин И. Е., Макаренко С. И.

Постановка задачи: неотъемлемой частью любого современного конфликта является применение беспилотных летательных аппаратов (БЛА), которые решают задачи разведки, целеуказания, уничтожения противника и т.д. В отличии от пилотируемой авиации, при применении БЛА остро стоит вопрос сохранения управляемости БЛА, и как следствие повышения устойчивости автоматизированной системы управления (АСУ) комплекса с БЛА при применении противником средств как физического поражения ($\Phi\Pi$), так и радиоэлектронного подавления ($P\Pi$). Поражение БЛА физическими средствами или подавление канала их управления приведет к невыполнению целевого задания или к потере самого БЛА, поэтому вопрос повышения устойчивости АСУ комплекса с БЛА является актуальной задачей. **Цель работы:** формирование предложений по повышению устойчивости АСУ комплекса с БЛА в условиях применения противником средств ФП и РЭП. Ре- ${\it зультат:}$ разработаны предложения по повышению устойчивости ACV комплекса с ${\it БЛA}$ на основе применения ранее разработанных авторских методик. Формализация этих предложений показала, что формирование множества маршрутов полетов БЛА и ранжирование их по степени устойчивости управления, с учетом фактора потенциальной потери БЛА при применении противником средств ФП и РЭП позволит обеспечить устойчивость управления БЛА со стороны АСУ за счет построения маршрута в обход зон тактического превосходства противника. Практическая значимость: представленный подход может быть использован для обоснования решений, направленных на повышение устойчивости как АСУ комплекса с БЛА, так и других АСУ военного назначения, элементы которого подвергаются физическому огневому поражению и радиоэлектронному подавлению каналов управления.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, военная авиация, управление летательными аппаратами, маршрутное управление.

Введение

Анализ опыта применения беспилотных летательных аппаратов (БЛА) малого и среднего класса в последних локальных военных конфликтах [1], а также опыт применения БЛА в операции Воздушно-космических сил (ВКС) РФ в Сирии показал, что на БЛА преимущественно возлагаются задачи воздушной разведки в тех районах театра военных действий (ТВД), где применение пилотируемой авиации неоправданно или нецелесообразно, в виду высокой вероятности поражения пилотируемых летательных аппаратов (ЛА). Основными угрозами для БЛА на современном ТВД, является возможность их поражения

Библиографическая ссылка на статью:

Иванов М. С., Афонин И. Е., Макаренко С. И. Повышение устойчивости автоматизированной системы управления комплекса с беспилотными летательными аппаратами в условиях воздействия средств физического поражения и радиоэлектронного подавления // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 2. С. 92-134. DOI: 10.24412/2410-9916-2022-2-92-134

Reference for citation:

Ivanov M. S., Afonin I. E., Makarenko S. I. Increasing stability of the control system of unmanned aerial vehicles in the conditions of fire damage and electronic warfare. *Systems of Control, Communication and Security*, 2022, no. 2, pp. 92-134 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2022-2-92-134

DOI: 10.24412/2410-9916-2022-2-92-134

зенитно-ракетными комплексами (ЗРК) противовоздушной обороны (ПВО) — физическое поражение (ФП), а также подавление командной радиолинии управления (КРУ) БЛА средствами радиоэлектронного подавления (РЭП). В качестве типовых средств противодействия разведывательным БЛА на ТВД можно рассматривать: ЗРК Patriot PAC-3, ЗРК М1097 Avenger, зенитно-артиллерийскую систему (ЗАС) Centurion C-RAM, комплекс РЭП AN/MLQ-40 Prophet [2-6].

Анализ известных работ и технологических решений [1, 2, 7-15] показал, что в подавляющем числе работ живучесть БЛА в условиях применения по ним средств ФП и помехоустойчивость КРУ БЛА в условиях применения средств РЭП рассматриваются без учета возможностей пространственного маневра БЛА с целью обхода зон ФП и РЭП. В данных работах не рассматриваются, а в существующих комплексах управления БЛА не учитываются, возможности по заблаговременному формированию «бесполетных» зон, в которых вероятность поражения средствами ФП выше безопасного значения, а также формирования таких маршрутов полета БЛА, которые обеспечивают требуемый уровень устойчивости управления по КРУ «пункт управления (ПУ) – БЛА» в том числе в условиях воздействия средств РЭП. Эффективные технологические решения для автоматизированных систем управления (АСУ) БЛА, направленные на обход зон ФП и РЭП, в настоящее время отсутствуют. Вместе с тем, по мнению генерального конструктора РФ по системам и комплексам разведки, дозора и управления авиационного базирования и комплексам с БЛА члена-корреспондента РАН В.С. Вербы [16], именно пространственная маневренность и скрытность БЛА, должна быть положена в основу их гибкого боевого применения, а живучесть БЛА должна достигаться в числе прочего и маршрутным маневром с целью обхода зон заведомого тактического преимущества противника.

Учитывая вышеуказанное, возможно сформулировать противоречие между необходимостью устойчивого управления БЛА на ТВД оборудованных средствами $\Phi\Pi$ и РЭП u нарушением процесса управления БЛА на маршрутах в зоне действия средств $\Phi\Pi$ и РЭП противника.

При формировании «бесполетных» зон и безопасных маршрутов полета БЛА, предлагается сосредоточиться именно на решении задач маршрутного управления БЛА, использовав в качестве исходных данных результаты известных работ в области оценки живучести БЛА в условиях применения против них ЗРК ПВО [1-6, 17, 18], а также результаты известных работ в области оценки помехозащищенности авиационных систем радиосвязи [2, 19]. В основу решения задачи формирования «бесполетных» зон [7] в которых достигается тактическое преимущество противника — зон ФП и РЭП, предлагается положить подходы, используемые в методах теории иерархической кластеризации и классификации [20, 21]. А в основу решения задачи формирования множества маршрутов [8, 17], проходящих в обход «бесполетных» зон, и обеспечивающих устойчивость управления по КРУ «ПУ — БЛА», предлагается положить подходы, посвященные совершенствованию протоколов маршрутизации в телекоммуникационных сетях [22-26]. Использование вышеуказанных известных теоритических подходов, в новой области, а именно — в области управления БЛА

DOI: 10.24412/2410-9916-2022-2-92-134

на ТВД в условиях применения средств ФП и РЭП, формирует основные признаки научной новизны полученных в научной работе результатов.

1. Анализ известных работ в исследуемой области

Общим проблемам управления авиацией посвящены работы научных школ академика РАН Е.А. Федосова [9, 10] и члена-корреспондента РАН, генерального конструктора РФ по системам и комплексам разведки, дозора и управления авиационного базирования и комплексам с беспилотными летательными аппаратами — В.С. Вербы [16, 27, 28]. Основам организации радиоуправления ЛА и БЛА посвящены работы научной школы В.Н. Меркулова [11, 29-32]. При этом, особенности управления БЛА рассматриваются в работах К.Л. Войткевича, А.А. Сулимы, П.А. Зац [33], С.И. Макаренко [34], А.Р. Гайдука, С.Г. Капустина, И.А. Каляева [35, 36], В.И. Меркулова и В.П. Харькова [11]. Как отмечается в данных работах, современной тенденцией развития систем управления ЛА и БЛА является их переход к сетецентрическим принципам. Особенности реализации данного сетецентрического принципа управления силами и средствами представлены в работах В.С. Вербы, С.С. Поливанова [28], Е.А. Кондратьева [37, 38], С.И. Макаренко [39, 40], А.Е. Богданова, С.А. Попова, М.С. Иванова [41].

Особенности реального управления и применения БЛА, в том числе и в условиях боевых действий подробно рассмотрены в работах: Н.Я. Василина [42], С.П. Мосова [3], Б.И. Казарьяна [12], В.И. Потапова, А.А. Нагорского [13], Г.П. Дремлюги, О.А. Завьялова [4], М.К. Казамбаева, Б.Ж. Куатова [14], Ю.М. Чернышева, А.И. Кального, Ф.А. Катунина [43], Э.П. Лукашева, А.А. Силкина, Н.В. Чистякова [44], Г.А. Мазулина [45], В.В. Ростопчина [46, 47], А.В. Полтавского [48, 49], С.В. Иванова [50, 51]. Опыт реального боевого применения БЛА, а также мнение ведущих специалистов по радиоуправлению – В.С. Вербы и В.Н. Меркулова [16, 29, 31, 32], показывает, что для управления БЛА первостепенное значение имеет обеспечение непрерывной устойчивой связи с ними, а также обход управляемыми БЛА районов тактического преимущества противника – зон ПВО и РЭП.

Вопросы оценки уязвимости БЛА к воздействию боевых факторов на ТВД, в том числе — анализ использования против БЛА средств ПВО и РЭП, подробно рассматриваются в работах С.И. Макаренко [1, 2], В.В. Ростопчина [47], П.В. Самойлова, К.А. Иванова [52], В.О. Егурнова, В.В. Ильина, М.И. Некрасова, В.Г. Сосунова [53], Д.В. Лопаткина, А.Ю. Савченко, Н.Г. Солохи [54], А.В. Ананьева, Г.А. Кащенко [55], О.Л. Арапова, Ю.С. Зуева [56], А.И. Годунова, С.В. Шишкова, Н.К. Юркова [57], Н.Н. Теодоровича, С.М. Строгановой, П.С. Абрамова [58], С.В. Краснова, С.Р. Малышева, В.А. Шишкова, А.М. Сазыкина [59], Н.В. Рощиной [60], Р.А. Белоуса, Ю.Г. Сизова, А.Л. Скокова [61], Г.В. Ерёмина, А.Д. Гаврилова, И.И. Назарчука [5], С.В. Иванова [50, 62]. Анализ данных работ показывает, что проблематика оценки уязвимости БЛА к воздействию боевых факторов ПВО и РЭП, является чрезвычайно актуальной и относительно новой, что подтверждается тем, что первые теоритические работы в этой области относятся к периоду не ранее 2012 г.

DOI: 10.24412/2410-9916-2022-2-92-134

Необходимо отметить, что в подавляющем числе вышеуказанных работ живучесть БЛА в условиях применения по ним ЗРК ПВО и помехоустойчивость КРУ БЛА в условиях применения средств РЭП рассматриваются без учета возможностей пространственного маневра БЛА с целью обхода зон ПВО и РЭП. В данных работах не рассматриваются, а в существующих комплексах управления БЛА не учитываются, возможности по заблаговременному формированию «бесполетных» зон, в которых вероятность поражения средствами ЗРК ПВО выше безопасного значения, а также формирования таких маршрутов полета БЛА, которые обеспечивают требуемый уровень устойчивости управления по КРУ «ПУ – БЛА» в том числе в условиях воздействия средств РЭП.

Необходимо отметить, что общий подход к маршрутному управлению БЛА с обходом опасных зон и препятствий, не является принципиально новым. В настоящее время, известны работы: В.Ю. Бережной, М.А. Леликова, В.А. Прозорова [63], И.А. Батраевой [64], Д.П. Тетерина [64, 65], В.Н. Ефанова, Л.М. Неугодниковой [66], Н.П. Зубова [67], И.А. Ивановой, В.В. Никонова, А.А. Царевой [68], А.Н. Козуба, Д.П. Кучерова [82], С.В. Иванова [15], в которых рассматриваются вопросы формирования маршрутов полета БЛА, в том числе с облетом препятствий, а также с учетом различного рода дестабилизирующих факторов, таких как неровности поверхности Земли, боковой ветер, условия городской застройки. Однако во всех вышеуказанных работах, за исключением работы [65], в качестве препятствий не рассматривались зоны противодействия полету БЛА со стороны противника. Ближайшем аналогом, решения задачи формирования маршрута полета БЛА в обход зон противодействия противника, решаемой в данной научной работе, является работа [65]. При этом задача формирования маршрута БЛА в обход зон противодействия противника в работе [65] ставиться не как задача маршрутизации, а как задача численного приближенного решения динамической системы дифференциальных уравнений, описывающих пространственное движение БЛА, при этом специфика средств ФП и РЭП в работе [65] не рассматривается.

Анализ ранее проведенных исследований в области организации воздушной разведки, а также исследований в области управления БЛА показал, что в известных работах были рассмотрены различные аспекты повышения эффективности управления ЛА и БЛА, в том числе с обходом опасных зон и препятствий. Однако, если в работах по управлению пилотируемых ЛА вопросы формирования маршрутов и профилей полета с обходом зон тактического преимущества противника рассмотрены достаточно подробно, то в работах посвященных управлению БЛА эти вопросы широко не исследованы, при том, что именно для БЛА эти вопросы гораздо более актуальны чем для пилотируемых ЛА в связи с тем, что система управления его полетом удалена от него на десятки километров, а сам БЛА в условиях подавления КРУ имеет низкий уровень автономности принятия решения о направлении дальнейшего полета.

2. Основные задачи БЛА на театре военных действий

Анализ работ [1, 2, 6, 44-49, 69] позволил обобщить опыт применения БЛА малого и среднего класса в последних локальных военных конфликтах, а

DOI: 10.24412/2410-9916-2022-2-92-134

также опыт применения БЛА в операции ВКС РФ в Сирии. Данный анализ показал, что БЛА преимущественно применяются для решения задач разведывательно-информационного обеспечения (РИО). На БЛА возлагаются основные задачи воздушной разведки в тех районах ТВД где применение пилотируемой авиации неоправданно или нецелесообразно в виду высокой вероятности поражения пилотируемых ЛА.

Отдельно следует отметить, что в настоящее время в России предпринимаются значительные усилия по созданию не только исключительно разведывательных, но и тяжелых разведывательно-ударных и ударных БЛА подобных БЛА МQ-9 Reaper и MQ-1 Predator, широко применяемых в ВС США. Однако, как показывает анализ российских разработок разведывательно-ударных и ударных БЛА [70, 71], таких как «Иноходец» (разработчик — ООО «Кронштадт»), «Альтаир» (разработчик — казанское ОКБ «Сокол» им. М.П. Симонова), «Охотник» и «Скат» (разработчик — кооперация РСК «МиГ» и ОКБ Сухого), первые из этих БЛА начнут поступать на вооружение только после продолжительного периода опытной эксплуатации и доработки, поэтому в связи отсутствием какого-либо опыта боевого применения этих отечественных разведывательно-ударных и ударных БЛА в военных конфликтах в дальнейшем БЛА такого типа в данной работе не рассматриваются.

3. Особенности управления БЛА

Как показывает анализ современных работ в области организации боевого управления авиацией [9, 16, 29, 31, 32, 72, 73] существует два основных способа управления пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов (ЛА):

- управление с наземного пункта управления (ПУ);
- управление с воздушного ПУ.

При этом, управление с наземных ПУ (НазПУ) осуществляется при наличии развернутой наземной инфраструктуры управления, как правило, на территории Российской Федерации или дружественных стран. При необходимости проведения военных операций в других странах, в которых наземная инфраструктура управления отсутствует, основным способом управления авиацией становится управление с воздушного ПУ (ВозПУ).

В настоящее время большинство задач управления БЛА ввиду их высокой сложности и многофакторности автоматизированы. Для управления БЛА, как правило, используется АСУ функционирующая под контролем человекаоператора. Оператор БЛА и АСУ размещается на ПУ и обеспечивают решение задач управления БЛА. Для управления наведением БЛА на объекты в АСУ закладывается совокупность алгоритмов, реализующих методы маршрутного управления БЛА и их наведения на объекты разведки. Методы наведения групп БЛА реализуются посредством управления операторами БЛА-командиров групп, которые взаимодействуют с ведомыми БЛА группы посредством передачи телекодовой информации (ТКИ). Использование ТКИ в режиме автоматизированного управления БЛА с АСУ требует наличие автоматического управления режимами работы бортовых средств разведки, автономных бортовых алгоритмов обнаружения, распознавания и оценки маневров мобильных целей и

DOI: 10.24412/2410-9916-2022-2-92-134

объектов, а также оценивания направлений их маневра. Кроме того, необходимость надежного сопровождения объектов разведки приводит к необходимости принятия мер по расширению диапазона скоростей и ускорений БЛА, более устойчивой работы их систем распознавания и сопровождения целей в составе разведывательного оборудования, а также уменьшению временных интервалов передачи команд управления с АСУ на БЛА.

Как показал опыт боевого применения БЛА в локальных войнах [74] при управлении БЛА необходимо учитывать зоны ФП противника и возможности применения им средств РЭП. Одним из способов устранения данных угроз является использование метода обхода этих зон тактического превосходства противника. Суть этого метода состоит в заблаговременном выделении и обходе областей пространства, в которых ЛА могут быть обнаружены средствами поражения противника, превосходящего по летно-техническим характеристикам самолетов или оружия [16].

Перспективным, но достаточно сложным приемом повышения эффективности наведения БЛА является использование метода смешанного наведения, базирующегося как на командах, поступающих от ПУ, так и на сигналах управления, формируемых на самом наводимом БЛА с использованием своих средств разведки. Сложность такого приема состоит в необходимости применения универсального метода наведения, инвариантного к пространственному положению источников информации.

4. Формирование полетных зон БЛА по степени устойчивости управления

Как показал анализ [2, 18] в качестве дестабилизирующих факторов, угрожающих нарушению управления БЛА на ТВД можно рассматривать:

- фактор применения противником средств ФП ориентированных на поражение АСУ и их БЛА и тем самым уничтожения самого объекта управления;
- фактор применения противником средств РЭП, ориентированный на подавление КРУ БЛА и тем самым нарушение гарантированного доведения до управляемого БЛА управляющих команд.

Данные факторы могут быть формализованы через соответствующие показатели – вероятность поражения БЛА средствами ФП ($P_{\text{пор}}$) и вероятность подавления КРУ БЛА средствами РЭП ($P_{\text{под}}$). Предметом данной работы не является разработка методик определения $P_{\text{пор}}$ и $P_{\text{под}}$, для определения этих вероятностей можно использовать известные работы в области оценки живучести БЛА в условиях применения против них ЗРК ПВО [5, 47, 54, 56], а также результаты известных работ в области оценки помехозащищенности авиационных систем радиосвязи [47, 75-78].

Отметим, что в настоящее время средства АСУ комплекса с БЛА при формировании маршрута полета не учитывают зоны ФП и РЭП. В этом случае при выполнении задач воздушной разведки маршрут БЛА будет проложен по прямому пути между аэродромом базирования БЛА и целью разведки. Однако в этом случае существует определенная возможность, что на отдельных участках

DOI: 10.24412/2410-9916-2022-2-92-134

Systems of Control, Communication and Security

маршрута БЛА может быть поражен средствами ФП или лишиться управления, вследствие подавления средствами РЭП линии КРУ. Пример такой ситуации представлен на рис. 1.

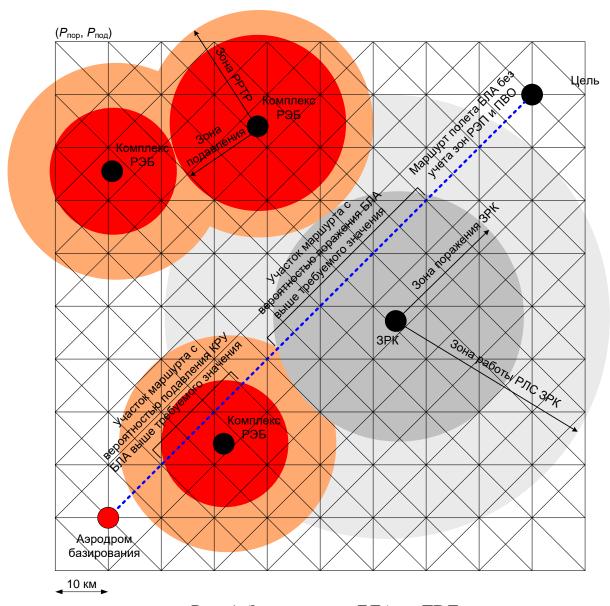


Рис. 1. Зона полетов БЛА на ТВД

Для формального представления зоны выполнения боевой задачи БЛА (рис. 2) ниже представлена геотопологическая модель зоны полетов (рис. 2), покрывающая соответствующую область ТВД [79]. Масштаб и дискретность сетки геотопологической модели выбираются исходя из практики управления полетом БЛА и из возможностей вычислительных средств ПУ. Обычно шаг дискретизации линий сетки составляет 5 или 10 км.

DOI: 10.24412/2410-9916-2022-2-92-134

98

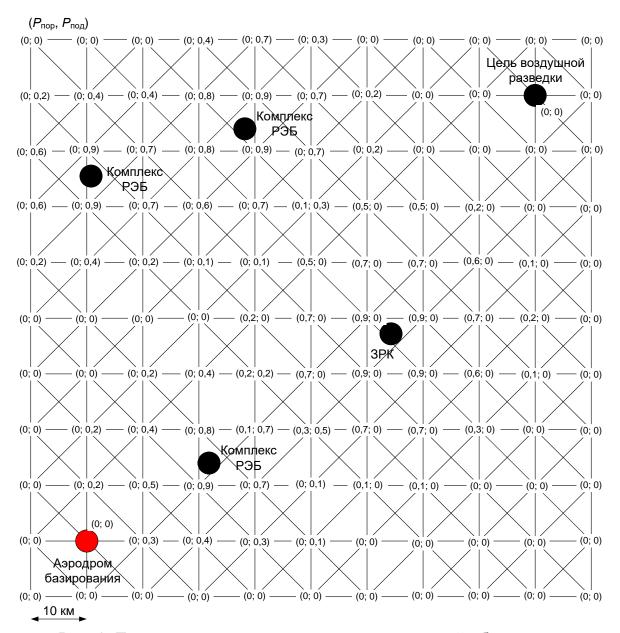


Рис. 2. Геотопологическая модель для тактической обстановки приведённой на рис. 1

Пересечения линий сетки геотопологической модели формируют узлы графа. Каждому u-му узлу этого графа сопоставляется пара значений $(P_{\text{пор}\,u}, P_{\text{под}\,u})$, которые определяют вероятность физического поражения БЛА $(P_{\text{пор}\,u})$ и вероятность подавления его КРУ средствами РЭП $(P_{\text{под}\,u})$ при его нахождении в месте координаты которого совпадают с месторасположением u-го узла [79]. Пример формирования значений $(P_{\text{пор}\,u}, P_{\text{под}\,u})$ для тактической обстановки, приведённой на рис. 1 представлен на рис. 2.

Сформированная таким образом геотопологическая модель, будет являться формализованной основой на которой будут формироваться «бесполетные зоны» в которых вероятность физического поражения БЛА выше критического значения, а также маршруты полета в обход этих зон с учетом минимизации подавления КРУ БЛА средствами РЭП.

DOI: 10.24412/2410-9916-2022-2-92-134

— 99

В [7] представлено решение задачи кластеризации полетных зон БЛА в виде соответствующей методики, которая с помощью метода определения сильносвязных областей графа из теории графов и алгоритма иерархической кластеризации Ланса-Вильямса из теории кластеризации позволяет разложить исходный граф G, соответствующий геотопологической модели зоны полетов БЛА на ТВД, на связный граф G^* и изолированные в результате воздействия деструктивных факторов (ДФ) множество узлов $Y_{\Pi BO}$ и $Y_{P \ni \Pi}$. А, в свою очередь, связный граф G^{**} — на области, подвергшиеся физическому воздействию (например, ПВО) и РЭП ($R_{\Pi BO}$ и $R_{P \ni \Pi}$), и область G^{**} не подвергшуюся воздействию этих средств и являются предпочтительной для формирования в ней маршрутов полета БЛА (рис. 3).

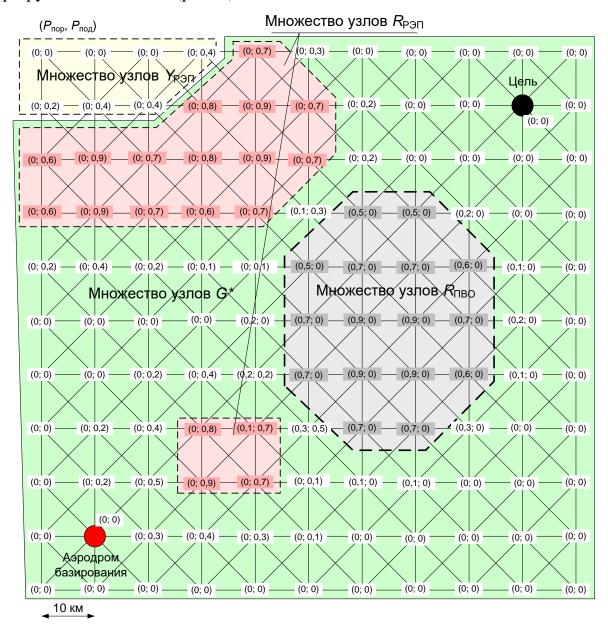


Рис. 3. Пример сформированных множеств G^* , R_1 , R_2 и Y_2 для графа геотопологической модели зоны полетов БЛА на ТВД

DOI: 10.24412/2410-9916-2022-2-92-134

100

Таким образом представленная в [7] методика позволяет автоматически на основе геотопологической модели зоны полетов БЛА на ТВД и известном местоположении комплексов РЭП и ЗРК ПВО формировать «бесполетные» зоны в которых высока вероятность поражения БЛА и зоны нарушения управления вследствие воздействия средств РЭП.

Элементами новизны данной методики, отличающих ее от известных работ в области формирования маршрутов полетов БЛА [15, 63-67], а также от известных работ в области кластеризации [80], является учет в качестве препятствий для полета БЛА двух типов дестабилизирующих воздействий — физического воздействия (ПВО) и воздействие средств РЭП, которые формализуются в виде интегральной метрики узлов графа геотопологической модели зоны полетов на ТВД, при этом для формирования «бесполетных» зон, в которых высока вероятность поражения БЛА и зон нарушения управления вследствие воздействия средств РЭП на КРУ БЛА используется математический алгоритм иерархический кластеризации Ланса-Вильямса, а проверка связности маршрутной сети основана на методе определения сильносвязных областей графа [81].

5. Формирование множества маршрутов полета БЛА с учетом месторасположения средств ФП и РЭП

Одним из решений, направленных на обеспечение устойчивости управления БЛА на ТВД, является формирование маршрутов полета в обход «бесполетных» зон в которых высока вероятность физического поражения БЛА и зон нарушения управления вследствие воздействия средств РЭП. Рассмотренная в предыдущем разделе методика позволяет сформировать на геотопологической модели эти зоны. Методика, представленная в данном подразделе, решает задачу формирования множества маршрутов полетов БЛА на ТВД в обход «бесполетных» зон, где БЛА может быть поражен средствами ПВО, с ранжированием маршрутов по степени устойчивости управления, тем самым учитывая фактор потенциальной потери управления при воздействии на КРУ средств РЭП [8]. При этом если зоны ФП полностью исключается из рассмотрения при формировании маршрутов БЛА, то зоны РЭП могут быть использованный для формирования маршрутов, но при этом выбирается такой маршрут полета БЛА на котором суммарное значение вероятности подавления КРУ минимальное. Таким образом, этот маршрут соответствует пути полета с максимальной устойчивостью управления БЛА. Данная методика достаточно подробно описана в работах [8, 17], поэтому ниже представлены только ее основные положения и выводы.

Формирование множества маршрутов полетов БЛА на ТВД в обход «бесполетных» зон основывается на модификации алгоритма Дейкстры [23] в который дополнительно вносятся изменения, направленные на расширение его функциональности связанной с возможностью формирования нескольких путей, ранжированных по степени повышения метрики. Основой предлагаемой модификации алгоритма Дейкстры являются следующие положения, ранее предложенные в работах [22, 23].

DOI: 10.24412/2410-9916-2022-2-92-134

- 1) При достижении очередного узла геотопологической модели запоминаются исходящие узлы входящих в этот узел ребер, как потенциальные элементы будущих дополнительных маршрутов к этому узлу.
- 2) При очередном шаге функционирования методики достигнутый очередной узел геотопологической модели проверяется как потенциальный элемент дополнительного маршрута для всех уже достигнутых узлов. Если он является потенциальным элементом дополнительного пути, формируется дополнительный путь к ранее достигнутому узлу через только что достигнутый узел.
- 3) Если к ранее достигнутому узлу геотопологической модели уже были сформированы дополнительные маршруты, и он участвует в создании нового дополнительного маршрута к очередному узлу, то к очередному узлу формируется множество дополнительных маршрутов с включением в них всех возможных вариантов дополнительных маршрутов, сформированных ранее. Причем, если в дополнительный маршрут входит сам очередной узел геотопологической модели, то такой маршрут, во избежание циклов в дополнительные не включается.
- 4) Все дополнительные маршруты к узлам геотопологической модели упорядочиваются в соответствии с минимизацией их весов и вносятся в таблицу маршрутов полета, одновременно с кратчайшим маршрутом. При невозможности полета БЛА по кратчайшему маршруту, система управления БЛА выбирает дополнительный путь с минимальной суммарной метрикой, не содержащей узлы, полет по которым невозможен.

Схема методики формирования маршрутов полета БЛА с учетом месторасположения средств ПВО и РЭП приведена на рис. 4 по материалам работ [8, 17].

Представленная методика позволяет автоматически на основе геотопологической модели зоны полетов БЛА на ТВД и известных «бесполетных» зон в которых высока вероятность поражения БЛА средствами ПВО формировать множество маршрутов полетов БЛА с ранжированием маршрутов по степени устойчивости управления, тем самым учитывая фактор потенциальной потери управления при воздействии на КРУ БЛА средств РЭП. При этом зоны ФП полностью исключается из рассмотрения при формировании маршрутов БЛА, путем усечения графа геотопологической модели зоны полетов, а зоны РЭП используются для формирования маршрутов, но при этом выбирается такой маршрут полета БЛА на котором суммарное значение вероятности подавления КРУ минимальное. Таким образом, этот маршрут соответствует пути полета с максимальной устойчивостью управления БЛА.

DOI: 10.24412/2410-9916-2022-2-92-134

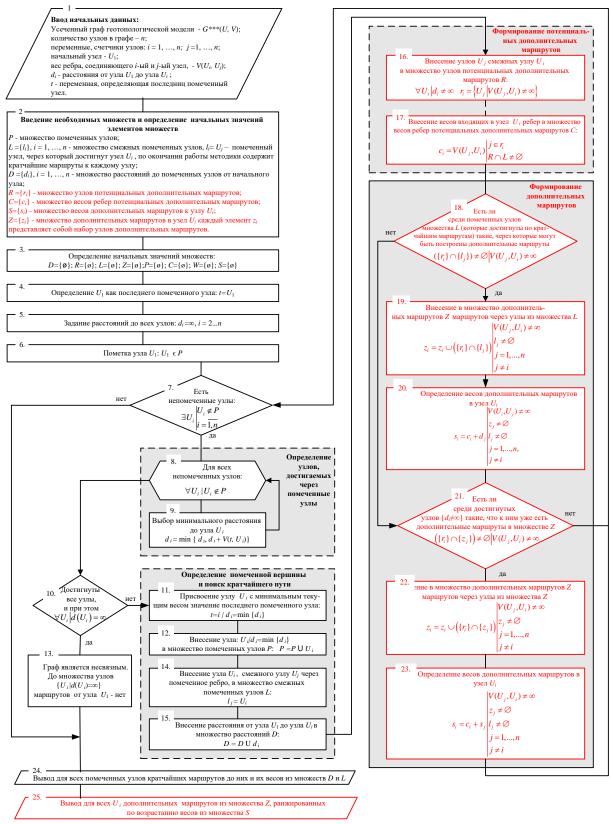


Рис. 4. Схема методики формирования маршрутов полета БЛА с учетом месторасположения средств ФП и РЭП

Элементами новизны данной методики, которые отличают ее как от известного алгоритма Дейкстры [81], так и от других теоритических решений в области формирования маршрутов полета БЛА с обходом препятствий и опас-

DOI: 10.24412/2410-9916-2022-2-92-134

ных зон, представленных в работах [15, 63-68, 82], является то, что в состав нее введены дополнительные операции позволяющие формировать помимо кратчайшего маршрута еще и упорядоченное множество дополнительных маршрутов полета, которые формируются в обход зон ФП и ранжируются по уровню устойчивости управления БЛА на маршруте, который, в свою очередь, оценивается вновь введенным показателем качества маршрута — суммарной вероятностью подавления КРУ БЛА на маршруте.

На основе этой методики [8, 17] возможно сформировать маршруты полета БЛА в обход «бесполетных» зон ФП и зон нарушения управления вследствие воздействия средств РЭП. Однако для оценки прироста эффективности управления БЛА при переходе от существующего к предлагаемому к новому принципу формирования маршрутов БЛА необходимо оценить уровень повышения одного из ключевых показателей АСУ комплекса с БЛА – устойчивости маршрутного управления БЛА в условиях применения средств ФП и РЭП. Оценка данного показателя представлено в следующем разделе.

6. Оценка устойчивости маршрутного управления БЛА в условиях применения средств ФП и РЭП

Для объективного сравнения качества маршрутов полета БЛА формируемых на основе существующих и предлагаемым в данной работе принципам, необходимо в формальном виде учесть два фактора воздействующих на БЛА воздушной разведки при его боевом применении на ТВД:

- фактор применения против БЛА средств ФП ориентированных на поражение БЛА и тем самым уничтожения самого объекта управления;
- фактор применения против БЛА противником средств РЭП ориентированных на подавление КРУ БЛА и тем самым нарушение гарантированного доведения до управляемого БЛА управляющих команд.

Данные факторы могут быть формализованы через соответствующие показатели – вероятность поражения БЛА средствами $\Phi\Pi$ ($P_{\text{пор}}$) и вероятности подавления КРУ БЛА средствами РЭП ($P_{\text{пол}}$). Нашей задачей не является определение $P_{\text{пор}}$ и $P_{\text{под}}$. Для определения этих вероятностей можно использовать известные работы в области оценки живучести БЛА в условиях применения против них ЗРК ПВО [2, 5, 47, 54, 56], а также результаты известных работ в области оценки помехозащищенности авиационных систем радиосвязи [2, 47, 75-78]. Нашей задачей является определение устойчивости маршрутного управления БЛА по известным значениям $P_{\text{пор}}$ и $P_{\text{пор}}$ в отдельных точках маршрута. В качестве показателя устойчивости маршрутного управления БЛА предлагается использовать вероятность устойчивости маршрутного управления БЛА $P_{\rm y}$ с учетом вероятности поражения БЛА средствами ФП $P_{\rm nop}$ и вероятности подавления КРУ БЛА средствами РЭП $P_{\text{пол}}$ в ключевых точках маршрута. В качестве ключевых точек маршрута предлагается использовать узлы геотопологической модели полетных зон на ТВД. За основу оценки показателя устойчивости маршрутного управления БЛА возьмем работу [83], посвященную оценки устойчивости сети связи.

DOI: 10.24412/2410-9916-2022-2-92-134

В каждой v-ой точке маршрута (узловой точке геотопологической модели зоны полета БЛА на ТВД) вероятность успешного сохранения управления вследствие не поражения БЛА средствами ФП и не подавления КРУ БЛА средствами РЭП, будет определяться как:

$$P_{\text{ymp }\nu} = \left(1 - P_{\text{nop }\nu}\right) \left(1 - P_{\text{nog }\nu}\right),\tag{1}$$

где: $P_{\text{упр v}}$ — вероятность успешного сохранения управления БЛА в v-ой точке маршрута; $P_{\text{пор v}}$ — вероятность поражения БЛА средствами ФП в v-ой точке маршрута; $P_{\text{под v}}$ — вероятность нарушения управления БЛА вследствие подавления КРУ БЛА средствами РЭП в v-ой точке маршрута.

Тогда на одиночном маршруте из n маршрутных точек (узловых точек геотопологической модели зоны полета БЛА на ТВД) вероятность устойчивого управления БЛА $P_{\rm V\,1}$ будет определяться вероятностью успешного сохранения управления во всех ν -х маршрутных точках:

$$P_{y_1} = 1 - P_{\overline{y}_1} = 1 - \left(1 - \prod_{\nu=1}^{n} \left(\left(1 - P_{\text{nop}\,\nu}\right) \left(1 - P_{\text{nog}\,\nu}\right) \right)\right). \tag{2}$$

где: $P_{\overline{y}_1}$ — вероятность нарушения управления БЛА в любой из v маршрутных точках.

Если для проведения воздушной разведки формируется несколько маршрутов от аэродрома базирования до объекта воздушной разведки, то вероятность устойчивости управления БЛА на основном маршруте и на k дополнительных маршрутах $P_{\text{У 1}+k}$ будет определяться:

$$P_{y_{1+k}} = 1 - P_{\overline{y}_{1+k}} = 1 - \left(1 - \prod_{\nu=1}^{n_{\text{OCH}}} \left(1 - P_{\text{пор}\nu}\right) \left(1 - P_{\text{под}\nu}\right)\right) \times \left(1 - \prod_{i=1}^{n_{j}} \left(1 - P_{\text{пор}i,j}\right) \left(1 - P_{\text{под}i,j}\right)\right),$$

$$(3)$$

где: $P_{\overline{y}_{1+k}}$ — вероятность нарушения управления БЛА на основном маршруте полета БЛА и на всех k дополнительных маршрутах; $n_{\text{осн}}$ — количество маршрутных точек (узловых точек геотопологической модели зоны полетов на ТВД) на основном маршруте полета БЛА; k — количество дополнительных альтернативных маршрутов полета БЛА; n_j — количество маршрутных точек (узловых точек геотопологической модели зоны полетов на ТВД) на j-м дополнительном маршруте полета БЛА; v, i — номера маршрутных точек (узловых точек геотопологической модели зоны полетов на ТВД) основного и дополнительных маршрутов, соответственно.

Так как для вероятностей $P_{\text{пор }\nu} < 1$ и $P_{\text{под }\nu} < 1$ то для значения вероятности устойчивости маршрутного управления БЛА верно следующее:

$$P_{y_1} \leq P_{y_{1+k}}.$$

Равенство наступает при k=0.

Обобщая вышеуказанное можно сделать вывод, что увеличение количества дополнительных альтернативных маршрутов k относительно основного маршрута полета БЛА, а также формирование основного и дополнительных маршрутов полета через маршрутные точки (узловые точки геотопологической

DOI: 10.24412/2410-9916-2022-2-92-134

105

модели) с минимальными значениями $P_{\text{пор}}$ и $P_{\text{под}}$ возможно обеспечить высокие значения $P_{\text{у}}$. В идеальном случае вероятность устойчивости маршрутного управления БЛА $P_{\text{y}} \rightarrow 1$, если все точки (узлы) основного и дополнительных маршрутов формируются за пределами зон ФП и РЭП противника.

Необходимо обеспечить выполнение критерия выигрыша по целевому показателю АСУ комплекса с БЛА – вероятности устойчивости маршрутного управления БЛА:

$$P_{\mathrm{Y}\,1} < P_{\mathrm{Y}\,2},\tag{4}$$

где: i=1 — вариант маршрута БЛА, формируемого без научно-обоснованного учета условий применения средств ФП и РЭП; i=2 — вариант множества маршрутов БЛА, формируемых путем научно-обоснованного учета условий применения средств ФП и РЭП, основанного на теоритических результатах данной работы.

Обозначим $\Delta P_{\rm y}$ = $(P_{\rm y}_{\rm 2}$ - $P_{\rm y}_{\rm 1})/P_{\rm y}_{\rm 1}$ – относительный достигаемый выигрыш в вероятности устойчивости маршрутного управления БЛА, по результатам данной работы.

С учетом, того, что существующие АСУ комплекса с БЛА в режиме маршрутного управления формируют один «прямой» маршрут n_1 к объекту воздушной разведки:

$$P_{y_1} = \prod_{\nu=1}^{n_1} \left(\left(1 - P_{\text{пор}\,\nu} \right) \left(1 - P_{\text{под}\,\nu} \right) \right),\tag{5}$$

а предлагается формировать множество маршрутов (один основной и k резервных) в обход зон ПВО и РЭП:

$$P_{V2} = 1 - \left(1 - \prod_{\nu=1}^{n_{\text{och}}} \left(1 - P_{\text{nop }\nu}\right) \left(1 - P_{\text{nop }\nu}\right)\right) \prod_{j=1}^{k} \left[1 - \prod_{i=1}^{n_{j}} \left(1 - P_{\text{nop }i,j}\right) \left(1 - P_{\text{nod }i,j}\right)\right]. \tag{6}$$

Таким образом, формальный показатель достигаемого выигрыша в вероятности устойчивости маршрутного управления БЛА по результатам данной работы будет равен:

$$\Delta P_{V} = \left(\frac{1 - \left(1 - \prod_{\nu=1}^{n_{\text{cen}}} \left(1 - P_{\text{nop}\nu}\right) \left(1 - P_{\text{nop}\nu}\right)\right) \prod_{j=1}^{k} \left[1 - \prod_{i=1}^{n_{j}} \left(1 - P_{\text{nop}i,j}\right) \left(1 - P_{\text{nod}i,j}\right)\right]}{\prod_{\nu=1}^{n_{1}} \left(\left(1 - P_{\text{nop}\nu}\right) \left(1 - P_{\text{nod}\nu}\right)\right)} - \frac{\prod_{\nu=1}^{n_{1}} \left(\left(1 - P_{\text{nop}\nu}\right) \left(1 - P_{\text{nod}\nu}\right)\right)}{\prod_{i=1}^{n_{1}} \left(\left(1 - P_{\text{nop}\nu}\right) \left(1 - P_{\text{nod}\nu}\right)\right)} \cdot 100\% .$$

$$(7)$$

Выражения (2) и (3) позволяют оценить различные варианты маршрутов БЛА на ТВД по показателю вероятности устойчивости маршрутного управления БЛА с учетом применения средств ФП и РЭП, а выражение (7) — выигрыш при переходе от одного маршрута БЛА к множеству альтернативных маршрутов.

Элементами новизны представленного решения, которые отличают ее от других теоритических решений в области оценки качества маршрутов полета

ЛА и БЛА [15, 63, 64-68, 82], является то, что в состав методики во-первых, введены формальные параметры явно учитывающие снижение устойчивости управления БЛА в зонах применения средств ФП и РЭП, а именно — вероятность поражения БЛА средствами ПВО и вероятность подавления КРУ БЛА для каждой контрольной и узловой точки маршрута полета, во-вторых, в составе расчетных соотношений учтена возможность формирования не одного маршрута полета БЛА, а нескольких маршрутов, которые формируются с учетом месторасположения средств ФП и РЭП, при этом учитывается что БЛА может переходить с основного на один из дополнительных маршрутов при обнаружении новых зон противодействия противника.

На основе данной методики сформирован показатель выигрыша (7) в устойчивости маршрутного управления на основе которого возможно провести сравнительную оценку различных вариантов маршрутов БЛА.

7. Оценивание устойчивости АСУ комплекса с БЛА в условиях воздействия дестабилизирующих факторов

В предыдущих разделах статьи в качестве объекта был рассмотрен БЛА, представлены решения по формированию маршрутов полета БЛА с учетом месторасположения средств ФП и РЭП, а также расчетные соотношения для оценивания устойчивости маршрутного управления БЛА. Вместе с тем, эти результаты относились к одиночному БЛА, в то время как АСУ комплекса в БЛА одновременно управляет множеством БЛА, при этом каждый КРУ «ПУ–БЛА», а также каналы связи «БЛА–БЛА» образуют граф управления. Ввиду того, что показатели устойчивости АСУ комплекса с БЛА определяются параметрами графа, который ее формализует, определим логическую взаимосвязь показателей устойчивости АСУ комплекса с БЛА с показателями связности из теории графов. При этом будем считать, что отдельные ПУ и БЛА в его составе — соответствуют вершинам графа, а КРУ и линии связи — ребрам графа. Каждое информационное направление (ИН) в графе соответствует множеству путей передачи данных по сети «из конца в конец» между отдельными ПУ и БЛА.

Показатели связности АСУ комплекса с БЛА могут быть определены через показатели связности графа G(u, v) формализующего АСУ комплекса с БЛА в виде множеств вершин $\{u\}$ и соединяющих их ребер $\{v\}$ (рис. 5). При этом, как правило, в процессе формализации АСУ вершинами графа представляются такие узлы АСУ, к которым направлены не менее трех линий связи. Показатели связности i-го ИН определяются через показатели связности его подграфа $G_{\text{ИН }i}$.

Для графа G различают показатели вершинной x_u и реберной x_v связности. Вершинная связность x_u определяет минимальное число вершин, удаление которых приводит к несвязному графу, а реберная связность x_v — минимальное число ребер, удаление которых приводит к тому же результату [83]. Минимальная степень вершины δ_{min} в графе G определяется минимальным количеством ребер, инцидентных вершине. Показатели x_v , x_u и δ_{min} связаны между собой следующим неравенством:

$$x_u \le x_v \le \delta_{min} \le 2m/n,\tag{8}$$

где: m – количество ребер в графе; n – количество вершин в графе.

DOI: 10.24412/2410-9916-2022-2-92-134

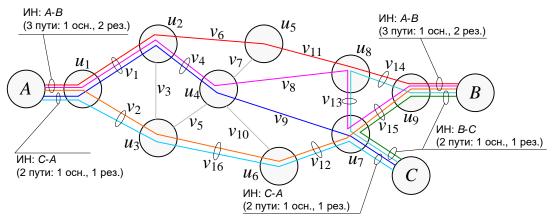


Рис. 5. Граф, формализующий АСУ БЛА

Проведя анализ выражения (8) можно сделать вывод о том, что связность графа G нарушается при удалении x_u вершин или x_v ребер. Предельный случай для неравенства (8) наступает в случае, если граф сети полносвязный. В этом случае любая пара вершин графа связана между собой ребром и имеет место равенство:

$$x_u = x_v = \delta_{min} = 2m/n. (9)$$

Таким образом, значение связности максимально для полносвязного графа. Для остальных случаев ее значение не может превысить значения минимальной степени вершины δ_{min} . То есть, для повышения связности АСУ комплекса с БЛА в условиях дестабилизирующих воздействий необходимо равномерное распределение плотности степеней вершин формализованного графа АСУ комплекса с БЛА.

Для систем связи значение вершинной связности x_u определяет количество вершин графа, поражение которых приведет к несвязному графу АСУ комплекса с БЛА, то есть к утрате свойства устойчивости. Значение реберной связности x_v определяет количество линий связи (ребер графа) приведение которых в неработоспособное состояние приведет к тому же результату.

Как показано ранее, основными источниками ДФ на АСУ комплекса с БЛА являются средства ФП (средства ПВО) и средства РЭП. При этом для АСУ комплекса с БЛА значение реберной связности x_{ν} характеризует эффективность применения средств РЭП, а значение вершинной связности x_{μ} — эффективность применения средств ФП. Таким образом, значения вершинной (x_{ν}) и реберной (x_{ν}) связности формализованного графа могут служить как критериями устойчивости АСУ комплекса с БЛА, так и критериями эффективности дестабилизирующих воздействий на нее и определять то количество элементов АСУ комплекса с БЛА, отказ которых соответствует утрате свойства устойчивости.

Дополнительно к показателям реберной и вершинной связности можно использовать показатели из теории сложных сетей представленные в работе [83] и также описывающие устойчивость формализованного графа АСУ комплекса с БЛА.

1) Диаметр графа D(G) – длина максимального из кратчайших путей d_{ij} , которые можно сформировать между всеми вершинами графа G:

$$D(G) = \max(d_{ij} \mid d_{ij} < \infty), i=1...n, j=1...n, i \neq j.$$
(10)

В современных сетевых протоколах маршрутизации, как правило, используется ограничение на число ретрансляций сообщения. Соответственно, в графе, формализующем АСУ комплекса с БЛА будут считаться связными только те пары узлов (вершин графа) между которыми существует путь, имеющий длину не более заданного. Таким образом, данный показатель характеризует требование к сетевому протоколу маршрутизации по возможному количеству ретрансляций сообщений (данных информационного обеспечения и команд).

- 2) Функция распределения степеней вершин $F(\delta_i)$ графа G, определяемая вероятностью того, что вершина u_i в графе G имеет степень δ_i . Функция $F(\delta_i)$ может характеризоваться распределением Пуассона, экспоненциальным или степенным распределением и используется при анализе вероятностных характеристик связности графа, формализующего АСУ комплекса с БЛА.
 - 3) Средний путь d_{cp} между вершинами графа G:

$$d_{cp} = \frac{2}{n(n+1)} \sum_{i \neq j} d_{ij} , \qquad (11)$$

где: n — количество вершин графа; d_{ij} — кратчайший путь между i-ой и j-ой вершинами графа.

Чем меньше величина среднего пути $d_{\rm cp}$, тем меньше элементов АСУ комплекса с БЛА (вершин и ребер) входит в состав путей ИН и соответственно ниже вероятность их отказа и выше вероятность связности графа АСУ комплекса с БЛА.

4) Показатель уязвимости сети H_z относительно удаления z-го элемента АСУ БЛА (вершины или ребра):

$$H_z = \left| E - E_z \right| / E, \tag{12}$$

где: E – эффективность исходной сети; E_z – эффективность сети после удаления z-го элемента (вершины или ребра).

В качестве меры эффективности могут быть использованы усредненные показатели качества обслуживания в сети связи АСУ БЛА. Для пакетных сетей связи такими показателями могут являться: пропускная способность сети, нормированная к количеству ИН; средняя длительность передачи сообщения (пакета) от источника к получателю в АСУ комплекса с БЛА; вероятность отказа в обслуживании.

5) Посредничество b_u вершины u:

$$b_{u} = \sum_{i \neq j} \frac{\varphi(i, u, j)}{\varphi(i, j)}, \tag{13}$$

где: $\varphi(i,j)$ — общее количество путей между вершинами i и j; $\varphi(i,u,j)$ — количество путей между вершинами i и j, проходящих через вершину u.

Величина посредничества вершины b_u определяет степень важности соответствующего ей узла связи при маршрутизации информационных потоков, то есть, чем выше b_u , тем большее количество транзитных маршрутов, проходящих через узел связи u, будут нуждаться в перенаправлении в случае его отказа.

6) Коэффициент кластеризации вершины Y_u :

$$Y_{u} = \frac{2\delta_{u\Sigma}}{\delta_{u}(\delta_{u} - 1)},\tag{14}$$

где: δ_u — степень вершины u; $\delta_{u\,\Sigma}$ — суммарная степень вершин, инцидентных вершине u.

Большое значение коэффициента кластеризации является признаком принадлежности вершины к группе узлов с высокой плотностью взаимосвязей между собой, а распределение коэффициента кластеризации — соответствует тенденции к образованию таких групп.

Показатели уязвимости H_z , посредничества b_u и кластеризации Y_u могут быть использованы при определении коэффициентов важности элементов АСУ БЛА в ходе решения как задач повышения устойчивости АСУ БЛА.

По аналогии с устойчивостью систем связи [83, 84] введем показатель устойчивости АСУ комплекса с БЛА в виде значения вероятности связности ИН P_{cb} , под которой понимается вероятность того, что на заданном информационном направлении между двумя отдельными ПУ и БЛА существует хотя бы один путь, по которому возможна передача информации с требуемым качеством (QoS – Quality of Srvice):

$$P_{cB} = P(k_{QoS} \ge 1 \mid \{Q_k\} \in \{Q^{\text{rpe6}}\}),$$
 (15)

где: k_{QoS} — количество работоспособных путей на заданном ИН обеспечивающих заданное качество обслуживания QoS; Q_k — качество обслуживания, обеспечиваемое путями (путем) на заданном ИН; $Q^{\text{тpe6}}$ — требуемый уровень качества обслуживания.

Вместе с тем, данное определение устойчивости не учитывает важность отдельных ИН, количество и распределение в них путей, а также особенности влияния на них ДФ. В связи с этим, в качестве показателя устойчивости АСУ БЛА предлагается использовать *среднюю вероятность устойчивости ИН* $(P_{\text{У ср}})$:

$$P_{y_{cp}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} P_{y_i}, \qquad (16)$$

где: N – количество ИН в графе АСУ БЛА; $P_{\mathrm{Y}\,i}$ – устойчивость i-го ИН, $i=\overline{1,N}$.

При этом устойчивость каждого *i*-го ИН P_{y_i} , входящего в сумму (16), будет определяться выражением [83]:

$$P_{\mathrm{V}i} = K_{\Gamma i} P_{\mathrm{cB}i}, \tag{17}$$

где: $K_{\Gamma i}$ — коэффициент готовности i-го ИН; $P_{\text{св }i}$ — вероятность связности i-го ИН в условиях влияния на его элементов ДФ.

В выражении (17) коэффициент готовности $K_{\Gamma i}$ определяет временные параметры процесса отказ — восстановление ИН при влиянии на ИН дестабилизирующих факторов, а вероятность связности $P_{\text{св}\,i}$ — структурно-вероятностные параметры ИН.

Необходимо отметить, что при использовании показателя устойчивости в виде (16) вводится допущение о равнозначности различных ИН в составе АСУ БЛА. Однако ИН имеют различную важность и для учета их различного вклада в общий показатель устойчивости (выражение (16)) целесообразно ввести соот-

Systems of Control, Communication and Security

ветствующие весовые коэффициенты важности α_i для каждого i-го ИН в АСУ БЛА [83]:

$$P_{y_{\rm cp}} = \sum_{i=1}^{N} \alpha_i P_{y_i} , \qquad (18)$$

где аі удовлетворяют условию нормировки

$$\sum_{i=1}^{N} \alpha_i = 1.$$

В работе [71], посвященной устойчивости систем связи, коэффициенты важности і-го ИН предложено определять исходя из циркулирующих по ним долей трафика:

$$\alpha_i(\lambda_i) = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^N \lambda_i},\tag{19}$$

где λ_i – интенсивность трафика, передаваемого в i-том ИН.

Однако, для АСУ БЛА такой показатель не всегда будет отражать реальную важность ИН для решения задачи управления. Поэтому в качестве весовых коэффициентов α_i ИН АСУ БЛА предлагается использовать коэффициенты уязвимости H_z (12), посредничества b_u (13) и кластеризации Y_u (14). Например, в случае учета степени посредничества узлов b_u в коэффициенте важности i-го ИН α_i примет вид:

$$\alpha_{i}(b_{u}) = \frac{\sum_{j=1}^{k_{i}} \sum_{v=1}^{n_{j}} b_{u \ jv}}{\sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{k_{i}} \sum_{v=1}^{n_{j}} b_{u \ ijv}},$$
(20)

где: k_i – количество путей в составе i-го ИН; n_i – количество вершин в составе j-го пути i-го ИН; $b_{u\, j\nu}$ — коэффициент посредничества ν -го элемента j-го пути в рассматриваемом ИН; $b_{u\,ijv}$ – коэффициент посредничества v-го элемента j-го пути в і-м ИН.

По аналогии, могут быть получены выражения для коэффициента важности i-го ИН α_i в зависимости от коэффициентов уязвимости H_i и кластеризации Y_u :

$$\alpha_{i}(H) = \frac{\sum_{j=1}^{k_{i}} \sum_{\nu=1}^{z_{j}} H_{j\nu}}{\sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{k_{i}} \sum_{\nu=1}^{z_{j}} H_{ij\nu}},$$
(21)

где: z_i – количество элементов (m_i ребер и n_i вершин) в составе ИН; H_{iv} – коэффициент уязвимости ν -го элемента (вершины или ребра) j-го пути рассматриваемого ИН; H_{ijv} – коэффициент уязвимости v-го элемента (вершины или ребра) ј-го пути і-го ИН;

$$\alpha_{i}(Y_{u}) = \frac{\sum_{j=1}^{k_{i}} \sum_{v=1}^{n_{j}} Y_{u \ jv}}{\sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{k_{i}} \sum_{v=1}^{n_{j}} Y_{u \ ijv}},$$
(22)

DOI: 10.24412/2410-9916-2022-2-92-134

где: n_i – количество вершин в составе ИН; Y_{uiv} – коэффициент кластеризации vой вершины j-го пути рассматриваемого ИН; $Y_{u\,iiv}$ – коэффициент кластеризации ν -ой вершины j-го пути i-го ИН.

Вместе с тем, даже несмотря на возможность использования весовых коэффициентов показатель устойчивости (17) учитывает структурные и динамические параметры устойчивости АСУ БЛА в слишком обобщенном виде, а также не учитывает особенности воздействия на элементы ИН различных типов дестабилизирующих воздействий. Для учета вышеуказанных факторов были разработаны отдельные подходы к формализации ДФ разного типа, представленные ниже.

Формализация структурных параметров информационных направлений в АСУ комплекса с БЛА с учетом воздействий дестабилизирующих факторов различного типа на отдельные элементы комплекса

Рассмотрим более подробно факторы, определяющие вероятность связности отдельного i-го ИН $P_{{}_{\mathrm{CB}\,i}}$ в выражении (17) при определении показателя устойчивости АСУ БЛА.

В качестве основных дестабилизирующих воздействий на ИН, будем рассматривать следующие:

- физическое поражение уничтожение элементов ИН, как ПУ, так и БЛА ударными средствами ПВО, так и наземными средствами огневого поражения;
- функциональное поражения электромагнитным излучением ЭМИ) – поражение радиоэлектронных и информационно-технических средств АСУ и БЛА в его составе в результате применения по ним ракет, оснащенных генераторами мощного сверхвысокочастотного (СВЧ) электромагнитного излучения (ЭМИ);
- радиоэлектронное подавление подавление радиоканалов связи «ПУ-БЛА» и «БЛА-БЛА» в результате воздействия средств РЭП;
- отказы радиоэлектронных и технических средств АСУ БЛА вследствие воздействия внутренних ДФ и естественных процессов надежности: старения и выработки своего ресурса.

Для учета специфики каждого типа дестабилизирующего воздействия вероятность связности $P_{\text{св }i}$ каждого отдельного i-го ИН из выражения (17) предлагается определять в следующем виде:

$$P_{_{\text{CB}\,i}} = \left(1 - P_{_{\Phi\Pi\,i}}\right) \left(1 - P_{_{\Phi\Pi \ni \text{MM}\,i}}\right) \left(1 - P_{_{P\ni\Pi\,i}}\right) \left(1 - P_{_{\text{OTK}\,i}}\right),\tag{23}$$

где: $P_{\Phi\Pi\,i}$ – вероятность $\Phi\Pi$ огневыми средствами такого количества $\Pi \mathrm{Y}$ и БЛА в его составе в ИН, которое больше или равно величине вершинной связности x_{μ} подграфа $G_{\text{ИН}\,i}$ и переводит этот подграф в несвязное состояние; $P_{\Phi\Pi \ni \text{MИ}\,i}$ – вероятность ФП ЭМИ такого количества ПУ и БЛА в его составе в ИН, которое больше или равно величине вершинной связности x_u подграфа $G_{\mathrm{ИН}\,i}$ и переводит этот подграф в несвязное состояние; $P_{\rm PЭП}_i$ – вероятность радиоэлектронного подавления такого количества линий связи в составе ИН, которое больше или

DOI: 10.24412/2410-9916-2022-2-92-134

равно величине реберной связности x_{v} подграфа $G_{\mathrm{ИH}\,i}$ и переводит этот подграф в несвязное состояние; $P_{\mathrm{отк}\,i}$ — вероятность такого количества отказов элементов ИН (вершин или ребер) вследствие воздействия внутренних ДФ и естественных процессов надежности, которое больше или равно величине вершинной связности x_{u} или реберной связности x_{v} подграфа $G_{\mathrm{ИH}\,i}$ и переводит этот подграф в несвязное состояние.

Условие о влиянии каждого типа дестабилизирующего воздействия таким образом, чтобы оно приводило к критическому снижению вершинной (x_u) или реберной (x_v) связности подграфа $G_{\mathrm{UH}\,i}$ в выражении (23), т.е. переводило бы этот подграф в несвязное состояние, по сути значит, что в таком подграфе отсутствуют пути передачи между ПУ-источником и БЛА-адресатом в ИН.

Вместе с тем, определение выражения (23) для всего ИН может представлять определенную сложность, однако, если известны вероятности воздействия соответствующих дестабилизирующих факторов на каждый элемент АСУ комплекса с БЛА, то можно применить следующую свертку показателей.

Связность *i*-го ИН определяется работоспособным состоянием всех k_i -х путей, каждый из которых содержит z_j элементов (вершин и ребер) (при этом $j = \overline{1, k_i}$), в связи с чем выражение для $P_{\text{св }i}$ с учетом параметров отдельных элементов примет вид:

$$P_{csi} = 1 - \prod_{j=1}^{k_i} (1 - P_{pa\delta j}) = 1 - \prod_{j=1}^{k_i} \left(1 - \prod_{\nu=1}^{z_j} P_{pa\delta. \mathfrak{I}.\nu} \right), \tag{24}$$

где: k_i — количество путей в i-м ИН; $P_{\text{раб}\,j}$ — вероятность работоспособного состояния j-го пути в ИН; j — номер пути в ИН; $P_{\text{раб.эл. }\nu}$ — вероятность работоспособного состояния ν -го элемента ИН (вершины или ребра); ν — номер элемента в ИН; $z_j = n_j + m_j$ — число элементов (m_j ребер и n_j вершин) в j-м пути ИН.

Отметим, что для свертки (24) введено допущение о том, что каждый j-й путь в ИН является работоспособным, если в нем работоспособны все z_j его элементов (вершин и ребер). Связность же i-го ИН определяется работоспособным состоянием всех k_i -х путей, каждый из которых содержит z_j элементов ($j = \overline{1, k_i}$).

В выражении (24) предполагается, что каждый ν -й элемент i-го ИН (вершина или ребро) подвергается воздействию дестабилизирующих факторов всех типов:

$$P_{\mathrm{pa6.9}\mathrm{J}...\nu} = \! \left(1 - P_{\Phi\Pi\,\nu} \right) \! \left(1 - P_{\Phi\Pi \ni \mathrm{MM}\,\nu} \right) \! \left(1 - P_{\mathrm{P}\ni \Pi\,\nu} \right) \! \left(1 - P_{\mathrm{otk}\,\nu} \right), \label{eq:pa6.9}$$

где: $P_{\Phi\Pi\nu}$ — вероятность отказа v-го элемента ИН (ПУ или БЛА) вследствие его ФП огневыми средствами; $P_{\Phi\Pi\, \rm ЭMH\, \nu}$ — вероятность отказа v-го элемента ИН (ПУ или БЛА) вследствие воздействия на него ФП ЭМИ; $P_{\rm PЭ\Pi\, \nu}$ — вероятность отказа v-го элемента ИН (канала связи) вследствие его радиоэлектронного подавления; $P_{\rm отк\, \nu}$ — вероятность отказа v-го элемента ИН (ПУ, БЛА или канала связи) вследствие воздействия внутренних ДФ и естественных процессов надежности.

Если какой-либо из дестабилизирующих факторов отсутствует, то соответствующая вероятность равна нулю.

DOI: 10.24412/2410-9916-2022-2-92-134

-113

Как будет показано далее (в выражении (34)) вероятность физического или функционального поражения, в силу того, что они фактически отличаются только использованием ракет с обычной или СВЧ ФП ЭМИ боевой частью (БЧ) может быть представлена единым показателем – вероятностью поражения v-го элемента ИН $P_{\text{пор }\nu}$. В этом случае итоговое выражение для вероятности работоспособности у-го элемента будет:

$$P_{\text{pa6.эл.}\nu} = (1 - P_{\text{пор}\nu})(1 - P_{\text{PЭП}\nu})(1 - P_{\text{отк}\nu}). \tag{25}$$

Из выражения (24) можно определить математическое ожидание количества работоспособных путей в ИН M(k):

$$M(k) = \sum_{j=1}^{k_i} j \left(1 - \prod_{\nu=1}^{z_j} P_{\text{pa6. эл. }\nu} \right).$$
 (26)

Если допустить, что все *j*-е пути в составе ИН характеризуются равным значением вероятности работоспособного состояния пути $P_{\text{раб }i}$, то можно рассчитать количество путей k_i , которое обеспечит требуемую вероятность связности отдельного *i*-го ИН P_{cB}_{i} :

$$k_i = \left| \log_{\left(1 - P_{\text{pa6}\,i}\right)} \left(1 - P_{\text{cB}\,i}\right) \right|. \tag{27}$$

Зачастую в практике построения современных АСУ используется резервирование путей в ИН, когда один путь является основным, а остальные – резервными. В этом случае вероятность связного состояния ИН, состоящего из одного основного и (k_i-1) резервных путей (соответственно из $z_{\text{осн}}$ и z_i элементов, где $j = \overline{1, k_i - 1}$), будет определяться как:

$$P_{\text{CB }i} = 1 - \left(1 - \prod_{\nu=1}^{z_{\text{OCH}}} P_{\text{pa6. эл. }\nu}\right) \prod_{j=1}^{k_i - 1} \left(1 - \prod_{\nu=1}^{z_j} P_{\text{pa6. эл. }\nu}\right). \tag{28}$$

Так как для любого j-го пути $P_{\text{раб.эл. }\nu} \leq 1$, то для любого ИН добавление резервных путей будет увеличивать вероятность его связности $P_{\rm cg}$ *i*.

Вместе с тем, выражение (28) не учитывает возможные пересечения путей на элементах подграфа ИН. Зависимость вероятности связности i-го ИН $P_{\rm cs}$ iот количества путей k_i в ИН с учетом их пересечений по общим элементам сети подробно рассмотрена в работах Д.А. Ковалькова [85], С.М. Одоевского, П.В. Лебедева [86].

В данном подразделе проведено оценивание устойчивости АСУ комплекса с БЛА, а также формализация показателя устойчивости. Новизной результатов, представленных в этом подразделе, которая отличает ее от известных работ в области оценки устойчивости АСУ различных военных комплексов [87-90], является:

- вновь введенный показатель устойчивости АСУ комплекса с БЛА средняя вероятность устойчивости ИН в графе, формализующем информационную подсистему АСУ и структуру каналов связи в ней;
- в состав структурных параметров устойчивости ИН введены параметры в формализованном виде учитывающие возможности по физическому и функциональному поражению элементов АСУ комплекса с БЛА, а также радиоэлектронному подавлению каналов управления.

DOI: 10.24412/2410-9916-2022-2-92-134 114 URL: https://sccs.intelgr.com/archive/2022-02/05-Ivanov.pdf

Представленный подход может быть использован для обоснования решений, направленных на повышение устойчивости как АСУ комплекса с БЛА, так и других АСУ военного назначения, элементы которого подвергаются физическому огневому поражению и радиоэлектронному подавлению каналов управления, путем внедрения сетевой структуры управления, с адаптивно изменяющейся структурой управления, подобно тому как это изложено в работах [89, 91, 92].

Выводы

В научной работе основываясь на ранее опубликованных методиках: кластеризации полетных зон БЛА по степени устойчивости управления и формирования маршрутов полета БЛА с учетом месторасположения средств ФП и РЭП [7, 17], представлена оценка устойчивости маршрутного управления БЛА в условиях применения средств ФП и РЭП, а также устойчивости самого АСУ комплекса с БЛА в условиях воздействия вышеуказанных дестабилизирующих факторов.

Оценка устойчивости показала, что применение методик формирования множества маршрутов полетов БЛА и ранжирование их по степени устойчивости управления, с учетом фактора потенциальной потери БЛА при применении противником средств ФП и РЭП позволит сохранить управление БЛА за счет построения маршрута в обход зон тактического превосходства противника.

Разработанные методики и результаты оценки устойчивости АСУ с БЛА могут быть использованы организациями, ведущими военно-научное сопровождение работ в оборонно-промышленном комплексе при разработке технических и тактико-технических заданий на перспективные НИОКР в области разработки БЛА, а также главными конструкторами перспективных комплексов управления ЛА, БЛА, АК РЛДН, а также АСУ авиацией.

Отдельные, частные результаты этой работы получены в рамках исследований по бюджетной теме FFZF-2022-0004.

Литература

- 1. Афонин И. Е., Макаренко С. И., Петров С. В., Привалов А. А. Анализ опыта боевого применения групп беспилотных летательных аппаратов для поражения зенитно-ракетных комплексов системы противовоздушной обороны в военных конфликтах в Сирии, в Ливии и в Нагорном Карабахе // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 4. С. 163-191. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10406
- 2. Макаренко С. И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам. Монография. СПб.: Наукоемкие технологии, 2020. 204 с.
- 3. Мосов С. П. Беспилотная разведывательная авиация стран мира: история создания, опыт боевого применения, современное состояние, перспективы развития. Монография. К.: Румб, 2008. 160 с.
- 4. Дремлюга Г. П., Завьялова О. А. Опыт использования беспилотных летательных аппаратов в боевых операциях // Проблемы развития

DOI: 10.24412/2410-9916-2022-2-92-134

корабельного вооружения и судового радиоэлектронного оборудования. 2016. № 3 (8). С. 67-73.

- 5. Еремин Г. В., Гаврилов А. Д., Назарчук И. И. Малоразмерные беспилотники новая проблема для ПВО // Отвага [Электронный ресурс]. 29.01.2015. № 6 (14). URL: http://otvaga2004.ru/armiya-i-vpk/armiya-i-vpk-vzglyad/malorazmernye-bespilotniki/ (дата доступа 16.10.2019).
- 6. Иванов М. С., Васильченко А. С., Малышев В. А. Анализ способов применения беспилотных летательных аппаратов малого и среднего класса в локальных конфликтах XXI века // Современное состояние, актуальные проблемы и перспективные направления развития авиационного радиоэлектронного оборудования. Сборник научных статей по материалам VII Международной научно-практической конференции «Академические Жуковские чтения» (20-21 ноября 2019 г.). Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2019. С 26-29.
- 7. Иванов М. С., Васильченко А. С., Малышев В. А. Формирование полетных зон беспилотных летательных аппаратов по степени устойчивости управления ими в условиях применения средств противовоздушной обороны и радиоэлектронного подавления // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 4. С. 262-279. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10410
- 8. Иванов М. С., Васильченко А. С., Малышев В. А. Формирование множества маршрутов полета беспилотного летательного аппарата с целью повышения устойчивости маршрутного управления // Перспективы развития, проблемы применения и управления беспилотной авиации при выполнении боевых и специальных задач. Сборник научных статей по материалам II Всероссийской научно-практической конференции «Беспилотная авиация: состояние и перспективы развития» (11-12 марта 2020 г.): в 2 ч. Часть 2. Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2020. С. 55-60.
- 9. Авиация ВВС России и научно-технический прогресс. Боевые комплексы и системы вчера, сегодня, завтра / под ред. Е.А. Федосова. М.: Дрофа, 2005. 734 с.
- 10. Авиация ПВО России и научно технический прогресс: боевые комплексы и системы вчера, сегодня, завтра: монография / Под ред. Е.А. Федосова. М.: Дрофа, 2005. 815 с.
- 11. Меркулов В. И., Харьков В. П. Оптимизация иерархического управления группой БЛА // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2012. Т. 10. № 8. С. 61-67.
- 12. Казарьян Б. И. Беспилотные аппараты. Способы применения в составе боевых систем // Военная мысль. 2012. № 3. С. 21-26.
- 13. Потапов В. И., Нагорский А. А. Беспилотные летательные аппараты: за и против // Вестник академии военных наук. 2011. № 2 (35). С. 137-142.
- 14. Казамбаев М. К., Куатов Б. Ж. Некоторые вопросы использования беспилотных летательных аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2017. № 4 (20). С. 97-100. DOI 10.21685/2307-4205-2017-4-13.
- 15. Иванов С. В. Методика построения субоптимальных маршрутов для группы беспилотных летательных аппаратов на основе биоинспирированных

DOI: 10.24412/2410-9916-2022-2-92-134

116

алгоритмов при наличии препятствий // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 2. С. 1-23. DOI: 10.24412/2410-9916-2022-2-1-23

- 16. Верба В. С. Авиационные комплексы радиолокационного дозора и наведения. Принципы построения, проблемы разработки и особенности функционирования. Монография. М.: Радиотехника, 2014. 528 с.
- 17. Иванов М. С., Васильченко А. С., Малышев В. А. Формирование маршрутов полета беспилотных летательных аппаратов с учетом местоположения средств противовоздушной обороны и радиоэлектронного подавления // Системы управления, связи и безопасности. № 4. 2019. С. 403-420. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10416
- 18. Иванов М. С., Васильченко А. С., Малышев В. А. Анализ основных угроз для беспилотных летательных аппаратов на театре военных действий // Современное состояние, актуальные проблемы и перспективные направления развития авиационного радиоэлектронного оборудования. Сборник научных статей по материалам VII Международной научно-практической конференции «Академические Жуковские чтения» (20-21 ноября 2019 г.). Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2019. С. 23-26.
- 19. Макаренко С. И., Иванов М. С., Попов С. А. Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. Монография. СПб.: Свое издательство, 2013. 166 с.
- 20. Виллиамс У. Т., Ланс Д. Н. Методы иерархической классификации // Статистические методы для ЭВМ / Под ред. М.Б. Малютова. М.: Наука, 1986. С. 269-301.
- 21. Воронцов К. В. Лекции по алгоритмам кластеризации и многомерного шкалирования. М.: ВЦ им. А.А. Дородницына РАН, 2007. 18 с. URL: http://www.ccas.ru/voron/download/Clustering.pdf (дата обращения 07.06.2021).
- 22. Макаренко С. И. Метод обеспечения устойчивости телекоммуникационной сети за счет использования ее топологической избыточности // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 3. С. 14-30. DOI: 10.24411/2410-9916-2018-10302.
- 23. Цветков К. Ю., Макаренко С. И., Михайлов Р. Л. Формирование резервных путей на основе алгоритма Дейкстры в целях повышения устойчивости информационно-телекоммуникационных сетей // Информационно-управляющие системы. 2014. № 2(69). С. 71-78.
- 24. Макаренко С. И., Квасов М. Н. Модифицированный алгоритм Беллмана-Форда с формированием кратчайших и резервных путей и его применение для повышения устойчивости телекоммуникационных систем // Инфокоммуникационные технологии. 2016. Т. 14. № 3. С. 264-274. DOI: 10.18469/ikt.2016.14.3.06
- 25. Макаренко С. И. Усовершенствованный протокол маршрутизации OSPF, обеспечивающий повышенную устойчивость сетей связи // Труды учебных заведений связи. 2018. Т. 4. № 2. С. 82-90.
- 26. Макаренко С. И. Усовершенствование функций маршрутизации и сигнализации протокола PNNI с целью повышения устойчивости сети связи //

- Труды учебных заведений связи. 2020. Т. 6. № 2. С. 45-59. DOI: 10.31854/1813-324X-2020-6-2-45-59
- 27. Верба В. С., Меркулов В. И. Теоретические и прикладные проблемы разработки систем радиоуправления нового поколения // Радиотехника. 2014. № 5. С. 39-44.
- 28. Верба В. С., Поливанов С. С. Организация информационного обмена в сетецентрических боевых операциях // Радиотехника. 2009. № 8. С. 57-62.
- 29. Меркулов В. И., Гандурин В. А., Дрогалин В. В. и др. Авиационные системы радиоуправления: учебник для военных и гражданских ВУЗов. М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 2008.
- 30. Меркулов В. И. Научно-технические проблемы разработки авиационных систем радиоуправления // Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н.Е. Жуковского. 2015. № 3. С. 43-50.
- 31. Меркулов В. Н., Дрогалин В. В., Канащенков А. Н., Лепин В. Н., Самарин О. Ф., Соловьев А. А. Авиационные системы радиоуправления. Том 1. Принципы построения систем радиоуправления. Основы синтеза и анализа / Под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова. М.: Радиотехника, 2003. 192 с.
- 32. Меркулов В. И., Канащенков А. И., Чернов В. С., Дрогалин В. В., Антипов В. Н., Анцев Г. В., Кулабухов В. С., Лепин В. Н., Сарычев В. А., Саблин В. Н., Самарин О. Ф., Тупиков В. А., Турнецкий Л. С., Харьков В. П. Авиационные системы радиоуправления. Том 3. Системы командного радиоуправления. Автономные и комбинированные системы наведения / под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова М.: Радиотехника, 2004. 320 с.
- 33. Войткевич К. Л. Сулима А. А., Зац П. А. Проблемы построения канала управления беспилотными летательными аппаратами на основе ДКМВ-радиолинии // Электросвязь. 2014. № 7. С. 9-11.
- 34. 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.
- 35. Каляев И. А., Гайдук А. Р., Капустин С. Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. М.: Физматлит. 2009. 280 с.
- 36. Гайдук А. Р., Капустин С. Г. Концепция построения систем коллективного управления беспилотными летательными аппаратами // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2012. Т. 10. № 7. С. 8-16.
- 37. Кондратьев А. Е. Общая характеристика сетевых архитектур, применяемых при реализации перспективных сетецентрических концепций ведущих зарубежных стран // Военная мысль. 2008. № 12. С. 63-74.
- 38. Кондратьев А. Е. Реализация концепции сетецентрическая война в ВВС США // Зарубежное военное обозрение. 2009. № 5. С. 44-49.
- 39. Макаренко С. И., Иванов М. С. Сетецентрическая война принципы, технологии, примеры и перспективы. Монография. СПб.: Наукоемкие технологии, 2018.-898 с.

- 40. Макаренко С. И., Бережнов А. Н. Перспективы использования сетецентрических технологий управления боевыми действиями и проблемы их внедрения в вооруженных силах Российской Федерации // Вестник академии военных наук. 2011. № 4 (37). С. 64-68.
- 41. Богданов А. Е., Попов С. А., Иванов М. С. Перспективы боевых действий с использованием сетецентрических технологий // Военная мысль. 2014. № 3. С. 3-12.
- 42. Василин Н. Я. Беспилотные летательные аппараты: боевые, разведывательные. – Минск: ПОПУРРИ, 2003. – 272 с.
- 43. Чернышев Ю. М., Кальной А. И., Катунин Ф. А. Практические рекомендации по организации разведки перспективной разведывательноинтегрированной беспилотными системой, летательными c аппаратами // Наука и военная безопасность. 2017. № 3 (10). С. 28-33.
- 44. Лукашева Э. П., Силкин А. А., Чистяков Н. В. Элементарные соображения по беспилотной воздушной разведке и наблюдению поля боя, а также по оптимизации беспилотных систем // Беспилотная [Электронный ресурс]. 2019. – URL: http://www.uav.ru/articles/elementary.pdf (дата обращения 20.03.2022).
- 45. Мазулин Г. А. Использование беспилотных летательных аппаратов министерства обороны Вооружённых сил РФ в Сирии // Проблемы развития корабельного вооружения и судового радиоэлектронного оборудования 2017. № 2 (11). C. 43-50.
- 46. Ростопчин В. В. Элементарные основы оценки эффективности применения беспилотных авиационных систем для воздушной разведки // [Электронный pecypc]. 2019. URL: Беспилотная http://www.uav.ru/articles/elementary.pdf (дата обращения 20.05.2021).
- 47. Ростопчин В. В. Ударные беспилотные летательные аппараты и противовоздушная оборона – проблемы и перспективы противостояния // [Электронный 2019. Беспилотная авиашия pecypc]. https://www.researchgate.net/publication/331772628_Udarnye_bespilotnye_letatelny e_apparaty_i_protivovozdusnaa_oborona_-problemy_i_perspektivy_protivostoania (дата обращения 20.05.2021).
- 48. Полтавский А. В. Беспилотные летательные аппараты в системе вооружения // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2011. № 163. С. 163-170.
- 49. Полтавский А. В., Жумабаева А. С., Бикеев Р. Р. Многофункциональные комплексы беспилотных летательных аппаратов: развитие в системе вооружения // Надежность и качество сложных систем. 2016. № 1 (13). C. 39-46.
- 50. Иванов С. В., Беседин С. А. Решение задачи многокритериальной оптимизации функционирования смешанной группы беспилотных летательных аппаратов в условиях информационно - технических воздействий // Вопросы Серия 16: Технические средства противодействия оборонной техники. № 11-12 (161-162). C. 102-107. 2021. DOI: 10.53816/23061456 2021 11-12 102.

- 51. Иванов С. В., Петрова О. В., Запорожченко М. Р., Карипов Д. Р., Ковешников М. А. Методика оценки оперативности процесса сбора и обработки информации в ходе выполнения полетного задания группой беспилотных летательных аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 4 (36). С. 64-73. DOI: 10.21685/2307-4205-2021-4-8
- 52. Самойлов П. В., Иванов К. А. Угрозы применения малоразмерных БПЛА и определение наиболее эффективного способа борьбы с ними // Молодой ученый. 2017. № 45. С. 59-65. URL https://moluch.ru/archive/179/46398/ (дата обращения: 16.10.2021).
- 53. Егурнов В. О., Ильин В. В., Некрасов М. И., Сосунов В. Г. Анализ способов противодействия беспилотным летательным аппаратам для обеспечения безопасности защищаемых объектов // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2018. № 1-2 (115-116). С. 51-58.
- 54. Лопаткин Д. В., Савченко А. Ю., Солоха Н. Г. К вопросу о борьбе с тактическими беспилотными летательными аппаратами // Военная мысль. 2014. № 2. С. 41-47.
- 55. Ананьев А. В., Кащенко Г. А. Система ситуационного управления рисками в конфликте комплексов беспилотных летательных аппаратов и противовоздушной обороны // Современные наукоемкие технологии. 2016. N 9-1. С. 9-12.
- 56. Арапов О. Л., Зуев Ю. С. Повышение вероятности преодоления летательным аппаратом средств противовоздушной обороны // Вестник Концерна ПВО Алмаз-Антей. 2014. № 1 (11). С. 57-60.
- 57. Годунов А. И., Шишков С. В., Юрков Н. К. Комплекс обнаружения и борьбы с малогабаритными беспилотными летательными аппаратами // Труды международного симпозиума Надежность и качество. 2014. Т. 1. С. 90-95.
- 58. Теодорович Н. Н., Строганова С. М., Абрамов П. С. Способы обнаружения и борьбы с малогабаритными беспилотными летательными аппаратами // Интернет-журнал Науковедение. 2017. Т. 9. № 1. С. 13.
- 59. Краснов С. В. Малышев С. Р., Шишков В. А., Сазыкин А. М. Синтез системы контроля и поражения малогабаритных беспилотных летательных аппаратов на основе формального подхода // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2019. № 1-2 (127-128). С. 78-84.
- 60. Рощина Н. В. Системы и средства управления беспилотных летательных аппаратов как объект их поражения // Вестник Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны. 2019. № 1 (4). С. 68-74.
- 61. Белоус Р. А., Сизов Ю. Г., Скоков А. Л. Некоторые особенности ПВО в условиях массового применения противником комплексов БЛА и ВТО // Военная мысль. 2013. № 6. С. 64-71.
- 62. Белоножко Д. Г., Починок В. В., Королев И. Д., Половинчук Н. Я., Иванов С. В. Разработка модели преднамеренных воздействий на

- робототехнический комплекс двойного назначения // Стратегическая стабильность. 2020. № 1 (90). С. 38-43.
- 63. Бережной В. Ю., Леликов М. А., Прозоров В. А. Система нечеткого управления беспилотного вертолета // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2009. № 138. С. 173-177.
- 64. Батраева И. А., Тетерин Д. П. Алгоритм планирования траектории движения беспилотного летательного аппарата при выполнении поисковоспасательных операций // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2018. Т. 20. № 6. С. 210-214
- 65. Попов А. Н., Тетерин Д. П. Методы планирования траектории движения беспилотного летательного аппарата с учетом противодействия противника // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2017. Т. 19. № 1-2. С. 371-376.
- 66. Ефанов В. Н., Неугодникова Л. М. Программный комплекс информационной поддержки принятия решений при оценке типовых траекторий полета // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2009. № 6 (64). С. 38-43.
- 67. Зубов Н. П. Проблемные вопросы навигации и наведения роботизированных летательных аппаратов // Новости навигации. 2011. № 2. С. 29-33.
- 68. Иванова И. А., Никонов В. В., Царева А. А. Способы организации управления беспилотными летательными аппаратами // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2014. № 11-1. С. 56-63.
- 69. Иванов М. С., Аганесов А. В., Крылов А. А., Галлиев С. Ф., Агеев А. М., Легконогих Д. С., Березин А. В., Рябков П. В., Межуев А. М., Абросимов И. П. Беспилотные летательные аппараты: справочное пособие / Под. общ. ред. С.А. Попова. Воронеж: Научная книга, 2015. 619 с.
- 70. Российские ударные дроны // Наука и техника [Электронный ресурс]. 13.05.2019. URL: https://vseonauke.com/1684166572273306194/rossijskie-udarnye-drony/ (дата обращения 16.10.2019).
- 71. Ударные БПЛА России: погоня за вчерашним днем // Армейский вестник [Электронный ресурс]. 17.05.2016. URL: https://armynews.ru/2016/05/udarnye-bpla-rossii-pogonya-za-vcherashnim-dnem/ (дата обращения 16.10.2019).
- 72. Иванов М. С., Васильченко А. С., Малышев В. А. Особенности управления беспилотными летательными аппаратами при решении задач воздушной разведки // Актуальные вопросы исследований в авионике: теория, обслуживание, разработки. Сборник научных статей по материалам докладов VI Международной научно-практической конференции «АВИАТОР» (14–15 февраля 2020 г.). Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2020. С. 110-114.
- 73. Иванов М. С., Васильченко А. С., Малышев В. А. Комплекс управления беспилотными летательными аппаратами воздушной разведки // Актуальные вопросы исследований в авионике: теория, обслуживание,

- разработки. Сборник научных статей по материалам докладов VI Международной научно-практической конференции «АВИАТОР» (14–15 февраля 2020 г.). Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2020. С. 105–110.
- 74. Дрожжин А. И., Алтухов Е. В. Воздушные войны в Ираке и Югославии. М.: Техника молодежи, 2002. 80 с.
- 75. Федосеев В. Е., Иванов М. С. Синтез демодулятора с оптимальной компенсацией структурной прерывистой помехи // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2010. Т. 6. № 10. С. 91-94.
- 76. Федосеев В. Е., Иванов М. С. Методика и результаты анализа потенциальной помехоустойчивости приема цифрового сигнала на фоне манипулированной структурной помехи // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2010. Т. 6. № 11. С. 108-111.
- 77. Зюко А. Г. Помехоустойчивость и эффективность систем связи. М.: Связь, 1972.-359 с.
- 78. Попов С. А., Иванов М. С., Тихомиров Н. М. Оптимизация приема радиосигналов в системах связи с быстрой программной перестройкой радиочастоты // Радиолокация, навигация и связь. XX международная научнотехническая конференция. Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2014. С. 728-732.
- 79. Иванов М. С., Васильченко А. С., Малышев В. А. Методика кластеризации полетных зон беспилотного летательного аппарата по степени устойчивости управления // Научно-методический сборник Военной академии воздушно-космической обороны. 2020. С. 55-60.
- 80. Макаренко С. И. Локализация областей воздействия дестабилизирующих факторов в сети связи на основе алгоритма иерархической кластеризации Ланса-Вильямса // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2014. № 4 (16). С. 70-77.
- 81. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р. Алгоритмы: построение и анализ. М.: МЦНМО, 2000. 960 с.
- 82. Козуб А. Н., Кучеров Д. П. Интеграционный подход к задаче выбора маршрута группы БПЛА // Системы и средства искусственного интеллекта. $2013. \ No. 4. \ C. 333-343.$
- 83. Михайлов Р. Л., Макаренко С. И. Оценка устойчивости сети связи в условиях воздействия на неё дестабилизирующих факторов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2013. № 4. С. 69-79.
- 84. Макаренко С. И. Модели системы связи в условиях преднамеренных дестабилизирующих воздействий и ведения разведки. Монография. СПб.: Наукоемкие технологии, 2020. 337 с.
- 85. Ковальков Д. А. Математические модели оценки надежности мультисервисного узла доступа // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2011. № 2. С. 64-71.
- 86. Одоевский С. М., Лебедев П. В. Методика оценки устойчивости функционирования системы технологического управления инфокоммуникационной сетью специального назначения с заданной топологической и функциональной структурой // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 1. С. 152-189. DOI: 10.24411/2410-9916-2021-10107

122

- 87. Грудинин И. В., Суровикин С. В. Обоснование структуры метода информационного обеспечения управления борьбой с противником в воздушно-космической сфере // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2016. № 650. С. 95-108.
- 88. Грудинин И. В., Суровикин С. В. Управление ресурсами информационно-управляющей подсистемы АСУ огнем в интересах обеспечения ее живучести // Известия Института инженерной физики. 2016. № 3 (41). С. 57-62.
- 89. Грудинин И. В., Майбуров Д. Г. Метод оперативной адаптации информационно-управленческого ресурса отражения удара средств воздушно-космического нападения противника // Вестник Академии военных наук. 2018. № 4 (65). С. 82-90.
- 90. Дыбов В. Н., Подгорных Ю. Д. Об устойчивости воздушнокосмической обороны Российской Федерации // Военная мысль. 2019. № 10. С. 33-40.
- 91. Афонин И. Е., Петров С. В., Макаренко С. И. Переход к адаптивносетевой структуре системы управления воздушно-космической обороной, как один из основных путей повышения ее устойчивости // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2021. № 19. С. 159-178.
- 92. Грудинин И. В., Пальгуев Д. А., Шентябин А. Н. Информационная подсистема сбора, обработки и обмена радиолокационной информацией сетевой структуры // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2020. № 675. С. 243-253.

References

- 1. Afonin I. E., Makarenko S. I., Petrov S. V., Privalov A. A. Analysis of combat experience as groups of unmanned aerial vehicles are used to defeat anti-aircraft missile means of the air defense system in Syria, Libya and Nagorno-Karabakh wars. *Systems of Control, Communication and Security*, 2020, no. 4, pp. 163-191 (in Russian). DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10406
- 2. Makarenko S. I. *Counter Unmanned Aerial Vehicles*. Saint Petersburg, Naukoemkie Tehnologii Publ., 2020. 204 p. (in Russian).
- 3. Mosov S. P. Bespilotnaya razvedyvatel'naya aviaciya stran mira: istoriya sozdaniya, opyt boevogo primeneniya, sovremennoe sostoyanie, perspektivy razvitiya. Monografiya [Unmanned reconnaissance aircraft of the countries of the world: the history of creation, experience of combat use, current state, development prospects. Monograph]. Kiev, Rumb Publ., 2008. 160 p. (in Russian).
- 4. Dremlyuga G. P., Zavyalova O. A. Opyt ispol'zovaniya bespilotnyh letatel'nyh apparatov v boevyh operaciyah [Experience of using unmanned aerial vehicles in combat operations]. *Problems of ship armament and vessel radioelectronic equipment development*, 2016, vol. 8, no. 3, pp. 67-73 (in Russian).
- 5. Eremin G. V., Gavrilov A. D., Nazarchuk I. I. Malorazmernye bespilotniki novaya problema dlya PVO [Small-sized drones a new problem for air defense]. *Otvaga* [*Courage*], 2015, no. 6 (14). Available at: http://otvaga2004.ru/armiya-i-

vpk/armiya-i-vpk-vzglyad/malorazmernye-bespilotniki/ (accessed 16 October 2019) (in Russian).

- Vasilchenko A. S., 6. Ivanov M. S., Malyshev V. A. Analiz sposobov primeneniya bespilotnykh letatel'nykh apparatov malogo i srednego klassa v lokal'nykh konfliktakh XXI veka [Analysis of the ways of using unmanned aerial vehicles of small and medium class in local conflicts of the XXI century]. Sovremennoe sostoyanie, aktual'nye problemy i perspektivnye napravleniya razvitiya aviatsionnogo radioelektronnogo oborudovaniya. Sbornik nauchnykh statey po Mezhdunarodnov nauchno-prakticheskoy «Akademicheskie Zhukovskie chteniya» (20-21 noyabrya 2019 g.) [The current state, current problems and promising areas of development of aviation radio-electronic equipment. Collection of scientific articles based on the materials of the VII International Scientific and Practical Conference "Academic Zhukovsky Readings" (November 20-21, 2019)]. Voronezh, Military Training and Research Center of the Air Force "Air Force Academy named after Professor N.E.Zhukovsky and Yu.A.Gagarin", 2019. pp. 26-29 (in Russian).
- 7. Vasilchenko A. S., Ivanov M. S., Malyshev V. A. Unmanned aerial vehicles flight zones formation, based on their control stability degree in air defense and electronic warfare conditions. Systems of Control, Communication and Security, 2019, no. 4, pp. 262-279 (in Russian). DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10410
- 8. Ivanov M. S., Vasilchenko A. S., Malyshev V. A. Formirovanie mnozhestva marshrutov poleta bespilotnogo letatel'nogo apparata s cel'yu povysheniya ustojchivosti marshrutnogo upravleniya [Formation of multiple flight routes of an unmanned aerial vehicle in order to increase the stability of route management]. Perspektivy razvitiya, problemy primeneniya i upravleniya bespilotnoj aviacii pri vypolnenii boevyh i special'nyh zadach. Sbornik nauchnyh statej po materialam II Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Bespilotnaya aviaciya: sostoyanie i perspektivy razvitiya» (11-12 marta 2020 g.) [Prospects of development, problems of application and control of unmanned aircraft in the performance of combat and special tasks. Collection of scientific articles based on the materials of the II All-Russian Scientific and Practical Conference "Unmanned aviation: state and prospects of development" (March 11-12, 2020)]. Part 2. Voronezh, Military Training and Research Center of the Air Force "Air Force Academy named after Professor N.E.Zhukovsky and Yu.A.Gagarin", 2020. pp. 55-60. (in Russian).
- 9. Aviatsiia VVS Rossii i nauchno-tekhnicheskii progress. Boevye kompleksy i sistemy vchera, segodnia, zavtra [Aviation of the Russian air force and scientifictechnical progress. Combat systems and system yesterday, today, tomorrow]. Moscow, Drofa Publ., 2005. 734 p. (in Russian).
- 10. Aviatsiia PVO Rossii i nauchno-tekhnicheskii progress: boevye kompleksy i sistemy vchera, segodnia, zavtra [Air defense of Russia and scientific-technical progress: combat systems and system yesterday, today, tomorrow]. Moscow, Drofa Publ., 2004. 816 p. (in Russian).
- 11. Merkulov V. I., Kharkov V. P. Synthesis of an algorithm of hierarchical control of UAVs group. Journal Information-measuring and Control Systems, 2012, vol. 10, no. 8, pp. 61-67 (in Russian).

DOI: 10.24412/2410-9916-2022-2-92-134

- 12. Kazarian B. I. Bespilotnye apparaty. Sposoby primenenija v sostave boevyh system [Drones. Methods of application as part of combat systems]. *Military Thought*, 2012, no. 3, pp. 21-26 (in Russian).
- 13. Potapov V. I., Nagorskij A. A. Bespilotnye letatelnye apparaty: za i protiv [Unmanned aerial vehicles: pros and cons]. *Vestnik Akademii voennykh nauk*, 2011, vol. 35, no. 2, pp. 137-142 (in Russian).
- 14. Kazambaev M. K., Kuatov B. Zh. Some Questions on Use of Unmanned Aircraft Vehicles. *Raliability and Quality of Complex Systems*, 2017, vol. 20, no. 4, pp. 97-100 (in Russian). DOI 10.21685/2307-4205-2017-4-13
- 15. Ivanov S. V. A method for constructing suboptimal routes for a group of unmanned aerial vehicles based on bioinspired algorithms in the presence of obstacles. *Systems of Control, Communication and Security*, 2022, no. 2, pp. 1-23 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2022-2-1-23
- 16. Verba V. S. Aviatsionnye kompleksy radiolokatsionnogo dozora i navedeniia. Printsipy postroeniia, problemy razrabotki i osobennosti funktsionirovaniia. Monografiia [Aircraft radar patrol and guidance. Principles, problems of development and peculiarities of functioning. Monograph]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2014. 528 p. (in Russian).
- 17. Vasilchenko A. S., Ivanov M. S., Kolmykov G. N. Unmanned aerial vehicles flight routes formation, taking into account the location of air defense and electronic warfare means. *Systems of Control, Communication and Security*, 2019, no. 4, pp. 403-420 (in Russian). DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10416
- 18. Ivanov M. S., Vasilchenko A. S., Malyshev V. A. Analiz osnovnykh ugroz dlya bespilotnykh letatel'nykh apparatov na teatre voennykh deystviy [Analysis of the main threats to unmanned aerial vehicles in the theater of military operations]. Sovremennoe sostoyanie, aktual'nye problemy i perspektivnye napravleniya razvitiya aviatsionnogo radioelektronnogo oborudovaniya. Sbornik nauchnykh statey po materialam VII*Mezhdunarodnov* nauchno-prakticheskoy konferentsii «Akademicheskie Zhukovskie chteniya» (20-21 noyabrya 2019 g.) [The current state, current problems and promising areas of development of aviation radio-electronic equipment. Collection of scientific articles based on the materials of the VII International Scientific and Practical Conference "Academic Zhukovsky Readings" (November 20-21, 2019)]. Voronezh, Military Training and Research Center of the Air Force "Air Force Academy named after Professor N.E.Zhukovsky and Yu.A.Gagarin", 2019. pp. 23-26 (in Russian).
- 19. Makarenko S. I., Ivanov M. S., Popov S. A. *Pomekhozashchishchennost'* sistem sviazi s psevdosluchainoi perestroikoi rabochei chastity. Monografija [Interference Resistance Communication Systems with Frequency-Hopping Spread Spectrum. Treatise]. Saint-Petersburg, Svoe Izdatelstvo Pabl., 2013, 166 p. (in Russian).
- 20. Villiams U. T., Lans D. N. Metody ierarhicheskoj klassifikacii [The Methods of Hierarchical Classification]. *Statisticheskie metody dlja JeVM* [Statistical methods for PC], Moscow, Nauka Publ., 1986, pp.269-301 (in Russian).
- 21. Voroncov K. V. Lektsii po algoritmam klasterizatsii i mnogomernogo shkalirovaniia [Lectures on clustering algorithms and multidimensional scaling].

- Moscow, Dorodnicyn Computing Centre RAS, 2007, 18 p. Available at: http://www.ccas.ru/voron/download/Clustering.pdf (in Russian).
- 22. Makarenko S. I. Stability method of telecommunication network with using topological redundancy. *Systems of Control, Communication and Security*, 2018, no. 3, pp. 14-30 (in Russian). DOI: 10.24411/2410-9916-2018-10302.
- 23. Tsvetcov K. U., Makarenko S. I., Mikhailov R. L. Forming of Reserve Paths Based on Dijkstra's Algorithm in the Aim of the Enhancement of the Stability of Telecommunication Networks. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, vol. 69, no. 2, 2014, pp. 71-78 (in Russian).
- 24. Makarenko S. I., Kvasov M. N. Modified Bellman-Ford Algorithm with Finding the Shortest and Fallback Paths and its Application for Network Stability Improvement. *Infokommunikacionnye tehnologii*, 2016, vol. 14, no. 3, pp. 264-274 (in Russian). DOI: 10.18469/ikt.2016.14.3.06
- 25. Makarenko S. I. The Improved OSPF Protocol for High Network Stability. *Proceedings of Telecommunication Universities*, 2018, vol. 4, no. 2, pp. 82-90 (in Russian).
- 26. Makarenko S. I Improved Routing and Signaling Functions of PNNI Protocol for High Network Stability. *Proceedings of Telecommunication Universities*, 2020, vol. 6, no. 2, pp. 45-59 (in Russian). DOI: 10.31854/1813-324X-2020-6-2-45-59
- 27. Verba V. S., Merkulov V. I. Heoretical and practical problems of designing next generation of radio guidance systems. *Radiotehnika*, 2014, no. 5, pp. 39-44 (in Russian).
- 28. Verba V. S., Polivanov S. S. Organizatsiia informatsionnogo obmena v setetsentricheskikh boevykh operatsiiakh [Organization of information exchange in network-centric combat operations]. *Radiotekhnika*, 2009, no. 8, pp. 57-62 (in Russian).
- 29. Merkulov V.I., Gandurin V.A., Drogalin V.V. and etc. *Aviatsionnye sistemy radioupravleniia* [Aircraft systems control]. Moscow, Air force engineering Academy named after Professor N.E. Zhukovskogo, 2008.
- 30. Merkulov V. I. Nauchno-tekhnicheskie problemy razrabotki aviatsionnykh sistem radioupravleniia [Scientific-technical problems of development of aviation systems radio]. *Nauchnye chteniia po aviatsii, posviashchennye pamiati N.E. Zhukovskogo* [Scientific readings on aviation dedicated to the memory of N. E. Zhukovsky], 2015, no. 3, pp. 43-50 (in Russian).
- 31. Merkulov V. N., Drogalin V. V., Kanashchenkov A. N., Lepin V. N., Samarin O. F., Solov'ev A. A. *Aviatsionnye sistemy radioupravleniia. Tom 1. Printsipy postroeniia sistem radioupravlsniia. Osnovy sinteza i analiza* [Aviation radio system. Volume 1. Principles of systems radioupravlenie. Fundamentals of synthesis and analysis]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2003. 192 p. (in Russian).
- 32. Merkulov V. I., Konashenkov A. I., Chernov V. S., Dragalin V. V., Antipov V. N., Antsev G. V., Kulabukhov V. S., Lepin V. N., Sarychev V. A., Khar'kov V. P. Sablin V. N., Samarin O. F., Tupikov V. A., Turnetskii L. S., *Tom 3.* Aviatsionnye sistemy radioupravleniia. Sistemy komandnogo radioupravleniia. Avtonomnye i kombinirovannye sistemy navedeniia [Aviation radio

- system. Volume 3. Command radio control. Autonomous and combined guidance system]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2004. 320 p. (in Russian).
- 33. Voitkevich K. L. Sulima A. A., Zats P. A. Problemy postroeniia kanala upravleniia bespilotnymi letatel'nymi apparatami na osnove DKMV-radiolinii [The problem of constructing a control channel of unmanned aerial vehicles based on dcmu-radio]. *Elektrosviaz*, 2014, no. 7, pp. 9-11 (in Russian).
- 34. 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.
- 35. Kalyayev I. A., Gaiduk A. R., Kapustin S. G. *Modeli i algoritmy kollektivnogo upravleniia v gruppakh robotov* [Models and algorithms of collective control in groups of robots]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009. 280 p. (in Russian).
- 36. Gaiduk A. R., Kapustyan S. G. Conceptual aspects of group application of unmanned aerial vehicles. *Journal Information-measuring and Control Systems*, 2012, vol. 10, no. 7, pp. 8-16 (in Russian).
- 37. Kondratev A. E. Obshchaia kharakteristika setevykh arkhitektur, primeniaemykh pri realizatsii perspektivnykh setetsentricheskikh kontseptsii vedushchikh zarubezhnykh stran [General characteristics of the network architectures used in the implementation of promising network-centric concepts of leading foreign countries]. *Military Thought*, 2008, no. 12, pp. 63-74 (in Russian).
- 38. Kondratev A. E. Realizatsiia kontseptsii setetsentricheskaia voina v VVS SShA [Implementation of the concept of network-centric warfare in the U.S. air force]. *Zarubezhnoe voennoe obozrenie*, 2009, no. 5, pp. 44-49 (in Russian).
- 39. 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).
- 40. Makarenko S. I Berezhnov A. N. Perspektivy ispol'zovaniia setetsentricheskikh tekhnologii upravleniia boevymi deistviiami i problemy ikh vnedreniia v vooruzhennykh silakh Rossiiskoi Federatsii [Prospects of using network-centric technologies for the management of the fighting and problems of their implementation in the armed forces of the Russian Federation]. *Vestnik Akademii voennykh nauk*, 2011, vol. 37, no. 4, pp. 64-68 (in Russian).
- 41. Bogdanov A. Ye., Popov S. A. Ivanov M. S. Prospects of warfare using network-centric technologies. *Military Thought*, 2014, no. 3, pp. 3-12 (in Russian).
- 42. Vasilin N. Ya. Bespilotnye letatelnye apparaty: boevye, razvedyvatelnye [Unmanned aerial vehicles: combat, reconnaissance]. Minsk, POPURRI Publ., 2003. 272 p. (in Russian).
- 43. Chernyshev Yu. M., Kalnoy A. I., Katunin F. A. Practical recommendations to provide reconnaissance by the promising intelligence and fire system integrated with unmanned drones. *Nauka i voennaya bezopasnost*, 2017, vol. 10, no. 3, pp. 28-33 (in Russian).
- 44. Lukasheva E. P., Silkin A. A., CHistyakov N. V. Elementarnye soobrazheniya po bespilotnoj vozdushnoj razvedke i nablyudeniyu polya boya, a takzhe po optimizacii bespilotnyh sistem [Elementary considerations on unmanned

127

aerial reconnaissance and battlefield surveillance, as well as on the optimization of unmanned systems]. *Bespilotnaya aviaciya* [Unmanned aircraft], 2019. Available at: http://www.uav.ru/articles/elementary.pdf (accessed 20 Mach 2022) (in Russian).

- 45. Mazulin G. A. Ispolzovanie bespilotnyh letatel'nyh apparatov ministerstva oborony Vooruzhyonnyh sil RF v Sirii [The use of unmanned aerial vehicles of the Ministry of Defense of the Armed Forces of the Russian Federation in Syria]. *Problems of ship armament and vessel radioelectronic equipment development*, 2017, vol. 11, no. 2, pp. 43-50 (in Russian).
- 46. Rostopchin V. V. Elementarnye osnovy ocenki effektivnosti primeneniya bespilotnyh aviacionnyh sistem dlya vozdushnoj razvedki [Elementary basics of evaluating the effectiveness of the use of unmanned aircraft systems for aerial reconnaissance]. *Bespilotnaya aviaciya* [Unmanned aircraft], 2019. Available at: http://www.uav.ru/articles/elementary.pdf (accessed 20 may 2021).
- 47. Rostopchin V. V. Udarnye bespilotnye letatel'nve apparaty protivovozdushnaja oborona – problemy i perspektivy protivostojanija. [Strike unmanned aerial vehicles and air defense-problems and prospects of confrontation]. Bespilotnaya aviaciya [Unmanned aircraft], 2019. Available https://www.researchgate.net/publication/331772628_Udarnye_bespilotnye_letatelny e_apparaty_i_protivovozdusnaa_oborona_-problemy_i_perspektivy_protivostoania (accessed 20 may 2021).
- 48. Poltavskii A. V. Unmanned Aircraft Vehicles in Weapon System. *Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation*, 2011, no. 163, pp. 163-170 (in Russian).
- 49. Poltavskij A. V., Zhumabaeva A. S., Bikeev R. R. Mnogofunkcionalnye kompleksy bespilotnyh letatel'nyh apparatov: razvitie v sisteme vooruzheniya [Multifunctional complexes of unmanned aerial vehicles: development in the weapons system]. *Reliability & Quality of Complex Systems*, 2016, vol. 13, no. 1, pp. 39-46 (in Russian).
- 50. Ivanov S. V., Besedin S. A. Solution of a task of multicriteria optimization of the functioning of a mixed group of unmanned aerial vehicles in conditions of information and technical influences. *Enginery Problems. Series 16. Anti-Terrorist Engineering Means*, 2021, vol. 161-162, no. 11-12, pp. 102-107 (in Russian). DOI: 10.53816/23061456_2021_11-12_102
- 51. Ivanov S. V., Petrova O. V., Zaporozhchenko M. R., Karipov D. R., Koveshnikov M. A. Methodology for assessing the efficiency of the process of collecting and processing information during the execution of a flight task by a group of unmanned aerial vehicles. *Reliability & Quality of Complex Systems*, 2021, vol. 36, no. 4, pp. 64-73 (in Russian). DOI: 10.21685/2307-4205-2021-4-8
- 52. Samojlov P. V., Ivanov K. A. Ugrozy primeneniya malorazmernyh BPLA i opredelenie naibolee effektivnogo sposoba bor'by s nimi [Threats of using small-sized UAVs and determining the most effective way to deal with them]. *Young scientist*, 2017, no. 45, pp. 59-65. Available at: https://moluch.ru/archive/179/46398/(accessed 16 October 2021) (in Russian).
- 53. Egurnov V. O., Ilyin V. V., Nekrasov M. I., Sosunov V. G. Unmanned aerial vehicles countermeasures to ensure the protected sites safety analysis. *Enginery*

DOI: 10.24412/2410-9916-2022-2-92-134

- 128

- *Problems. Series16. Anti-Terrorist Engineering Means*, 2018, no. 1-2 (115-116), pp. 51-58 (in Russian).
- 54. Lopatkin D. V., Savchenko A. Ju., Soloha N. G. K voprosu o bor'be s takticheskimi bespilotnymi letatel'nymi apparatami [On the issue of fighting tactical unmanned aerial vehicles]. *Military thought*, 2014, no. 2, pp. 41-47 (in Russian).
- 55. Ananev A. V., Kaschenko G. A. System of situational management by risks in the conflicting of complexes of unmanned aerial vehicles and an air defense. *Modern high technologies*, 2016, no. 9-1, pp. 9-12 (in Russian).
- 56. Arapov O. L., Zuev Yu. S. To increase the chances of overcoming the aircraft air defences. *Journal of "Almaz-Antey" Air and Space Defence Corporation*, 2014, vol. 11, no. 1, pp. 57-60 (in Russian).
- 57. Godunov A. I., Shishkov S. V., Yurkov N. K. Kompleks obnaruzheniya i bor'by s malogabaritnymi bespilotnymi letatel'nymi apparatami [Complex for detecting and combating small-sized unmanned aerial vehicles]. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost i kachestvo* [*Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*], 2014, vol. 1, pp. 90-95 (in Russian).
- 58. Teodorovich N. N., Stroganova S. M., Abramov P. S. Methods for detection and control of small-sized unmanned aerial vehicles. *Naukovedenie*, 2017, vol. 9, no. 1, pp. 13 (in Russian).
- 59. Krasnov S. V., Malyshev S. R., Shishkov V. A., Sazykin A. M. Synthesis of unmanned aerial vehicles (UAV) supervision and weapon system based on a formalist approach. *Enginery Problems. Series16. Anti-Terrorist Engineering Means*, 2019, vol. 127-128, no. 1-2, pp. 78-84 (in Russian).
- 60. Roshchina N. V. Sistemy i sredstva upravleniya bespilotnyh letatel'-nyh apparatov kak ob"ekt ih porazheniya [Systems and controls of unmanned aerial vehicles as an object of their destruction]. *Vestnik Yaroslavskogo vysshego voennogo uchilishcha protivovozdushnoj oborony*, 2019, no. 1 (4), pp. 68-74 (in Russian).
- 61. Belous R. A., Sizov Ju. G., Skokov A. L. Nekotorye osobennosti PVO v uslovijah massovogo primenenija protivnikom kompleksov BLA i VTO [Some Features of Air Defense in the Conditions of Mass Application by the Enemy of UAV and WTO Complexes]. *Military Thought*, 2013, no. 6, pp. 64-71 (in Russian).
- 62. Belonozhko D. G., Pochinok V. V., Korolev I. D., Polovinchuk N. Ya., Ivanov S. V. Development of a model of intentional impacts on the robotic technical complex of dual purpose. *Strategicheskaya stabilnost*, 2020, vol. 90, no. 1, pp. 38-43 (in Russian).
- 63. Berejnoy V. Yu., Lelikov M. A., Prozorov V. A. Fuzzy logic system control pilot less helicopter. *Civil aviation high technologies*, 2009, no. 138, pp. 173-177 (in Russian).
- 64. Batraeva I. A, Teterin D. P. Traxer Planning Algorithm Movements of a Free Flying Apparatus. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2018, vol. 20, no. 6, pp.210-214 (in Russian).
- 65. Popov A. N., Teterin D. P. Planning Methods of Movement Trajectory of Unmanned Aerial Vehicle Due to Counteraction of the Opponent. *Izvestia of Samara*

Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, vol. 19, no. 1-2, pp. 371-376 (in Russian).

- 66. Efanov V. N., Neugodnikova L. M. Decision-making information support software for typical flight path assessment. Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2009, vol. 64, no. 6, pp. 38-43 (in Russian).
- 67. Zubov N. P. Problems of Navigation and Guidance of Robotic Flying Vehicles. Novosti Navigacii, 2011, no. 2, pp. 29-33 (in Russian).
- Nikonov V. V., Tsareva A. A. 68. Ivanova I. A., Sposoby organizatsii upravleniya bespilotnymi letatel'nymi apparatami [Methods of organizing the management of unmanned aerial vehicles]. Aktualnye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk, 2014, no. 11-1, pp. 56-63 (in Russian).
- 69. Ivanov M. S., Aganesov A. V., Krylov A. A., Galliev S. F., Ageev A. M., Legkonogikh D. S., Berezin A. V., Riabkov P. V., Mezhuev A. M., Abrosimov I. P. Bespilotnye letatel'nye apparaty: spravochnoe posobie [Drones: a reference guide]. Voronezh, Nauchnaia Kniga Publ., 2015. 619 p. (in Russian).
- 70. Rossiyskie udarnye drony [Russian attack drones]. Nauka i tekhnika technology]. 2019. Available [Science and https://vseonauke.com/1684166572273306194/rossijskie-udarnye-drony/ (accessed 16 October 2019) (in Russian).
- 71. Udarnye BPLA Rossii: pogonya za vcherashnim dnem [Shock UAVs of Russia: chasing yesterday]. Armeyskiy vestnik [Army Bulletin]. 2016. Available at: https://army-news.ru/2016/05/udarnye-bpla-rossii-pogonya-za-vcherashnim-dnem/ (accessed 16 October 2019) (in Russian).
- 72. Ivanov M. S., Vasilchenko A. S., Malyshev V. A. Osobennosti upravleniya bespilotnymi letatel'nymi apparatami pri reshenii zadach vozdushnoy razvedki [Features of control of unmanned aerial vehicles in solving aerial reconnaissance tasks]. Aktual'nye voprosy issledovaniy v avionike: teoriya, obsluzhivanie, razrabotki. Sbornik nauchnykh statey po materialam dokladov VI Mezhdunarodnoy nauchnoprakticheskoy konferentsii «AVIATOR» (14–15 fevralya 2020 g.) [Current issues of research in avionics: theory, maintenance, development. Collection of scientific articles based on the reports of the VI International Scientific and Practical Conference "AVIATOR" (February 14-15, 2020)]. Voronezh, Military Training and Research Center of the Air Force "Air Force Academy named after Professor N.E.Zhukovsky and Yu.A.Gagarin", 2020. pp. 110-114 (in Russian).
- 73. Ivanov M. S., Vasilchenko A. S., Malyshev V. A. Kompleks upravleniya bespilotnymi letatel'nymi apparatami vozdushnov razvedki [The control complex for unmanned aerial vehicles of aerial reconnaissance]. Aktual'nye voprosy issledovaniy v avionike: teoriya, obsluzhivanie, razrabotki. Sbornik nauchnykh statey po materialam dokladov VI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «AVIATOR» (14-15 fevralya 2020 g.) [Current issues of research in avionics: theory, maintenance, development. Collection of scientific articles based on the reports of the VI International Scientific and Practical Conference "AVIATOR" (February 14-15, 2020)]. Voronezh, Military Training and Research Center of the Air Force "Air Force

Academy named after Professor N.E.Zhukovsky and Yu.A.Gagarin", 2020. pp. 105–110 (in Russian).

- 74. Drozhzhin A. I., Altukhov E. V. *Vozdushnye voyny v Irake i Yugoslavii* [Air Wars in Iraq and Yugoslavia]. Moscow, Tekhnika Molodezhi Publ., 2002. 80 p. (in Russian).
- 75. Fedoseev V. E., Ivanov M. S. Synthesis of the Demodulator with Optimum Indemnification of the Structural Faltering Hindrance. *Voronezh State Technical University Bulletin*, 2010, vol. 6, no. 10, pp. 91-94 (in Russian).
- 76. Fedoseev V. E., Ivanov M. S. Technique and Results of the Analysis of the Potential Noise Stability of Reception of the Digital Signal Against the Manipulated Structural Hindrance. *Voronezh State Technical University Bulletin*, 2010, vol. 6, no. 11, pp. 108-111 (in Russian).
- 77. Ziuko A. G. *Pomekhoustoichivost' i effektivnost' sistem sviazi* [Noise immunity and efficiency of communication systems]. Moscow, Sviaz Publ., 1972. 359 p. (in Russian).
- 78. Popov S. A., Ivanov M. S., Tikhomirov N. M. Optimizatsiya priema radiosignalov v sistemakh svyazi s bystroy programmnoy perestroykoy radiochastoty [Optimization of radio signal reception in communication systems with fast radio frequency software tuning]. *Radiolokatsiya, navigatsiya i svyaz'. XX mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya* [Radar, navigation and communication. XX International Scientific and Technical Conference]. Voronezh, Military Training and Research Center of the Air Force "Air Force Academy named after Professor N.E.Zhukovsky and Yu.A.Gagarin", 2014. pp. 728-732 (in Russian).
- 79. Ivanov M. S., Vasilchenko A. S., Malyshev V. A. Metodika klasterizatsii poletnykh zon bespilotnogo letatel'nogo apparata po stepeni ustoychivosti upravleniya [The method of clustering the flight zones of an unmanned aerial vehicle according to the degree of control stability]. *Nauchno-metodicheskiy sbornik Voennoy akademii Vozdushno-kosmicheskoy oborony* [Scientific and methodological collection of the Military Academy of Aerospace Defense], 2020, pp. 55-60 (in Russian).
- 80. Makarenko S. I. Area localization of destabilizing factors influence in communication network on the basis of Lance-Williams algorithm of hierarchical clustering. *Radio and telecommunication systems*, 2014, no. 4, pp. 70-77 (in Russian).
- 81. Kormen T., Lejzerson Ch., Rivest R. Algoritmy: postroenie i analiz [Algorithms: construction and analysis]. Moscow, Center for Continuous Mathematical Education Publ., 2000, 960p. (in Russian).
- 82. Kozub A. N., Kucherov D. P. Integrated approach to the problem of planning the route of UAV. *Artificial intelligence*, 2013, no. 4, pp. 333-343 (in Russian).
- 83. Mikhailov R. L., Makarenko S. I. Estimating Communication Network Stability under the Conditions of Destabilizing Factors Affecting it. *Radio and telecommunication systems*, 2013, no. 4, pp. 69-79 (in Russian).
- 84. Makarenko S. I. Modeli sistemy svjazi v uslovijah prednamerennyh destabilizirujushhih vozdejstvij i vedenija razvedki. Monografija [Models of

communication systems in conditions of deliberate destabilizing impacts and intelligence. Monograph]. Saint Petersburg, Naukoemkie Tehnologii Publ., 2020. 337 p. (in Russian).

- 85. Kovalkov D. A. Matematicheskie modeli otsenki nadezhnosti mul'tiservisnogo uzla dostupa [Mathematical model for reliability evaluation of multi-service access node network]. Radio and telecommunication systems, 2011, no. 2, pp. 64-71 (in Russian).
- 86. Odoevsky S. M., Lebedev P. V. Method for estimating the stability of a system of technological management for a special purpose infocommunication network with a defined topological and functional structures. Systems of Control, Communication and Security, 2021, no. 1, pp. 152-189 (in Russian). DOI: 10.24411/2410-9916-2021-10107
- 87. Grudinin I. V... Surovikin S. V. Obosnovanie struktury informatsionnogo obespecheniya upravleniya bor'boy s protivnikom v vozdushnokosmicheskov sfere [Substantiation of the structure of the method of information support for the management of the fight against the enemy in the aerospace sphere]. Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy, 2016, № 650, pp. 95-108 (in Russian).
- 88. Grudinin I. V., Surovikin S. V. Resource management information and control subsystem acs fire in order to ensure its survivability. Izvestiya Instituta inzhenernoy phiziki, 2016, vol. 41, no. 3, pp. 57-62 (in Russian).
- 89. Grudinin I. V., Maiburov D. G. Method of operational adaptation of information and management resource to reflect the impact of air and space attacks of the enemy. Vestnik Akademii voennykh nauk, 2018, vol. 65, no. 4, pp. 82-90 (in Russian).
- 90. Dybov V. N., Podgornykh Yu. D. On aerospace defense stability in the russian federation. *Military Thought*, 2019, no. 10, pp. 33-40 (in Russian).
- 91. Afonin I. E., Petrov S. V., Makarenko S. I. Transition to the adaptive network structure of the aerospace defense control system as one of the main ways to increaseits stability. Aerospace forces. Theory and practice, 2021, no. 19, pp. 159-178 (in Russian).
- 92. Grudinin I. V., Palguev D. A., Shentyabin A. N. Informatsionnaya podsistema sbora, obrabotki i obmena radiolokatsionnoy informatsiey setevoy struktury [Information subsystem for collecting, processing and exchanging radar information of a network structure]. Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy, 2020, no. 675, pp. 243-253 (in Russian).

Статья поступила 20 марта 2022 г.

Информация об авторах

Иванов Максим Сергеевич – кандидат технических наук. Старший преподаватель кафедры эксплуатации бортового авиационного радиоэлектронного оборудования. ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина». Область научных интересов: сети и системы авиационной радиосвязи. E-mail: point_break@rambler.ru

DOI: 10.24412/2410-9916-2022-2-92-134 132 URL: https://sccs.intelgr.com/archive/2022-02/05-Ivanov.pdf

sccs.intelgr.com

Адрес: 394074, Россия, Воронеж, Старых Большевиков, д. 54а.

Афонин Илья Евгеньевич — кандидат технических наук, доцент. Доцент кафедры авиационного и радиоэлектронного оборудования. Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков. Область научных интересов: информационный конфликт средств воздушно-космического нападения и системы воздушно-космической обороны; радиолокационные системы обнаружения, распознавания и целеуказания; обработка радиолокационных сигналов. E-mail: ilyaafonin@yandex.ru

Адрес: 350090, Россия, Краснодар, Дзержинского, д. 35.

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 В.О., д. 39.

Increasing stability of the control system of unmanned aerial vehicles in the conditions of fire damage and electronic warfare

M. S. Ivanov, I. E. Afonin, S. I. Makarenko

Problem statement: Currently, unmanned aerial vehicles (UAVs) are an integral part of any modern military conflict. The tasks of the UAVs are reconnaissance, targeting, destruction of the enemy, etc. When combat UAVs are using, the issue of maintaining the controllability of UAVs, and consequently increasing the stability of their control system, becomes relevant because of enemy used of fire damage and electronic warfare means. Therefore, the issue of increasing the stability of the UAV control system is an urgent task. The aim of this paper is to form proposals to improve the stability of the UAV control system in the conditions when enemy used of fire damage and electronic warfare means. Result: the proposals for improving the stability of the UAVs control system are presented, they based on author's techniques that previously are developed. The proposals showed that the formation of a UAV routes set and ranking them according to the control stability extent, taking into account the factor of potential loss of UAVs when the enemy used of fire damage and electronic warfare means, to ensure stability of UAVs control system by form routes that avoiding the enemy's tactical superiority zones. Practical significance: the presented proposals can be used to justify solutions aimed at increasing the stability of both the UAVs control systems and other military control systems, the elements of which are subjected to fire damage and electronic warfare means by enemies.

Keywords: unmanned aerial vehicle, military aviation, aircraft control, route control.

Information about Authors

Maxim Sergeevich Ivanov – Ph.D. of Engineering Sciences. Senior Lecturer of Department of Exploitation of Aircraft Electronic Equipment. Military Training and Research Center of the Air Force "Military Air Academy named after Professor"

DOI: 10.24412/2410-9916-2022-2-92-134

LINE Abstract Values intelligence on Josephine (2023) 02/05 Tempor and file.

N. E. Zhukovsky and J. A. Gagarin". Field of research: systems and networks aeronautical radio communication. E-mail: point_break@rambler.ru

Address: 394074, Russia, Voronezh, Old Bolsheviks str., 54a.

Ilya Evgenievich Afonin - Ph.D. of Engineering Sciences, Docent. Associate Professor at the Department of aviation and radio-electronic equipment. Krasnodar Higher Military School of Pilots. Field of research: information conflict of air and space attacking means and air and space defense systems; radar detection; recognition designation systems; processing. and target radar signal E-mail: ilyaafonin@yandex.ru

Address: 350090, Russia, Krasnodar, Dzerginskogo, 35.

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: makserg@yandex.ru

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